

01149



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**EVALUACION DE PROCESOS DE MEDIDA. DE
CALIBRACION, Y DE CORRECCION DE
INSTRUMENTOS MULTICOORDENADA.
POR MEDIO DEL CONCEPTO DE
INSTRUMENTACION VIRTUAL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA**

P R E S E N T A:

JOSE SANCHEZ VIZCAINO

ASESOR: M. I. LEOPOLDO A. GONZALEZ GONZALEZ

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Salvador[†] y María[†]

Por el regalo de la vida.

Por su trabajo y ejemplo.

Por inculcarme los valores de la superación, el amor y la esperanza.

A Bertha

*Por querer compartir conmigo la gran aventura de amar, educar, luchar y perseverar,
hasta que el Supremo Juez tenga a bien llamarnos.*

A José de Jesús, María de la Cruz, Berta, Salvador Arturo, María del Pilar

*Por que son ellos, quienes sin saberlo, motivan e inspiran el trabajo de cada día; porque su
alegría renueva el devenir, compartiéndonos hábitos de nueva vida.*

*A mis hermanos, hermanos adoptivos y amigos
Quienes con su aprecio y estima estimulan mi desarrollo académico, y
entrega a la vocación de investigación e ingeniería.*

*A los ilustres mentores de esta Facultad, quienes han sembrado en incontables
generaciones, la inquietud de servir a la Patria mediante el ejercicio honesto y digno de
las profesiones de ingeniería.*

*A los investigadores y desarrolladores de la tecnología mexicana, que han creído en
México fundando instituciones de investigación o desarrollo, o que han emprendido
proyectos estratégicos para revertir los procesos y costos de las hipotecas tecnológicas
y científicas impuestas por extraños, y recuperar la dignidad nacional.*

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE MEDIDA, DE CALIBRACIÓN, Y DE CORRECCIÓN DE INSTRUMENTOS MULTICOORDENADA, POR MEDIO DEL CONCEPTO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

ÍNDICE

CAPÍTULO	TEMA	PÁGINA
I	Introducción.	1
	Contexto de la presente investigación.	1
	Arribo del concepto de instrumentación virtual.	4
	Objeto de esta investigación.	6
	Plan de presentación de ésta tesis	7
	Referencias	9
II	Antecedentes	10
	Evolución de instrumentos de medida y de su exactitud	10
	Elementos constitutivos de un instrumento multieje	19
	Fenómenos dinámicos involucrados en la exactitud de un instrumento multieje.	25
	Cadenas de control involucradas en la exactitud de un instrumento multieje.	26
	Referencias	30
III	Análisis de errores de un instrumento multieje.	31
	Papel que juegan las variables de exactitud en los procesos de control de calidad, y utilidad del instrumento virtual.	39

	Papel que juegan las variables de exactitud en los procesos de validación universal de medidas, y utilidad del instrumento virtual.	41
	Papel que juegan las variables de exactitud en los procesos de calificación de instrumentos, y utilidad del instrumento virtual.	43
	Referencias.	43
IV	Análisis de modelos estándar de instrumentación virtual.	45
	Evaluación y crítica de modelos estándar.	53
	Propuesta de instrumento virtual propio.	56
	Especificaciones. Principios.	56
	Antecedentes del instrumento virtual propio.	57
	Desarrollo de una máquina de medir por coordenadas virtual no lineal, de errores libres e interfaces CAD.	61
	Interface numérica gráfica de operación y administración de datos.	75
	Escalamiento y manejo de primitivas del instrumento virtual hacia un espacio tridimensional.	78
	Referencias.	81
V	Empleo y evaluación del modelo propio.	82
	Ensayos de mediciones y correlaciones lineales.	82
	Ensayos de mediciones y correlaciones no lineales.	86
	Obtención de medidas a partir de posiciones absolutas por correlación algebraica directa.	86
	Reversibilidad de errores fuente incluyendo fenómenos de Abbe, a partir de invariabilidad de patrones de forma.	89
	Reversibilidad de errores fuente incluyendo fenómenos de Abbe, a partir de la invariabilidad de tamaño de calibres.	92

	Calibración de instrumentos 3D por principios 2D.	94
	Referencias.	98
VI	Resultados y conclusiones.	99
APENDICE A	Glosario de términos.	102
APENDICE B	Discusión de los principales procesos normalizados de calibración y verificación de máquinas de coordenadas, y de procesos normalizados que gozan de prestigio.	109
APENDICE C	Descripción de programas y comandos principales del instrumento virtual.	118
APENDICE D	Breve recopilación de investigaciones principales de temas afines.	126

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

CONTEXTO DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.

ARRIBO DEL CONCEPTO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL.

OBJETO DE ESTA INVESTIGACIÓN.

PLAN DE PRESENTACION DE ESTA TESIS.

1.1 INTRODUCCIÓN.

En el título de esta investigación llamada **EVALUACIÓN DE PROCESOS DE MEDIDA, DE CALIBRACIÓN, Y DE CORRECCIÓN DE INSTRUMENTOS MULTICOORDENADA POR MEDIO DEL CONCEPTO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**, se describe la creación de un instrumento virtual para ser utilizarlo como herramienta de prueba y mejora de medidas en procesos industriales, de diagnóstico de instrumentos, y aval en procesos legales de calibración, trazabilidad y calificación de instrumentos, pero en este título subyace también una investigación más amplia y profunda que trata del contexto histórico que le dio origen, sobre la normatividad actual sobre exactitud de instrumentos geométricos, así como sobre las tendencias tecnológicas de nuevos instrumentos y estado del arte de investigaciones afines; todo ello a fin de permitir la mejor valoración del instrumento propio

Es importante señalar que en el contexto actual de la enseñanza de ciencias e ingenierías, se han creado ambientes de simulación de variables físicas e instrumentos idealizados en *computadoras, que se les ha calificado con el genérico de instrumentación virtual*, equivalentes cercanos de esta instrumentación a nuestra investigación, los tenemos en los ambientes de visualización de procesos CAM, así como de sus sistemas expertos. Sin embargo, **es necesario señalar que el propósito de esta investigación no consiste en el empleo de estos instrumentos idealizados, sino en el descubrimiento de aquellos fenómenos que los separa de su idealización**, como efectos de backlash, errores de escalas, errores de escuadría, errores de rectitud, dilatación térmica, etc. Es importante notar que si bien el empleo del concepto no es único y tiene ya antecedentes, el concepto de integración de partes del instrumento y los modelos de sus errores en un sólo dispositivo, sí es único y ventajoso sobre los otros conceptos de instrumentación virtual

1.2 CONTEXTO DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

1.2.1 Contexto general

El desarrollo de instrumento virtual, su valoración y sus aplicaciones se enmarcan dentro de una disciplina mayor que podemos identificar como "Metrología", y que no se circunscribe solo

a la ingeniería, sino que abarca también a las ciencias y al comercio. Efectivamente, podemos definir o explicar el concepto de **metrología** como el arte o ciencia de la medida, y que atiende los aspectos de: definición de conceptos básicos físico-matemáticos de la medida, de sus aplicaciones para los propósitos de mejora tecnológica y de producción, y de beneficio o de seguridad social. Desde esta perspectiva podemos identificar los campos: Metrología Científica, Metrología Industrial y Metrología Legal

1.2.1.1 Es objeto de la metrología científica: la búsqueda y adopción de fenómenos físicos y principios universales que definan a las magnitudes, unidades y patrones; su conservación, la diseminación de su exactitud en los niveles superiores, el desarrollo de nuevos instrumentos, y en general la investigación y desarrollo de la ciencia y tecnología de medición, donde la alta exactitud de medidas juegue un papel importante. Realizan metrología científica principalmente los laboratorios primarios que los gobiernos instituyen y los centros de investigación. En México hacen metrología científica el Centro Nacional de Metrología (CENAM), centros de investigación estatales y universidades públicas.

1.2.1.2 Es objeto de la metrología industrial: la diseminación de exactitud de patrones altos hacia niveles medios, el desarrollo de instrumentos y procesos de medida dedicados a la industria, la calibración de instrumentos y máquinas para propósitos de medición, verificación, fabricación, el ensamble o el comercio; atendiendo principalmente los aspectos de intercambiabilidad de partes y funcionalidad de objetos, o de calidad de bienes y servicios (materias primas, electricidad, gas, comunicaciones, etc.) Puede extenderse este concepto para abarcar la Metrología Clínica, en cuanto que una sociedad requiere de la multiplicación de instrumentos clínicos, de sus sustancias de referencia, de procesos de calibración, y de procesos de empleo masivo (baumanómetros, termómetros, sustancias patrón, etc.), a fin de garantizar la calidad de bienes o servicios que con ellos se presten. Realizan metrología industrial principalmente centros de diseño y desarrollo, industrias de transformación, industria alimentaria e industria farmacéutica. En México hacen metrología industrial las industrias, centros de investigación orientados a la industria y el CENAM para áreas específicas

1.2.1.3 Es objeto de la metrología legal: la diseminación de exactitud de medidas hacia niveles básico y doméstico, y la adopción de principios y procesos de medida que los hagan posibles, el establecimiento de normas, límites, niveles o cantidades físicas o químicas en aspectos de la salud o de comercio, la adopción, emisión e interpretación de normas de medida incluidos el lenguaje metrológico público, y la intervención en la concertación de límites, niveles o cantidades que establecen los gobiernos en aspectos de comercio, comunicaciones, territorialidad, y demás aspectos de derecho internacional, en función de su soberanía, y en general los aspectos de medida que puedan tener consecuencias de ley. Realizan metrología legal principalmente los poderes legislativos, los organismos de pesas y medidas, ocasionalmente los expertos en materias o áreas específicas, y las cámaras industriales o de comercio en calidad de órganos de consulta; por otra parte como actores en el mercado de bienes o servicios, cualquier persona física o moral puede hacer metrología legal

Adicionalmente hacen metrología legal los organismos privados nacionales e internacionales dedicados a la normatividad voluntaria, como ASTM, ISO, IMNC, en el sentido de que sus normas técnicas o de comercio pueden ser acordadas libremente por actores comerciales, con consecuencias de ley. En México, el CENAM representa al estado mexicano en foros internacionales de metrología legal (BIPM)

1.2.1.4 Relaciones entre áreas metrológicas. En la actividad metrológica existen relaciones entre esos campos, así los gobiernos que realizan metrología legal, depositan legalmente las atribuciones de representación internacional en aspectos de medida, en sus metrólogos científicos; por otra parte empresas dedicadas a la metrología industrial como Carl Zeiss, Hewlett Packard o la SIP, realizan investigación para desarrollar nuevos instrumentos, con los que equipan a laboratorios primarios dedicados principalmente a la metrología científica. Implicaciones adicionales a las científicas, legales e industriales, hacen de la metrología una ciencia polémica al interferir con estrategias nacionales, cuestiones militares, o principios éticos universales, así, las investigaciones en ciencias de la tierra pueden demandar ensayos a nivel global, los mapeos cartográficos por satélite pueden prestarse o ser interpretados como espionaje, o la tentación por evaluar nuevas tecnologías puede llevar a ensayos no consentidos en el ser humano (efectos de radiaciones, ingeniería genética en embriones, en fetos o en infantes) [1], [2].

1.2.2 Contexto tecnológico nacional de esta investigación.

El área de metrología tridimensional en nuestro país ha estado abandonada por el reciente arribo de instrumentos 3D, por su costo, por su tecnología y aplicaciones, llegando a producir situaciones como: a) los propietarios de marcas y tecnologías extranjeras, consideran como de su propiedad industrial e intelectual, las rutinas y procesos de medida 3D necesarias para el control de calidad de sus productos; dando a conocer a los responsables de procesos sólo las rutinas que han de emplear, ocultándoles cualquier información de tipo matemática o física en que se basen, b) la ignorancia de los ingenieros o responsables mexicanos en el área es extrema, y la disposición de expertos en normas y procesos de calibración 3D es casi inexistente, llegándose al extremo del retiro del CENAM en foros internacionales de medidas y normalización 3D, por carencia de expertos, c) no existen en los planes de estudio de ciencias e ingeniería mexicanas, currícula que formen sólidamente a nuestros profesionales en el campo metrológico

Por otra parte, dentro de los antecedentes de asimilación y desarrollo de tecnologías de instrumentación multidimensional, cabe señalar que a) El Centro de Instrumentos de la UNAM desarrolló una máquina de medir por coordenadas (1986-1989), ha obtenido el aval oficial y hasta hoy es el único, para medir y calibrar objetos 3D y máquinas de coordenadas, ha participado activamente en diversos foros del tema, principalmente científicos y de certificación (SNC, EMA, IMEKO); que es representante por México ante el foro internacional científico de metrología (IMEKO); y que es el único que participa regularmente en los foros científicos del área, b) El Instituto de Astronomía de la UNAM ha desarrollado telescopios desde 1972,

siendo este instrumento un caso típico de instrumento multieje de tipo polar. c) El CINVESTAV y el Instituto de Materiales de la UNAM, así como otros centros de investigación nacionales han desarrollado partes de instrumentos y procesos de medida 3D en el campo de la nanotecnología, d) el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) en Guanajuato, ha desarrollado procesos de medida 3D industriales basados en óptica, donde la exactitud está comprometida, e) el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) actualmente desarrolla un telescopio de grandes proporciones e instrumentación de apoyo, donde la alta exactitud 3D está comprometida, f) la industria paraestatal ha solicitado a los centros de investigación nacionales el desarrollo de robots, manipuladores y accesorios 3D para aplicaciones peligrosas, donde la exactitud está comprometida g) La industria nacional frecuentemente hace consultas a centros de investigación nacionales para mejorar procesos, donde la exactitud 3D está comprometida, h) Finalmente en el campo clínico, el arribo de instrumentos estereotáxicos (cirugía asistida en 3D), está demandando asistencia de expertos mexicanos para desarrollos o mejoras de equipos, y para la realización de pruebas en procesos quirúrgicos, donde la exactitud 3D está comprometida.

Dentro de ambos contextos general y tecnológico nacional, se funden los tres campos básicos de la metrología en esta tesis, de tal manera que se obtiene un concepto de instrumento que modela y explica fenómenos finos de medidas 3D, presentes en viejas y nuevas generaciones de instrumentos (metrología científica); permite mejorar exactitudes en fabricación o verificación de partes (metrología industrial); y se convierte en recurso útil para dirimir controversias por resultados de medida (metrología legal) y por calificación de instrumentos. Por otra parte, desde el punto de vista del análisis empleado en este instrumento, esta investigación provee herramientas para continuar con desarrollos de nuevos instrumentos, y satisface un hueco aún vacío en la tecnología de la ingeniería de precisión.

1.2.3 Contexto institucional. En el contexto de las instituciones que respaldan este proyecto, hay que mencionar que el autor José Sánchez V trabaja en el Centro de Instrumentos UNAM, es responsable del área de metrología 3D que ya se mencionó, y que el asesor, M. I. Leopoldo González, trabaja en el Centro de Diseño Mecánico (CDM) de la Facultad de Ingeniería UNAM, donde realiza proyectos de desarrollo en robótica donde la exactitud 3D está comprometida. Ambas instituciones por lo tanto son proveedoras de experiencias e infraestructura básica para llevar a cabo la investigación, y serán receptoras inmediatas de los beneficios que de ella se deriven. Debe mencionarse además la potencial utilidad que este proyecto tiene en los campos docente e industrial, a través de la Facultad de Ingeniería como formadora de profesionales, a través del CDM como consultores, y a través del Centro de Instrumentos en los sistemas de certificación y calibración ya mencionados.

1.3 ARRIVO DEL CONCEPTO DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

1.3.1 Nacimiento del concepto de instrumentación virtual. La evolución de los conceptos de instrumentación metrológica física a instrumentación metrológica por modelos o definiciones, se remonta al nacimiento mismo del patrón de longitud “metro”, que sustituye el

valor de referencia (pie) de esta magnitud basada en las dimensiones humanas, por el valor “fijo” de otros valores de referencia como el perímetro de la tierra. La inestabilidad del patrón físico por envejecimiento de materiales o por variaciones de temperatura, llevo a la predicción de su comportamiento por modelos. En la búsqueda de su exactitud se redefinió por longitud de onda de la radiación de gases excitados, y se volvió a redefinir por recorrido de la luz en un intervalo de tiempo (1985). El concepto “metro” evolucionó de patrones materiales, a fenómenos físicos y modelos que los describen. Se puede decir entonces que el **“metro primario” actual es un “instrumento virtual”** que no existe físicamente, pero que se le reproduce a través de experimentos y correlaciones entre mediciones ópticas y de tiempo, que se enuncian en su definición.

1.3.2 En metrología geométrica tridimensional, el concepto es relativamente nuevo, y nació del análisis del comportamiento de instrumentos. Particularizando el análisis a la MMC, este instrumento posee tres escalas y cuatro cuerpos que se mueven formando cadenas cinemáticas de dos o tres pasos, donde las imperfecciones de cuerpos y escalas se combinan produciendo 21 (veintiuno) errores fuente considerados independientes; sin contar aquellos que se originan en los ensambles, ni los que se originan por efectos dinámicos. Dichas fuentes de error sin embargo, se combinarán para producir errores en sólo tres dimensiones. El comportamiento de estos instrumentos, u otros más simples (máquinas de longitud, mesas x , y , proyectores de perfiles), no ha sido plenamente comprendido por los usuarios de dichos instrumentos, por organismos certificadores privados, ni aún por importantes laboratorios de referencia de países latinoamericanos, asiáticos y africanos.

Los temas de universalidad de medidas, trazabilidad y normalización en metrología 3D, están animados de controversia, a grado tal que no ha sido posible unificar criterios normativos en el interior de la comunidad europea, ni entre esta comunidad y los laboratorios primarios de Asia y América. Algunos organismos como **DKD y PTB en Alemania, Gustavo Colonnetti en Italia, Universidad de Eindhoven en Holanda entre otros, han introducido ya sus conceptos de “instrumentación virtual”** para deshacer tal controversia, y promueven su adopción [3], [4], [5]. Consisten tales “instrumentos virtuales, en algunos de los siguientes recursos: modelos matemáticos descriptivos de errores fuente, de su propagación, modelos representativos de los sólidos constituyentes del instrumento, modelos representativos del comportamiento dinámico del instrumento y de objetos a medir, rutinas representativas de procesos de medición, sistemas expertos de medición o diagnóstico de partes, etc. En la búsqueda de exactitud, otros grupos de esos y otros organismos se han dedicado al perfeccionamiento de modelos que incluyen lazos de control, redes neuronales y recursos de visión, con una tendencia unificadora de recursos, cuyo resultado es un ambiente computacional gráfico interactivo. Existe además la tendencia de fabricantes de instrumentos a integrar ayudas gráficas para asistir a los usuarios en las tareas de medición aunque desligadas de la exactitud, llamadas también recursos virtuales.

1.3.2.1 Características de un instrumento virtual en metrología tridimensional. Para propósitos de este proyecto, puede definirse a la INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL como.

“el conjunto de modelos matemáticos y en su caso métodos de solución, bases de datos, interfaces, primitivas CAD, ambientes de animación, que representan el comportamiento de instrumentos multicoordenada potencialmente reales, con alguno de los propósitos siguientes:

Facilitar el entendimiento de fenómenos de error 3D, en el seno del volumen de medición, ya sea como producto de errores más elementales, ya sea como una práctica defectuosa de medición.

Que permitan corregir medidas a fin de mejorar exactitudes.

Que permitan diagnosticar errores fuente de instrumentos o sus equivalentes, y en su caso corregirlos.

Que faciliten el diseño y enseñanza de protocolos de medición.

Que permitan poner a prueba procesos de medición, procesos de calibración nuevos o ya normalizados, o convertir resultados de un proceso de calibración en otro.

1.4 OBJETIVOS DE ESTA INVESTIGACIÓN

Atendiendo a la oportunidad y necesidad de atender las demandas pedagógicas, industriales, tecnológicas y legales de la metrología tridimensional; al desarrollo del estado del arte en instrumentación multiteje física y virtual, y a la vocación de las instituciones que soportan este proyecto, se eligen como objetivos de esta línea de investigación

1.4.1 Dar a conocer la importancia histórica, teórica, industrial, científica y legal de la metrología e instrumentación física y virtual multiteje, principalmente la tridimensional ortogonal.

1.4.2 Dar a conocer los aspectos principales de diseño y de operación de instrumentos multiteje que influyen en su exactitud, y las tendencias tecnológicas.

1.4.3 Hacer un análisis de la manera como afectan las variables de exactitud de instrumentos en diversos campos y aplicaciones; resaltando principalmente la utilidad y necesidad de desarrollar el recurso de la instrumentación virtual.

1.4.4 Revisar y analizar los instrumentos virtuales principales, y proponer uno propio que satisfaga:

1.4.4.1 las expectativas de oferta de poblaciones de medidas potencialmente reales,

1.4.4.2 posibilidades de correlación directa entre valores medidos y valores patrón,

1.4.4.3 posibilidades de representación de errores y constituyentes del instrumento para fines de disolución de controversias por calificación de instrumentos,

1.4.4.4 diagnosticar errores fuente de instrumentos por pruebas simples, incluyendo fenómenos de Abbe.

1.4.4 Evaluar el instrumento virtual propio, y si es el caso estimar nuevas bondades o aplicaciones.

1.5 PLAN DE PRESENTACION DE ESTA TESIS

1.5.1 En el capítulo primero que concluye, se pretendió establecer una panorámica general del espacio científico, legal e industrial en que el instrumento virtual es requerido, de su arribo en ese mismo espacio, del significado de instrumentación virtual, de los propósitos generales de esta investigación, y actualmente de su plan de presentación

1.5.2 El capítulo segundo es fundamentalmente pedagógico e introductorio, sobre la evolución de exactitud de instrumentos geométricos y el análisis de principios físicos en que se basaron, procurando resaltar los más sobresalientes o desconocidos en el contexto de la ingeniería de precisión. Como continuación de este análisis, se revisarán configuraciones, componentes de instrumentos, y fenómenos dinámicos que afectan la exactitud

1.5.3 En el capítulo tercero se hará un análisis profundo de los errores presentes en un instrumento multieje, de las distintas maneras como éstos afectan a las mediciones, y a los procesos de control de calidad, de las controversias para dar validez universal a las medidas; y de las limitaciones y controversias que surgen de la aplicación de procesos normalizados para calificación de instrumentos. **La necesidad de recurrir a instrumentos virtuales para explicar y superar los fenómenos de error, surge como conclusión de este capítulo.**

1.5.4 En el capítulo cuarto se analizan dos modelos de error considerados de valides universal, partiendo de la premisa que la virtud principal de un instrumento virtual es la modelación de sus errores. Como resultado del análisis y su crítica, **se propone un modelo propio 2D que supera deficiencias de los modelos analizados**

En este capítulo se presenta una **interface numérica gráfica** que permite exportar e importar a través de archivos * DXF datos y estados del instrumento Parte importante de este capítulo está dedicado a demostrar su viabilidad como instrumento real, cuya ventaja inmediata es la disolución de controversias por la calificación de instrumentos, ya que se obtiene la representación por sólidos del instrumento deforme, así como su exacta correlación entre lecturas y valores patrón Una vez demostrada sus bondades, se presenta su escalamiento al espacio tridimensional.

1.5.5 El capítulo quinto está dedicado al empleo y evaluación del modelo 2D propio, como dispositivo potencialmente real de obtención de medidas, a fin de establecer correlaciones **La principal virtud del instrumento es el diagnóstico reversible que incluye fenómenos de Abbe, a partir de pruebas simples en el seno del volumen de medición.**

La posibilidad de empleo de correlaciones y reversibilidad hacia espacios 3D, estaría limitada sin embargo por la ausencia de patrones densos 3D (con al menos 64 posiciones), y procesos de palpado; por lo que es necesario considerar simplificaciones basadas en fenómenos 2D y 2½D, que son resueltas por procesos similares a los descritos en la primera parte del capítulo.

1.5.6 El capítulo sexto finalmente, presenta un balance de objetivos y resultados obtenidos, para establecer finalmente las conclusiones.

1.5.7 El Apéndice A, glosario de términos, se ha incluido persiguiendo dos propósitos, el de evitar la definición de cada nuevo término que se emplea en el desarrollo de este documento, así como proveer la información útil de acrónimos y siglas empleados en la jerga metrológica no comunes en otras áreas de la ingeniería.

1.5.8 El apéndice B, Discusión de los principales procesos normalizados de calibración y verificación de máquinas de coordenadas, y de procesos normalizados que gozan de prestigio, se ha incluido porque en el ámbito industrial y de enseñanza se considera equivocadamente que tales normas proveen con suficiencia los métodos de calibración de instrumentos multieje, aparentando ser intrascendente el objeto de esta investigación. Un propósito adicional de este apéndice es el de orientar sobre los ensayos y dispositivos más comunes empleados en el diagnóstico de instrumentos.

1.5.9 El apéndice C, descripción de segmentos de programa y comandos principales, se ha incluido como prueba parcial de originalidad, así como para completar la ambientación del espacio computacional en que sus programas se instalan y operan.

1.5.10 El apéndice D, recopilación de investigaciones afines, presenta parte de los objetivos de esta investigación, consistente en el conocimiento del estado del arte en el tema, así mismo, permite percibir las tendencias de instrumentación física y virtual que permiten orientar futuras investigaciones o los siguientes pasos de la presente.

1.6 REFERENCIAS

- 1 LOS COBAYAS HUMANOS DEL PLUTONIO, Robert Bell, Mundo Científico N 115, Vol 15, 310-315
- 2 Impure Science Robert Bell Jhon Wiley & Sons 1992
- 3 Traceability of Coordinate Measurement According to the Virtual CMM Concept Hártig F et al 5 th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology Oct 1995, Zaragoza Spain 245-253
- 4 A method for the Identification and correction of Thermal Deformation in 3D CMMs Cresto P C. et al. Measurement V 9, N1 38-43

- 5 Modeling the errors of multi-axis machines. a general methodology Sons J A Et al. Precision Engineering. Jan 1992 V 14, N 1 5-18
- 6 Foundations of Mechanical Accuracy Wayne R Moore The Moore Special Tool Company 1970
- 7 Bernard Ribémont La Edad Media y la Simbología de los Números Mundo Científico, N 161, V 15, 1995 pp 816 - 821.
- 8 Bernard Ribémont La Revolución Aritmética de la Edad Media Mundo Científico, N 161, V 15, 1995 pp 822 - 828
- 9 GPS for Land Surveyors, Jan Van Sickle Ann Arbor Press Inc. Chelsea Michigan 1996, ISBN 1-57504-041-7

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES.

EVOLUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA Y DE SU EXACTITUD.

ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN INSTRUMENTO MULTIEJE, ARQUITECTURA, SENSORES, ACTUADORES.

FENÓMENOS DINÁMICOS, Y CADENAS DE CONTROL INVOLUCRADOS EN LA EXACTITUD DE UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

2. ANTECEDENTES

2.1 EVOLUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA Y DE SU EXACTITUD

2.1.1 Medidas Antiguas

Es de suponer que los estándares de medida, principalmente de longitud y masa, hayan arribado a la historia con la aparición misma de las civilizaciones, pues las necesidades de trueque o comercio en sus formas más elementales lo requirieron, así como el acoplamiento de los objetos e instrumentos más elementales a las proporciones humanas. Entre las reliquias más antiguas rescatadas se encuentran un conjunto de masas y escala que Perry [1], considera pertenecieron a civilizaciones prehistóricas hindúes (más de 9000 años), que no se han podido fechar exactamente. Ver figura 2.1. Perry estima que los antiguos sistemas de medidas egipcios están basados en los hindúes, de los que ya se cuentan masas y balanzas a 7000 años antes de Cristo. Ver figura 2.2.

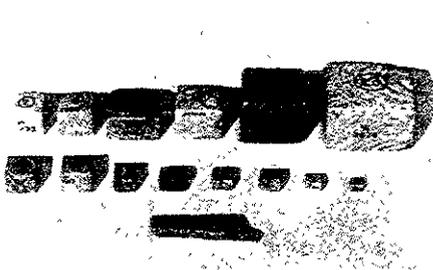


Figura 2.1. Pesas de piedra hindúes, se les atribuyen 9000 años.

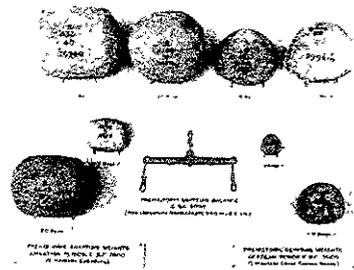


Figura 2.2. Pesas egipcias y balanza. Se les atribuyen 7000 años.

2.1.2 Edad Media y Renacimiento

En el contexto de este resumen, referirse a la Edad Media no es desconocer el progreso que la ciencia de la medida tuvo fuera de Europa, sino que se considera que en el resto del mundo la evolución de la metrología fue similar o menor. Efectivamente, después de la caída del Imperio Romano, mucho del patrimonio científico y cultural de la humanidad fue perdido, rescatado en parte, y redescubierto por la sociedad teocéntrica europea (Iglesia Católica, monasterios y universidades escolásticas); es en este periodo que las matemáticas son tomadas inicialmente en sentido mágico, posteriormente dan un impulso a la astronomía como ciencia ligada a Dios, para luego dar lugar a otras aplicaciones como la arquitectura e ingeniería medievales, y finalmente toman su valor científico en las primeras universidades [3]. Se considera relevante la lectura de "Los Números", misma referencia

Fue en el Renacimiento en los 1500's, cuando la cultura homocéntrica retoma las proporciones humanas convirtiéndolas en la referencia de medida, y como base de numeración. Ver figura 2.7. Así las relaciones 1:5, 1:10 (números de dedos de mano y de dos manos) son tomadas como ideales; después se asoció al 6, y al 16 los mismos atributos de perfección, así cubito tiene 6 palmas, el pie es la sexta parte de la altura del hombre, y un pie tiene 16 dedos de longitud. Similares relaciones encontramos en las medidas Náhuatl con el *cématl* o distancia del hombro al dedo índice

Aparte de la importancia científica, artística y filosófica del renacimiento, en este período se generan ideas tecnológicas que guiarán los siguientes pasos de las ciencias de la medida.



Figura 2.7. Canon de las proporciones humanas. Da Vinci, 1500.

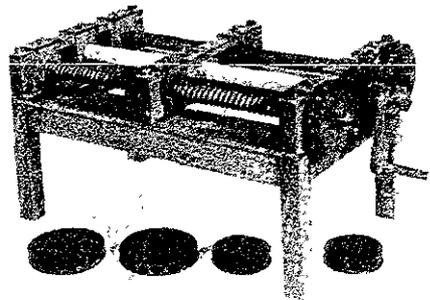


Figura 2.8. Torno de roscas de pasos variables por combinaciones de ruedas dentadas. Construido con bosquejo de Da Vinci.

En la figura 2.8 podemos observar un "torno" generador de tornillos de diferentes pasos, por la combinación de ruedas dentadas, reconstruido a partir de bosquejos dibujados por Leonardo Da Vinci (1500)

Desde el punto de vista de sus contribuciones a la metrología geométrica, el torno de roscas de Da Vinci trasciende porque a) emplea la conversión de movimientos angular-lineal para obtener sub-incrementos de longitud de manera casi-continua, usando el principio de subdivisión del círculo; b) Los principios de *periodicidad* de tornillo y ruedas dentadas pueden ser explotados a fin de incrementar exactitud en subsiguientes generaciones de tornillos. A partir de este momento, el tornillo, el círculo y sus subdivisiones, se convirtieron en los recursos de la exactitud geométrica por excelencia

Los principios a) y b) mencionados, se formalizarían mas tarde bajo el concepto de "*métodos de medición combinatorios en series cerradas*", que permitirían obtener mediante relaciones simples y magnitudes conocidas, valores de magnitudes sub-sub-decimales, determinadas por números racionales y residuos; por ejemplo $(2/3)(5/7)$ de $L = 0.476190476190$ L. A este respecto cabe mencionar que este principio se utiliza para relacionar de forma "exacta", por resonadores $3f$, $5f$, $2/3f$, $5/3f$, etc., la frecuencia de fenómenos heterodinicos de luz, con patrones de tiempo, y establecer el nuevo valor del metro con más de 13 cifras significativas de exactitud.

2.1.3 Edad Moderna

No fue sino hasta la revolución industrial cuando los cambios en la tecnología de las mediciones demandaron fuertemente el incremento de exactitud en longitud y sus combinaciones, y así observamos la máquina de Chancellor (1800), que permitía medir incrementos de 0.025 mm. Ver Figura 2.9. Esta tendencia llevó finalmente a la producción de la máquina Withworth (1855), cuya discriminación era de 0.000025 mm. Ver Figura 2.10.

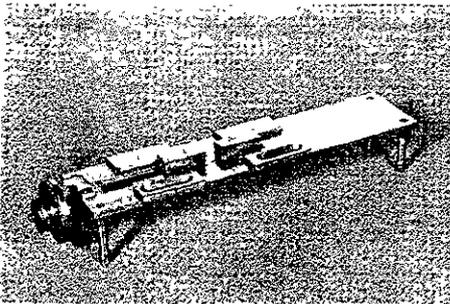


Figura 2.9. Máquina de Chancellor (1800), incluye divisores angulares.

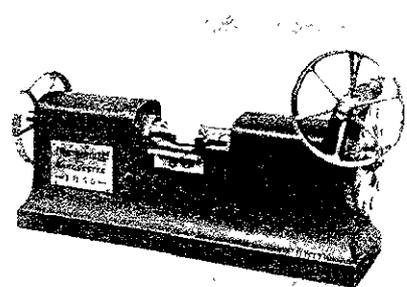


Figura 2.10. Máquina Withworth (1855), cuya discriminación era de 0.000025 mm

La demanda de intercambiabilidad de partes de esta revolución llevó a la creación del concepto de calibres, y de patrones a pasos. Ver figuras 2.11 y 2.12

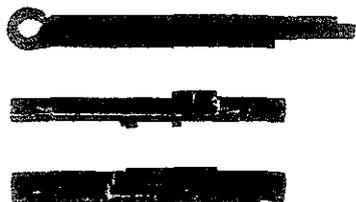
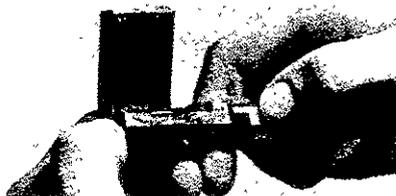


Figura 2.11. Calibres de cotas



Figuras 2.12. Empleo de calibres de cotas

Más tarde, esta tendencia de patrones a pasos llevó en 1890 a Carl Edvard Johanson a la conceptualización de conjuntos de patrones de longitud de pasos y de tamaños progresivos. Ver figuras 2.13 y 2.14. Este concepto de patrón permite obtener de una manera rápida, longitudes de referencia de muy alta exactitud, ordinariamente mejores que 0.0001 mm, por la simple combinación de diferentes prismas. Además de la versatilidad para formar arreglos de calibres en interiores y exteriores, este recurso ahorró la incertidumbre producida por cambio de dirección de desplazamiento en mecanismos de tornillo.

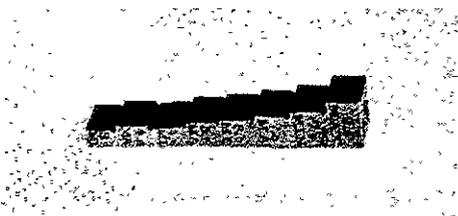


Figura 2.13. Evolución de calibre a patrón de pasos

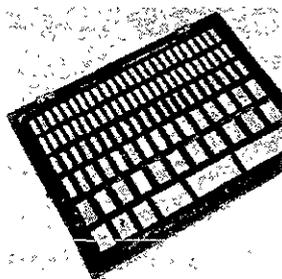


Figura 2.14. Conjunto de bloques patrón o bloques Johanson.

Finalmente, los refinamientos en la ingeniería mecánica produjeron las máquinas e instrumentos de medición de más de un eje, entre las que cabe resaltar a la máquina de coordenadas construida por Clark y Robert Moore (1896), ver figura 2.15, y a la máquina "universal" de medición considerada hasta 1975 como el instrumento patrón 3D por excelencia. Ver figura 2.16

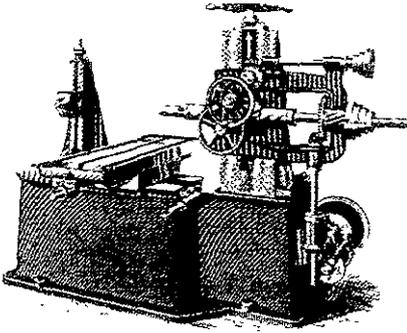


Figura 2.15 Máquina de Clark-Moore (1896) basa su exactitud en la rigidez y exactitud de partes

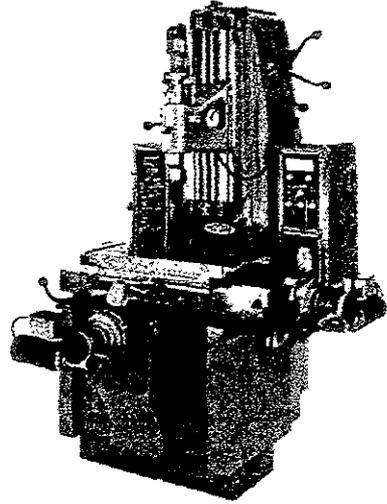


Figura 2.16 Máquina universal Moore.

Al mismo tiempo que la tecnología de instrumentos 3D evolucionaba, confluieron simultáneamente las mejoras en tecnologías de medición de: circularidad, división del ángulo, planitud, escuadría, cilindricidad, esfericidad, paralelismo de diferentes elementos geométricos, y en general relaciones geométricas entre diferentes elementos geométricos básicos (proyecciones, coaxialidad, run-out, etc) Ver figuras 2.17 y 2.18

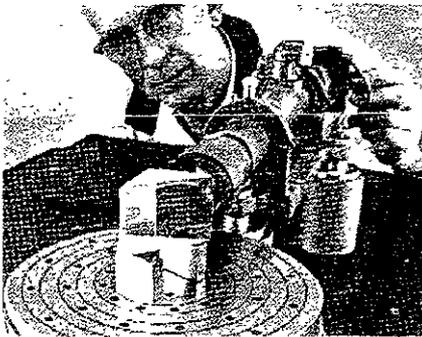


Figura 2.17. Dividiendo el círculo por pasos y continuamente.

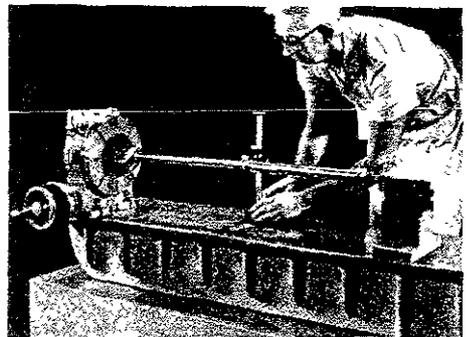


Figura 2.18. Verificación de cilindricidad (rectitud, redondez y diámetro de círculos)

2.1.4 Principios de metrología geométrica usados en la actualidad.

La evolución de instrumentos de medida geométricos tuvo que saltar el obstáculo de medir por pasos con muy alta exactitud, a la medición continua con alta velocidad y con alta exactitud, este logro se alcanza con la inclusión de los codificadores de longitud, que basan su exactitud en la densidad de trazos o subdivisiones, y en la capacidad de contar sus transiciones con recursos electrónicos. La aproximación previa a este recurso se encuentra en el vernier, que permite hacer subdivisiones de pasos por medio de escalas de comparación de diferente paso. El recurso de la subdivisión y de la comparación contra escalas de diferente paso, se puede aplicar al codificador con escalas en cuadratura. Ver figura 2.19.

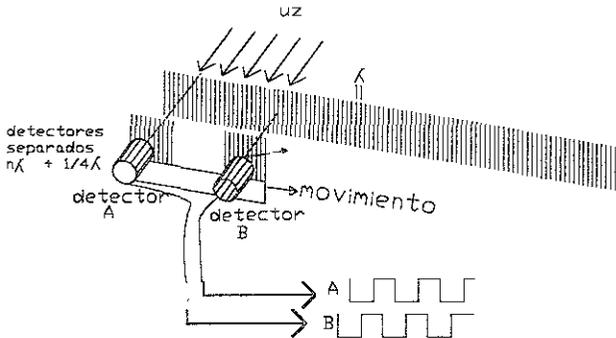


Figura 2.19. Detector digital de longitud basado en el "desplazamiento de fase de dos señales en cuadratura"

El principio que comparten ambos instrumentos es el principio de desplazamiento de fase o de cuadratura que tienen las escalas vernier y las retículas respectivamente, respecto de la escala principal (0° a 360° en los primeros, y 0° , 90° , 180° , 270° , 360° en los segundos). Al discretizar las señales se puede obtener resolución del codificador de $1/4\lambda$.

El principio de medición por desplazamiento de fase de señales en cuadratura puede emplearse conjuntamente con los fenómenos ondulatorios de propagación de la luz, ya sea que se exploten fenómenos heterodinos y principios de medición en tiempo y frecuencia, ya sea que se empleen principios de interferencia por desplazamiento de fase de haces luminosos, y el conocimiento exacto de su longitud de onda. Ver figura 2.20. Los principios empleados para medir ángulo son similares, con otras arquitecturas de espejos e interferómetros. Ya que los haces se suman provienen de la misma fuente, la suma vectorial de la luz cambiara de mínimo a máximo, cada vez que una trayectoria de luz se incrementa de la otra en $1/4\lambda$, que para el rojo es de 330 nanómetros.

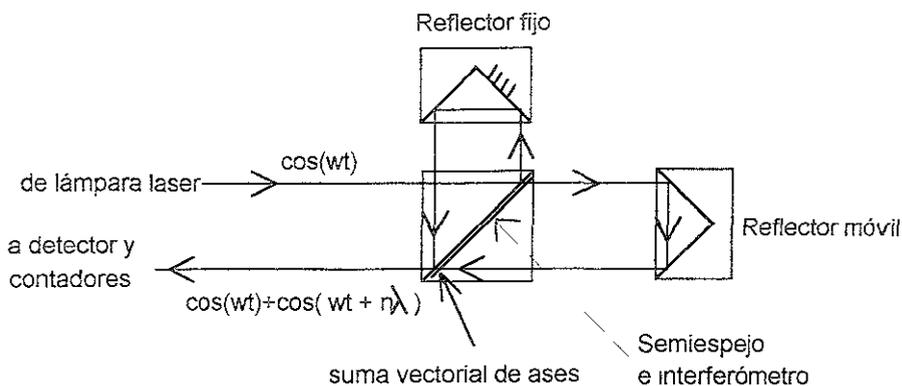


Figura 2.20. Principio de operación del interferómetro de Michelson.

Refinamientos a este experimento pueden resolver incrementos de $1/100 \lambda$, ó 3.3 nanómetros, y en ángulo incrementos de $1/130\,000\,000$ del círculo. Ver figura 2.21.

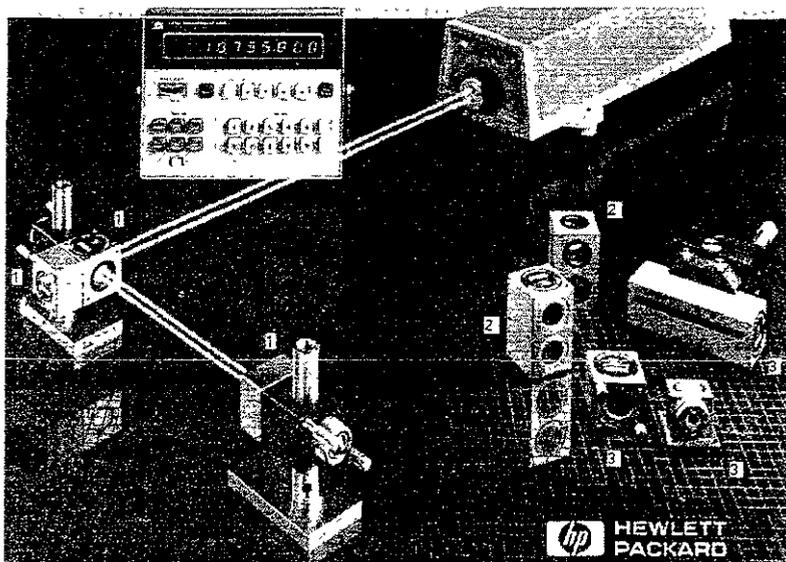


Figura 2.21 Sistema de medición Hewlett Packard, en que se muestran: arreglo de medición de longitud (1), arreglo de medición de ángulo (2), arreglo de medición longitudinal perpendicular al eje de luz (3).

Es de resaltar sin embargo, que entre las pequeñas subdivisiones del círculo, y las grandes subdivisiones, la división continua exacta sigue teniendo el problema de recurrir a divisores continuos por tornillos y coronas, o por divisores electrónicos de señales, donde la linealidad

no esta garantizada a lo largo de todo el campo de medidas. Este problema se comparte con la conversión analógica digital en sistemas electrónicos. En este mismo contexto cabe mencionar también, la enorme dificultad de producir ángulos de 10 radianes ($57\ 295\ 795\ 1472 \dots$ grados), por un proceso directo y no recurrente, lo que lleva invariablemente a un error esencial. Ambos casos de división o conteo longitudinal o angular, llevan a la conclusión de que una medida física puede compararse con valores discretos preestablecidos que son nuestra referencia, pero no se puede garantizar su absoluta linealidad en puntos intermedios, con lo que tendremos que considerar siempre una incertidumbre

Por la importancia de sus aplicaciones (edificios, aviones, barcos, grandes turbinas, etc.), e inmunidad a muchas fuentes de error, vale la pena mencionar el goniómetro de medición 3D o láser tracking, como un dispositivo que integra la medida longitudinal, medidas angulares y lazos de control, para la medición 3D. Ver figura 2.22

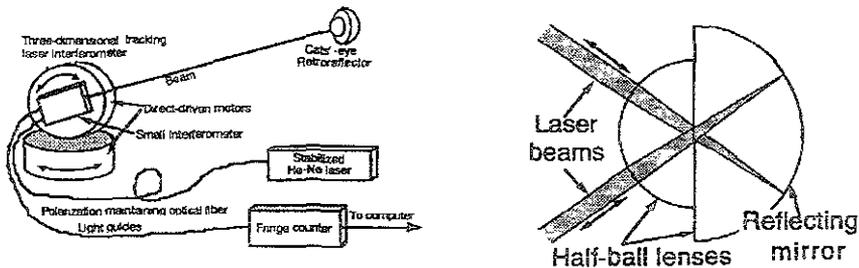


Figura 2.22. Trayectorias de luz de un sistema de medición "láser tracking"

El funcionamiento de éste esta basado en las variaciones del camino óptico de un rayo que rebota alineado, en un reflector "ojo de gato", respecto de una trayectoria de referencia o línea muerta no mostrada, en la realimentación de ganancia de señal de luz reflejada a servomotores para seguir al ojo de gato movido libremente, y en la posición angular del goniómetro, todo ello produciendo posiciones del centro del "ojo de gato" en un sistema de coordenadas esféricas. La base de datos en coordenadas esféricas del centro del "ojo de gato", pueden finalmente llevar a posiciones X, Y, Z de puntos de contacto entre esfera y objetos, por transformaciones geométricas

Por su impacto y trascendencia en el mundo de las mediciones geométricas, no puede ignorarse al sistema de posicionamiento global GPS (de **Global Position System**) [4], que funciona bajo varios de los principios comentados, entre los que cabe destacar efecto doppler de señales de referencia de satélites de triangulación 3D, de recuperación de referencias con faros terrestres, de modelación de fenómenos de propagación electromagnética, y de abundancia y filtración de datos. Según expertos, la exactitud límite a esperar de este sistema es de 2 mm en 40 000 Km de perímetro de la tierra ($5 * 10^{-14}$), en longitud, latitud y altitud, Una aplicación de este beneficio es la medición de desplazamientos de tierras, de unos milímetros por año en cientos de Km

2.2.1 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN INSTRUMENTO MULTIEJE, ARQUITECTURA, SENSORES, ACTUADORES.

En el contexto de este trabajo, se consideran **instrumentos multieje** a aquellos dispositivos que permiten efectuar **medidas en más de una dirección, o en más de un grado de libertad**; para ello es necesario que posean movimientos o modos de registro que sean “independientes”, si esto es posible. La independencia de movimientos puede tener su equivalente algebraico, donde a través de transformaciones de coordenadas puede establecerse dicha independencia, aunque en el espacio geométrico pueda existir redundancia, así en un sistema de coordenadas esféricas α, β, r , los ángulos α y β , están medidos en planos que comparten coordenadas. Otras transformaciones son posibles y serán objeto de análisis en capítulos posteriores. La **independencia de movimientos** o su transformación algebraica para el manejo independiente de parámetros se le denominará **ortogonalidad**. En general se hablará del **principio de ortogonalidad** para designar ambos: movimientos ortogonales o parámetros independientes.

La **arquitectura** de un instrumento típico ortogonal es la **Máquina de Medir por Coordenadas (en lo sucesivo MMC)**, aclarando sin embargo que comparte muchos principios de instrumentos polares como: goniómetros, telescopios, mesas divisoras de ángulo, etc., o combinaciones de ambos como robots y manipuladores.

Una MMC típica está compuesta de una mesa (no indispensable), un arreglo cinemático de cuerpos rígidos soportados en serie o paralelo que se deslizan sobre guías (o ejes en caso de instrumentos goniométricos), sensores de longitud (o ángulo en caso de instrumentos goniométricos) a lo largo de esas guías o ejes para medir los desplazamientos, y un dispositivo palpador de contacto o de proximidad con superficies de objetos, un dispositivo de conteo, y una computadora de procesamiento de alto nivel. Ver figura 2.23.

Externamente al cuerpo de la MMC se encuentran dispositivos de registro de desplazamiento, ordinariamente contadores, quienes son responsables también de esperar señales de contacto del dispositivo palpador y de enviar a sistemas inteligentes (computadoras) los vectores x, y, z , del punto palpado.

Los protocolos de medición de un objeto en particular, pueden residir en una computadora o en una base de datos, y permiten la comparación de vectores realmente palpados con los convencionalmente verdaderos, a fin de calificar la calidad geométrica de objetos. Los protocolos a su vez pueden estar soportados en modelos matemáticos de sólidos, en sus primitivas CAD o en códigos CAM.

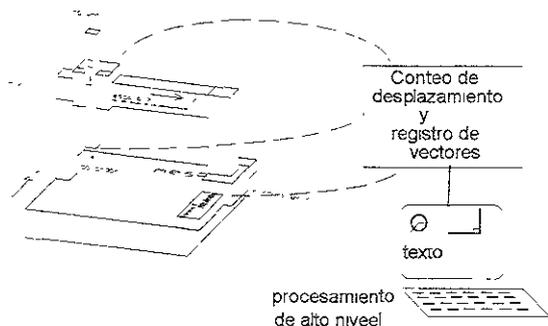


Figura 2.23. Síntesis de componentes de una Máquina de Coordenadas.

Algunos refinamientos de operación de MMCs consisten en la aproximación calculada a las superficies por servomotores NC, a fin de mantener bajo control los fenómenos dinámicos y deformaciones de los elementos cinemáticos, así como en la búsqueda interactiva de formas locales como concavidad, punto máximo, pivotes, agujeros, etc

2.2.1 Las arquitecturas más comunes de MMCs, son

2.2.1.1 De tipo portal (figura 2.24), es quizá la más extendida, limitada generalmente en medición de volumen por las dimensiones del portal, tiene precisión media, y costos medios a altos. En lo sucesivo a sus componentes básicos se les nombrarán por: **mesa, puente, carro, columna, palpador**

2.2.1.2 De mesa deslizable (Figura 2.25), el deslizamiento de la mesa en dirección “y” le permite guías muy robustas, ahorrándole masa en movimiento a la cadena cinemática carro – > columna (ejes x y z), su cadena cinemática es en paralelo con mesa (eje y) Tienen alto costo y alta precisión

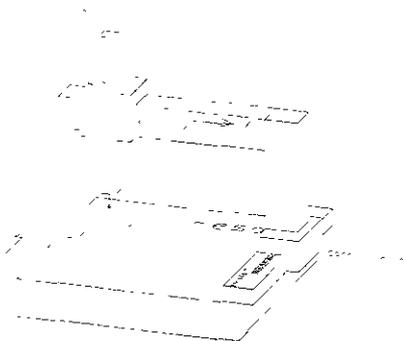


Figura 2.24. Máquina de medir por coordenadas (MMC) de tipo portal.

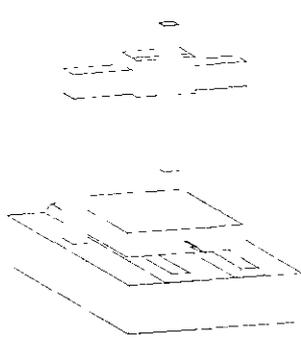


Figura 2.25. Máquina de medir por coordenadas tipo mesa deslizable.

2.2.1.3 De brazo en cantilíver (figura 2.26) Esta MMC es de precisión media-baja, permite hacer arreglos en instalaciones industriales a lo largo del eje Y , y en paralelo a ambos lados de una pista de medición; su costo es alto

2.2.1.4 De tipo goniométrico (Figura 2.27). Este tipo de máquinas no se utiliza industrialmente para alta exactitud, su uso se enfoca principalmente para la digitalización de esculturas en artes plásticas o en aplicaciones clínicas

Aparte de las mencionadas, existen combinaciones de MMCs como las que incluyen mesas divisoras de ángulo que permiten medir engranes, levas, tornillos etc. o mesas con “palpación” óptica

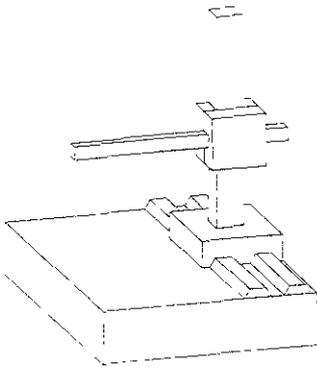


Figura 2.26 Máquina de medir por coordenadas tipo brazo en cantilíver.

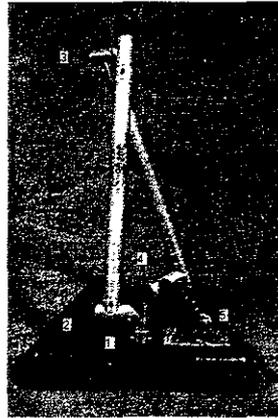


Figura 2.27 Mesa de tipo goniométrico, 1, 2, 3, 4 codificadores angulares, 5 palpador.

Como característica notable de los instrumentos “ortogonales” es necesario destacar que ninguno de ellos cumple con el **Principio de Abbe**, y que consiste en la **coaxialidad del eje de medición con el eje de las escalas**. Adicionalmente hay que añadir que la infraestructura mecánica es la principal responsable de la pérdida de exactitud de MMCs, destacando principalmente los ensambles no ortogonales de cuerpos cinemáticos, su juego (backlash), su deformaciones permanentes, y efectos inerciales

2.2.2 SENSORES

Los sensores de longitud más empleados, son de tipo óptico incremental, consistiendo éstos en reglas de vidrio con dos o más rejillas de la misma frecuencia, que producirán señales filtradas desplazadas 90 grados (ver figura 2.28). La detección puede establecerse de forma entera cada vez que se alcanza un deslizamiento de $1/4 \lambda$, pero conversiones de tipo analógico digital en la detección no filtrada, permiten distinguir incrementos de hasta $1/100 \lambda$. Aunque la densidad de rejillas actualmente puede sobrepasar a varios millares de trazos por milímetro con técnicas

holográficas, la densidad actual ordinaria es de 125 trazos por milímetro, permitiendo distinguir transiciones cada micrómetro con cuatro rejillas separadas $1/8 \lambda$, y de 0.1 micrómetros con discriminación analógica.

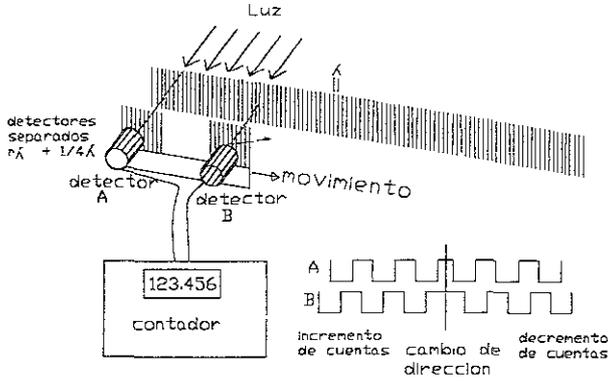


Figura 2.28. Codificador de longitud por detectores en cuadratura.

Los principios de discriminación de signo para establecer la adición, conservación o sustracción de cuentas, consiste en el empleo de estados anteriores; representando todos los estados posibles, el resumen está mostrado en la figura 2.28. Ver tabla 2.1.

Palabra A ⁻ B ⁻ A B	Operación	Palabra A- B ⁻ A B	Operación
1 0 1 1	incrementa cuenta	1 1 1 1	conserva cuenta
1 1 0 1	incrementa cuenta	1 0 1 0	conserva cuenta
0 1 0 0	incrementa cuenta	0 1 0 1	conserva cuenta
0 0 1 0	incrementa cuenta	0 0 0 0	conserva cuenta
Estados no posibles:			
1 1 1 1	decrementa cuenta	1 0 0 1	estado error
1 0 1 0	decrementa cuenta	0 1 1 0	estado error
0 1 0 1	decrementa cuenta	1 1 0 0	estado error
0 0 0 0	decrementa cuenta	0 0 1 1	estado error

Tabla 2.1. Lógica de adición sustracción en un dispositivo contador

En la operación de una MMC los estados de error de cuentas se dan ordinariamente por pérdida de cuentas debida a alta velocidad de movimientos, cuando esto ocurre se puede instruir a los sistemas inteligentes de adoptar alguna decisión de seguridad (invalidación de vectores, frenos, etc)

Los errores a que están expuestos los codificadores de longitud son:

Error de discriminación, es decir no hay validación para desplazamientos menores de $1/4 \lambda$, con lo cual las medidas tienen errores de hasta $1/4 \lambda$.

Errores de escala: estos errores consisten en que la distribución de trazos no es exacta, presentándose en la mayoría de casos como una variación proporcional por temperatura o como una variación no lineal. Errores de escala menos frecuentes consisten en la desaparición de trazos, o en variaciones abruptas entre trazos contiguos. Errores acumulados de escala llegan a ser de hasta 10λ . Otros errores atribuibles frecuentemente a los codificadores de longitud (escalas), son: desalineamientos con las guías de movimiento, y mutilación o redondeo de cifras por conversión a unidades diferentes en que fue construida la escala (pulgadas \rightarrow milímetros es el caso más frecuente).

2.2.3 ACTUADORES

Intervienen básicamente dos tipos de actuadores en MMCs: a) los **servomotores**, que permiten aproximaciones lentas para palpación, y aproximaciones rápidas entre puntos de palpación para ahorro de tiempo, y b) los **frenos** que detienen el movimiento de MMCs en condiciones de impacto inesperado, en fin de recorrido, y en posiciones intermedias para medición sobre planos predeterminados.

A pesar de la ventaja de control discreto que permiten los motores de pasos, éstos no son empleados para aplicaciones de alta exactitud, pues como se verá después, las transiciones de inicio o terminación de un paso se pueden aproximar a funciones de movimiento con aceleración infinita, lo que se traduce en deformaciones y vibraciones.

Dos criterios de **selección de servomotores** son a) **alto torque**, a fin de reducir pasos de reducción y por lo tanto de juego (backlash) y b) **alto intervalo dinámico de velocidad** (225000), es decir con intervalos de velocidades entre 0.003 mm/seg y 75 mm/seg.

A fin de obtener el intervalo dinámico de velocidades, ordinariamente se eligen motores de DC con cadenas de control de lazo cerrado a la salida de los ejes.

El empleo de servomotores para mejora de exactitud, permite repetir y perfeccionar protocolos de desplazamiento, velocidad y aceleración, donde los perfiles de deformación pueden conocerse y compensarse. Protocolos de medición por control numérico (NC) permiten además efectuar búsquedas de accidentes locales.

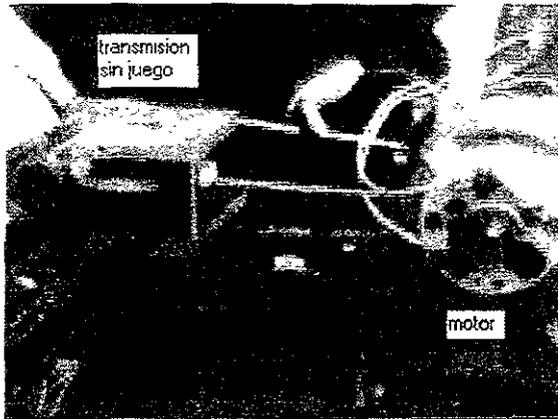


Figura 2.29. Transmisión de MMC Zeiss. Hay solamente tres componentes de reducción, banda entre motor y reductor, reductor de un paso sin juego (backlash) y banda de accionamiento en eje "Y"

Los frenos por su parte, permiten congelar posiciones para efectuar mediciones sobre planos. Sustitutos de frenos son arreglos de servomotores de acción contraria, que además de contrarrestar fuerzas externas absorben fuerzas espúreas por fenómenos dinámicos internos. Hacen también la función de frenos los actuadores contrarios, resortes y pesas que producen precarga.



Figura 2.30. Freno de movimiento "Y" accionado contrariamente con balero neumático inferior en máquina Zeiss.

El modelado de la interacción de actuadores con el resto de las cadenas cinemáticas es el principal responsable de la exactitud de los instrumentos actuales, y los modelos dinámicos de su comportamiento son objeto de secreto industrial de fabricantes de MMCs

Actuadores adicionales se están desarrollando (piezoeléctricos) para propósitos dinámicos de alta frecuencia o de muy pequeños desplazamientos [5]

2.3 FENOMENOS DINAMICOS

El análisis de los fenómenos dinámicos que ocurren en un instrumento multieje es objeto de investigaciones en diseño de maquinaria y vehículos, micromecánica, mecánica de precisión, robótica, nanotecnología, etc. Consideraciones de este campo mayor tienen que ser analizadas en nuestro instrumento como responsables de parte de la pérdida de exactitud sin ser exhaustivas, ni el objeto principal de esta investigación.

Se pueden mencionar los siguientes efectos dinámicos que afectan el comportamiento de una MMC, que se presentan de menor a mayor complejidad.

2.3.1 Juego (backlash). Es el contribuyente principal de la histéresis. Se presenta en máquinas con guías y correderas mecánicas, por la presencia de reductores de velocidad, por efectos de esfuerzos débiles no liberados (fricción), o por ensambles que no respetan principios de mínimas restricciones. Se corrige en parte si se incluyen algoritmos de compensación por dirección de movimiento.

2.3.2 Distorsión térmica La distorsión de los elementos cinemáticos (mesa, puente, carro, columna) por dilatación térmica; se considera un fenómeno dinámico al ser continuamente variable para espacios no controlados, y porque en algunos modelos de comportamiento se le puede asociar con otras deformaciones de origen dinámico [6]

2.3.3 Deformación elástica. Es la deformación que ocurre por la aplicación de fuerzas para el movimiento. En modelos simples se representa por elementos elásticos unidimensionales, masas concentradas, y fuerzas de actuación constantes, por la segunda ley de Newton y la ley de Hooke, en modelos más complejos requiere de modelado multidimensional (elementos finitos).

2.3.4 Deformación plástica. Es la deformación de tipo no lineal por efectos de desplazamiento, velocidad, y aceleración, que ocurre en elementos de tipo plástico como reductores, bujes, grasa en mecanismos. Es difícil de predecir, y es un componente principal de los errores de histéresis. Varias investigaciones se han concentrado en la modelación de este fenómeno.

2.3.5 Deformación por vibraciones. Son deformaciones transitorias por vibraciones transmitidas a través de piso o internamente por la actuación de motores, reductores y efectos de rodadura. Aunque estas deformaciones son de la misma naturaleza que las deformaciones elásticas y plásticas, requieren para su análisis de la modelación de sus elementos cinemáticos como osciladores acoplados o como líneas de transmisión. Investigaciones en este tipo de efectos han llevado a la sustitución de cojinetes mecánicos por cojinetes neumáticos, al retorno

de cojinetes mecánicos, a modelación de efectos de rugosidad de partes, a la modelación de turbulencia de lubricantes o aire en interfaces de ensamble [7], al diseño de bujes porosos

2.4 CADENAS DE CONTROL DE INSTRUMENTOS MULTIEJE

2.4.1 Lazo abierto. Este tipo de control se emplea en máquinas CNC y se asume que las deformaciones son despreciables. Se asocia un desplazamiento por n impulsos de motores de pasos en el espacio articular. Es necesario señalar que este tipo de control no absorbe ninguno de los errores mencionados previamente.

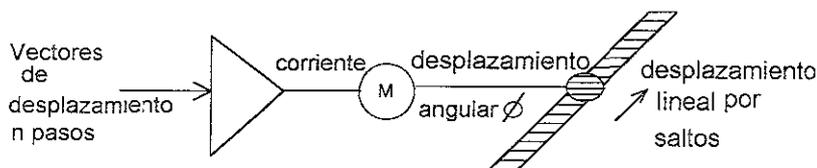


Figura 2.31 Lazo de control abierto en máquinas CNC.

Existe un caso particular en lazo abierto, pero en realidad de realimentación humana, u **operado manualmente**; ya sea que se empuja directamente sobre puente, carro y columna, ya operados por mecanismos ya operados por joy sticks, en todos ellos la posición alcanzada depende de la sensibilidad o experiencia del operador. Dentro de estos casos tendremos lazos de control abiertos o cerrados dependiendo de las técnicas empleadas para alcanzar posiciones, así se puede alcanzar una posición de referencia con poco error si se incluyen palpadores, topes, lámparas o amperímetros que anuncian contacto eléctrico, etc. En general no se tendrá control en deformaciones finas durante el período de desplazamiento.

2.4.2.1 Lazo cerrado con señal de codificadores de longitud. Dentro de esta categoría se encuentran varios modos de control, siendo los más empleados los siguientes

2.4.2.2 Control proporcional realimentado con la señal que proporcionan los codificadores de longitud. Permite absorber en parte los errores de backlash, deformaciones térmicas cuando se emplean escalas inmunes a temperatura, e histéresis

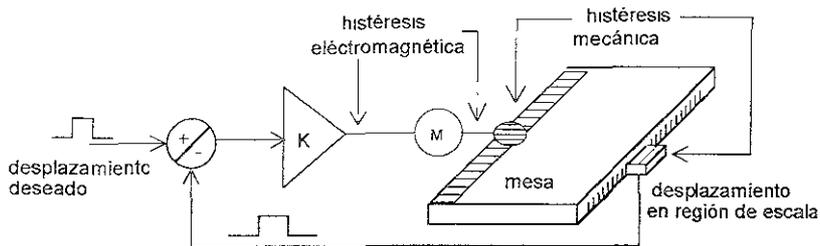


Figura 2.32 control de lazo cerrado en escalas.

Todas estas deformaciones son absorbidas en la región de localización de escalas, pero como se refirió al inicio de este capítulo, al no satisfacer el principio de Abbe (coaxialidad de eje de medición y eje de escalas), las deformaciones producidas en el resto de elementos quedarán fuera de control

2.4.2.3 Control proporcional integral El diagrama de este control es similar al anterior, excepto que la constante del amplificador k , debería multiplicarse por la constante de tiempo t . Este tipo de control permite igualar las cuentas de entrada y salida, cuando no se rebasa el umbral de desplazamiento del sistema. Esta situación se presenta por juegos, histéresis, deformaciones elástico-plásticas. Dado que se rompe con el principio de Abbe, puede producir una sobrecompensación. Es importante señalar, que los efectos de cabeceo no quedan eliminados, sobre todo en los cuerpos que continúan la cadena cinemática

2.4.2.4 Control de perfil trapezoidal en velocidad on-off Este tipo de control tiene curvas predefinidas de velocidad, y se considera cerrado pues desencadena acciones de retorno una vez que se registra la palpación. Se presuponen bajas deformaciones bajo operación de baja velocidad, por lo que se eligen dos velocidades; de aproximación y de palpación. Requiere de un plan previo aproximado de palpaciones

Como en casos anteriores, no controla los efectos de backlash, ni los efectos de cabeceo asociados, pero minimiza los efectos de deformación por velocidad (resistencia a la rodadura, resistencias plásticas). Es importante anotar que la aplicación de fuerza no cesa y es necesaria para mantener la velocidad. Ver figuras 2.33, 2.34.

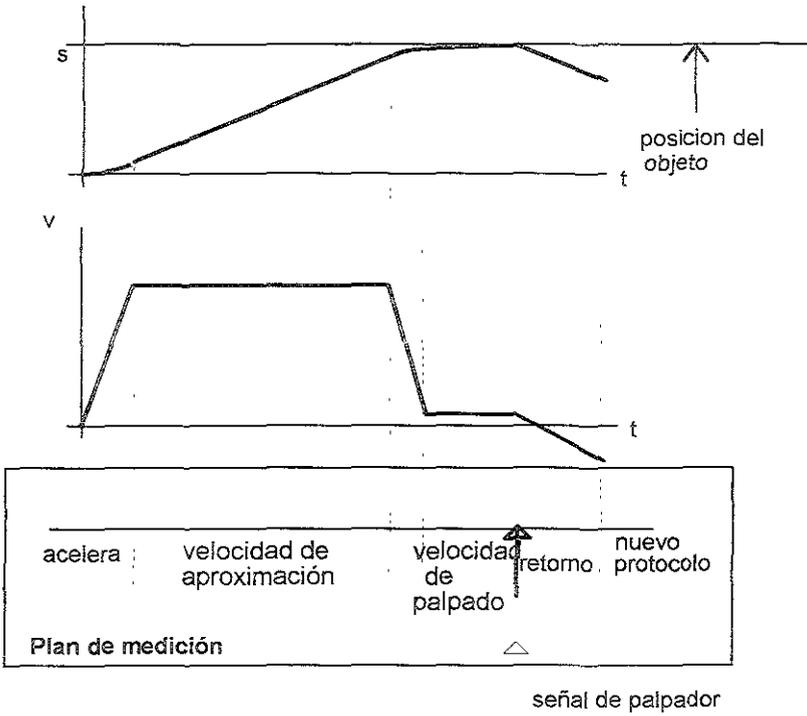


Figura 2.33. Control de perfil trapezoidal en velocidad on-off.

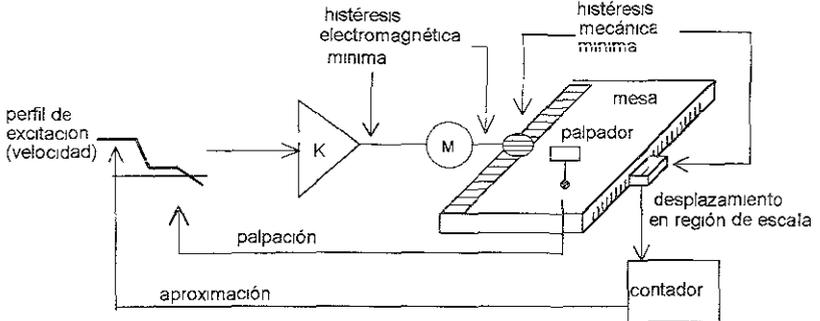


Figura 2.34. La lógica de operación, el contador permite definir los perfiles de aproximación, y del palpador define el retorno.

2.4.2.5 Control de velocidad con perfil trapezoidal con retorno. Este modo de control igual que el anterior, se basa en la minimización de deformaciones minimizando excitación de motores al momento de la palpación. La diferencia de este perfil es que al detectarse la palpación, se desencadena el perfil de aceleración y velocidades 4 \rightarrow 5, observándose que al momento del nuevo cierre de contactos no hay aceleración y esta retornando por inercia. En ausencia de excitación de motores la deformación elástica de mecanismos es inexistente, la deformación viscosa desaparece al no restituirse el amortiguamiento (observar el perfil de velocidad 4 \rightarrow 7), el backlash se minimiza, al aplicar el escalón de aceleración en 5. Zeiss afirma aplicar este modo de control en las máquinas de nivel laboratorio

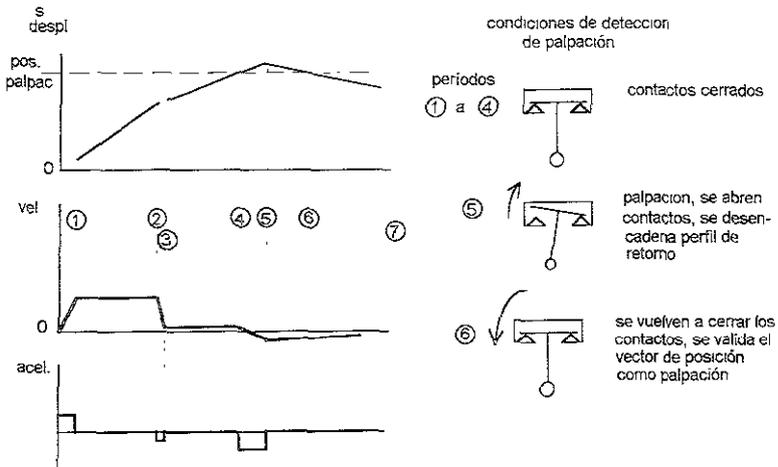


Figura 2.35. Control de perfil trapezoidal en velocidad.

2.4.2.6 Control de perfiles trapezoidales de velocidad y compensación por modelos de predicción. Este modo de control puede emplear los perfiles de excitación cero o excitación baja en motores descritas, pero basa su exactitud en el empleo de modelos de corrección basados en las características mecánicas, historia de operación, condiciones de temperatura, historia de calibraciones. Ver figura 2.36. Los modelos empleados en la predicción de deformaciones, según la literatura publicada, se basan básicamente en redes neuronales [8], en predicciones de deformación térmica por elementos finitos, o en polinomios entrada (dirección y movimiento por eje) y para cada eje, 18 polinomios en total

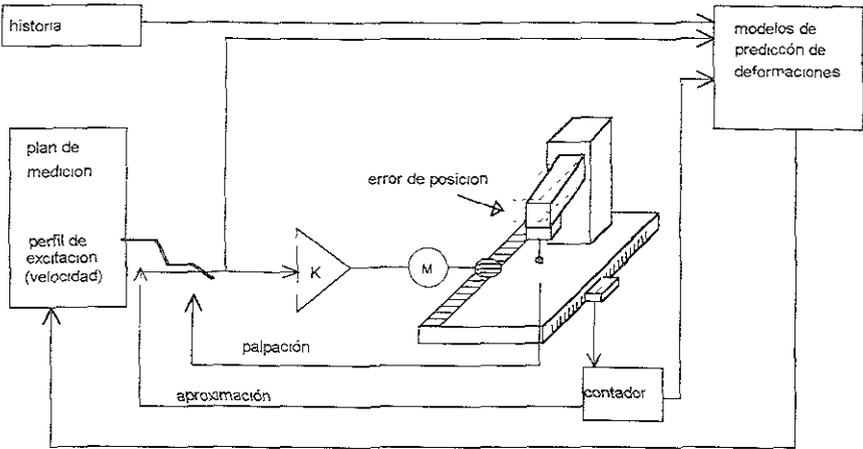


Figura 2.36. Control de perfil trapezoidal en velocidad, y corrección de posición por modelos de predicción.

2.5 REFERENCIAS:

- 1 Foundations of Mechanical Accuracy. Wayne R. Moore. The Moore Special Tool Company 1970
- 2 Bernard Ribémont La Edad Media y la Simbología de los Números. Mundo Científico, N. 161, V 15, 1995. pp 816 - 821 La Revolución Aritmética de la Edad Media Mundo Científico, N 161, V 15, 1995 pp 822 - 828
- 4 GPS for Land Surveyors, Jan Van Sickle Ann Arbor Press Inc Chelesa Michigan 1996, ISBN 1-57504-041-7
- 5 R Bansevicius, et al Active error compensation for precise machines IMEKO 2000, XVI World Congress Proceedings
- 6 P S Lingard, et al Temperature perturbation effects in high precision CMM Precision Engineering Jan 1991, Vol 13, N 1 41 - 51
- 7 Dong-chul Han, et al A study on the characteristics of external pressurized air bearings Precision Engineering, July 1994, Vol 16, N 3, 164-174
8. Narayan Srinvasa, et al Prediction of positional errors of a three axis machine tool using a neural network Symposium on Flexible Automation, ASME Japan -USA. 1992 203 - 209

CAPÍTULO III

ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES DE UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

PAPEL QUE JUEGAN LAS VARIABLES DE EXACTITUD EN LOS PROCESOS DE CONTROL DE CALIDAD, EN LOS PROCESOS DE VALIDACIÓN UNIVERSAL DE MEDIDAS, EN LOS PROCESOS DE CALIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS, Y UTILIDAD DEL INSTRUMENTO VIRTUAL.

3.1 ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES EN UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

3.1.1 Consideraciones Generales.

Ordinariamente la exactitud de instrumentos de medición no se discute, y además ordinariamente las tareas de verificación del comportamiento de la MMCs están fuera del alcance de los operadores; estas situaciones parten la mayoría de las veces del desconocimiento o dificultad para distinguir exactitud y discriminación, y otras veces del mito que la exactitud es un atributo inverificable con pruebas sencillas y que sólo los expertos con instrumentos sofisticados pueden realizar.

Sin embargo aunque escasos, existen los usuarios de laboratorios de investigación en que se desarrollan nuevas máquinas o nuevas aplicaciones (Laboratorios mencionados en Apéndice C), donde exigen el control básico de los instrumentos, en el caso de las MMCs, en los perfiles de velocidades y aceleraciones, en fuerzas de palpación y en compensación térmica. En este sentido se han desarrollado máquinas para laboratorios de investigación (LEITZ, SIP) y de tipo industrial (ZEISS, Mitutoyo, DEA).

Sin embargo, la mayoría de usuarios tienen que recurrir al mantenimiento que ofrecen los proveedores a fin de asegurar una operación eficiente, y a evaluadores públicos autorizados para dictaminar el cumplimiento de la exactitud de sus instrumentos, *o calificarlos*. Para este propósito se han desarrollado últimamente un conjunto de normas y procedimientos de evaluación de instrumentos, que se han compilado en el Anexo B, y que recomendamos consultar. En cualquiera de los dos casos, se habla de la determinación de los errores de una MMC, de cómo éstos afectan los resultados de una medición, de cómo pueden evitarse o de cómo pueden compensarse. En esta tarea es necesario distinguir las fuentes y distintas naturalezas de errores.

3.1.2 Tipos de errores.

La literatura técnica resume los errores como aquellos que se conocen y se pueden predecir o **errores sistemáticos**, y aquellos que no se conocen y no se pueden predecir o **errores**

aleatorios, sin embargo, en el campo de estudio que nos ocupa tenemos que señalar que los errores aleatorios lo son en la medida en que no tenemos control sobre las circunstancias en que las medidas se llevan a cabo, o en el comportamiento de los instrumentos. En el caso de ésta investigación, es necesario distinguir además entre.

3.1.2.1 Errores de operación en instrumentos multieje, en este grupo abarcamos aquellos errores que se cometen por prácticas defectuosas de medición, como pueden ser: medición bajo efectos de vibraciones, polvo, gradientes térmicos, por idealizaciones falsas acerca de planos o ejes principales, por elección ineficiente de trayectorias de medición, solución ineficiente de modelos de objetos o de relaciones geométricas, truncamiento o redondeo de cifras, etc..

3.1.2.2 Errores fuente en una máquina de coordenadas Son aquellos que se pueden considerar una propiedad de tipo estático en los componentes de los instrumentos. La literatura de normalización, así como autores de diversos centros de investigación y universidades, señalan veintiuno fuentes de error para máquinas con arquitecturas simples de tres ejes, siendo estos: error de escala a lo largo de cada eje (scale), error de rectitud o traslación (straightness) en dos planos perpendiculares por eje, cabeceo en dos planos por eje (pitch and yaw), y giro o redondeo de cada eje (roll). Ver figura 3.1

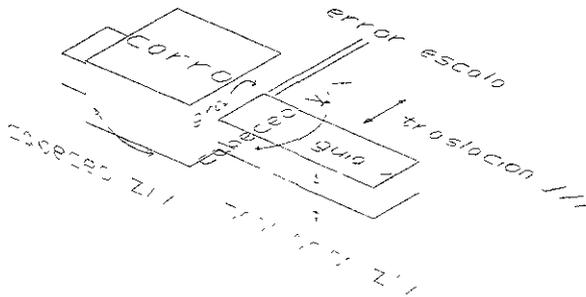


Figura 3.1. Errores fuente por eje.

Y en arreglos multidimensionales, ortogonalidad entre cada par de ejes. Para el caso de MMCs XY, XZ, YZ , que arrojan un total de veintiuno fuentes de error considerados independientes

3.1.2.3 Errores fuente no considerados por la mayoría de los autores ni por las pruebas normalizadas, que contribuyen de manera decisiva en la calidad de una medición destacan planitud de mesa, paralelismo entre mesa y mecanismos X, Y , errores de esfericidad en palpadores, umbrales de palpación de sensores, errores de calibración en patrones de puesta a punto (set up). Ver figuras 3.2 y 3.3. La forma en que influirán de forma sistemática estos últimos tres, dependerá de la tarea de medición; así, reportarían elipsoides de revolución al medir esferas, acortarían medidas en un objeto, y las alargarían en su complemento booleano (ranura y costilla), y no influirían para medidas diferenciales simples hacia $+x, +y, +z$, o hacia $-x, -y, 0 -z$. Ver figura 3.4.

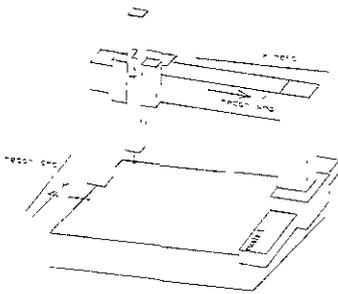


Figura 3.2. Errores de paralelismo entre mesa y mecanismos xy,

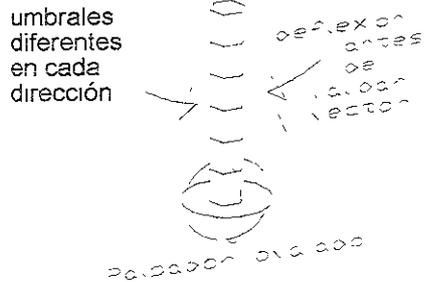


Figura 3.3. Errores por defectos de palpado.

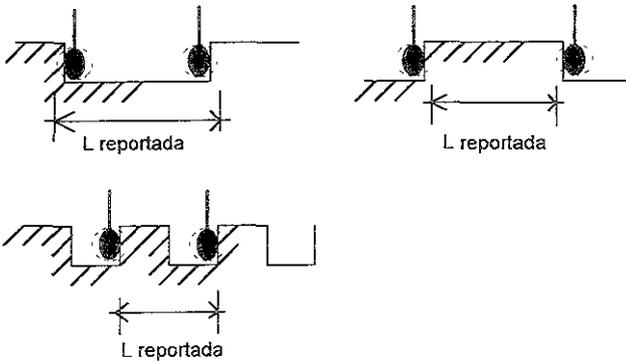


Figura 3.4. Casos de errores de esfericidad de palpador.

3.1.2.4 Errores propagados Son aquellos que se forman en el seno del volumen de medición, ya sea por la contribución de errores fuente, o por fenómenos dinámicos presentes durante el proceso de medición. Un resumen no exhaustivo de errores en una MMC puede representarse en la figura 3.5. En dicha figura se están representando los 21 fuentes de error en su componente sistemática, su propagación a la medición en el volumen, y errores de tipo aleatorio cuyas magnitudes y distribuciones pueden ser diferentes para cada posición y cada dirección en forma independiente.

A excepción de los errores de ortogonalidad, todos los demás requerirán de **modelos no lineales** para su representación e interpolación. Esta cualidad de no linealidad cobrará más importancia en posteriores análisis.

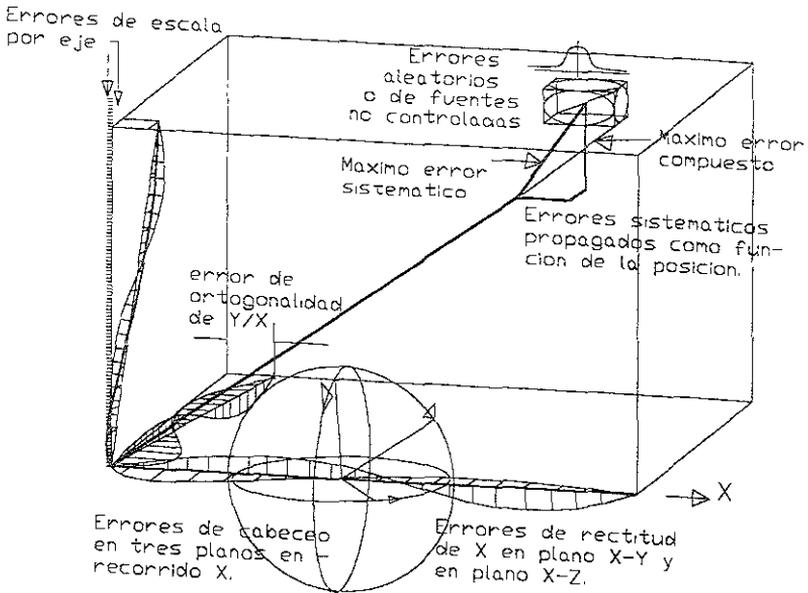


Figura 3.5 cubo de errores.

Una clase de errores tomada frecuentemente como de tipo sistemático por unos, y como de tipo aleatorio por otros, es la histéresis, y contribuye de manera notable en el presupuesto final de errores.

En la instrumentación idónea para la determinación de los 21 errores fuente destaca el sistema láser HP, que funciona bajo principios de interferencia de luz, y arreglos ópticos (prismas, espejos) que acondicionan el rayo para interpretar como longitud o ángulo tales fenómenos de interferencia [4]

3.1.2.5 Errores de truncamiento de cifras. Este tipo de errores se presentan en mediciones directas, para exactitudes de $0.1 \mu\text{m}$ en 1000 mm , cuya razón es 10^{-7} y corresponde a la aritmética de simple precisión de computadoras personales, este error se comete también como producto de procesamiento numérico, sobre todo cuando intervienen procesos de mínimos cuadrados donde estas razones se elevan a 10^{-14} .

3.1.3 Análisis de formas de propagación de errores.

La propagación de errores en un mecanismo puede manejarse de dos maneras

- La propagación de $21+n$ errores fuente considerando sus componentes sistemática y aleatoria, como aportadores a una **incertidumbre final**

b) La propagación de errores fuente sistemáticos en forma independiente de los aleatorios, cuyo resultado es una **medida con error sistemático conocido, capaz de ser corregido**, cuando se han definido las ecuaciones de propagación

Es importante anotar en este lugar, que varios modelos de propagación se han desarrollado para presupuestar la incertidumbre final, sin embargo hay que anotar que una vez corregidos las fuentes sistemáticas, la principales fuentes de error no provienen de esos 21 errores fuente, sino de comportamientos dinámicos, más difíciles de analizar y resolver

3.1.3.1 Análisis de propagación de errores para propósitos de propagación de incertidumbres.

Considerando que las incertidumbres ó errores límite se definen o estiman con un intervalo de confianza (ordinariamente 96%)] de escala por eje, ortogonalidad por par de ejes, rectitud por eje, cabeceo en dos planos por eje, y giro por eje (ver figura 3 1), llamándolas respectivamente

Sc_x	Incertidumbre de escala del eje x
Sc_y	Incertidumbre de escala del eje y
Sc_z	Incertidumbre de escala del eje z
Ort_{xy}	Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes x e y
Ort_{xz}	Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes x e z
Ort_{yz}	Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes y e z
T_{xy}	Incertidumbre de rectitud (traslación) de la guía x en plano x-y
T_{xz}	Incertidumbre de rectitud de la guía x en plano x-z
T_{yx}	Incertidumbre de rectitud de la guía y en plano y-x
T_{yz}	Incertidumbre de rectitud de la guía y en plano y-z
T_{zx}	Incertidumbre de rectitud de la guía z en plano z-x
T_{zy}	Incertidumbre de rectitud de la guía z en plano z-y
C_{x1}	Incertidumbre de cabeceo del eje x el plano x-y
C_{xz}	Incertidumbre de cabeceo del eje x el plano x-z
C_{yx}	Incertidumbre de cabeceo del eje y el plano y-x
C_{yz}	Incertidumbre de cabeceo del eje y el plano y-z
C_{zx}	Incertidumbre de cabeceo del eje z el plano z-x
C_{zy}	Incertidumbre de cabeceo del eje z el plano z-y
Rll_x	Giro (roll) del móvil alrededor de x (plano y-z) cuando se mueve a lo largo de x
Rll_y	Giro del móvil alrededor de y (plano x-z) cuando se mueve a lo largo de y
Rll_z	Giro del móvil alrededor de z (plano y-z) cuando se mueve a lo largo de z

la estimación final de incertidumbres por eje, a partir de errores fuente que intervienen con efectos de primer orden, para una arquitectura de máquina tipo portal (Ver figura 3.6), para el mismo intervalo de confianza es.

$$\sigma_x = \sqrt{Sc_x^2 + T_{x/y}^2 + T_{x/z}^2 + xOrt_{z/y}^2 + xORt_{x/z}^2 + xC_{x/y}^2 + xC_{x/z}^2}$$

Similarmente, tomando en cuenta los errores principales para presupuestar la incertidumbre de y y de z , tenemos.

$$\sigma_y = \sqrt{Sc_y^2 + T_{y/x}^2 + T_{y/z}^2 + yOrt_{x/z}^2 + yORt_{y/z}^2 + yC_{y/x}^2 + yC_{y/z}^2 + zRll_x}$$

$$\sigma_z = \sqrt{Sc_z^2 + T_{z/x}^2 + T_{z/y}^2 + zOrt_{x/y}^2 + zORt_{z/y}^2 + zC_{z/x}^2 + zC_{z/y}^2 + xRll_y}$$

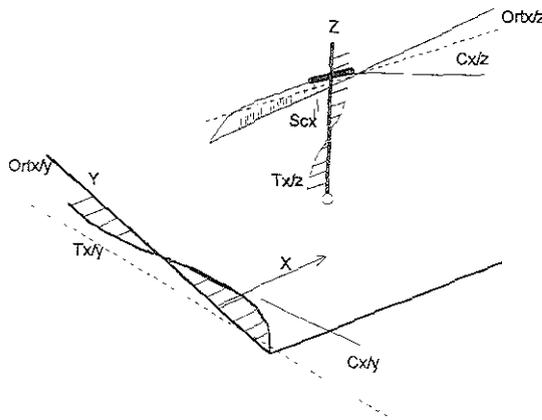


Figura 3.6. propagación de incertidumbres en x para una máquina tipo portal.

Todas las demás componentes aunque si influyen, se consideran de segundo orden como giro (roll) del eje z para las incertidumbres en x , y , z . Finalmente las componentes σ_x , σ_y , σ_z , no serán los errores finales de una medida, sino la contribución de errores fuente al seno del volumen de medición.

3.1.3.2 Análisis de propagación de errores para propósitos de propagación de errores sistemáticos y su corrección

Para este propósito es necesario establecer si los errores de rectitud y giro deben ser considerados independientes; pues mientras que para un móvil cuyos apoyos coinciden con una probable periodicidad de error en guía los errores de rectitud no producen cabeceo, para

móviles de base corta sobre guías muy deformes producirán gran amplificación de cabeceo Ver figura 3.7.

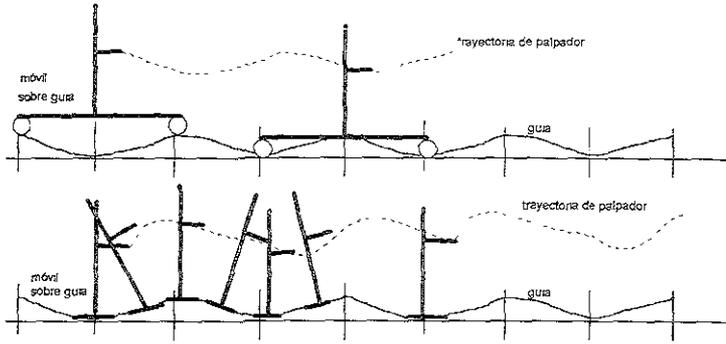


Figura 3.7 Casos extremos de desvío de guías y acoplamiento de móviles.

En un caso general, consideraremos que la orientación de móviles coincide con la tangente de la guía, y también que estas dos fuentes de error son dependientes, reduciendo el número de funciones a determinar

Para el caso de posición de un móvil sobre una guía deformada, su posición (y también la orientación) puede ser calculada del polinomio de correlación obtenido de su ajuste por mínimos cuadrados. A fin de establecer una metodología de cálculo es necesario establecer las funciones continuas de cada error para evaluar continuamente posición y orientación Ver figuras 3 8 y tabla 3.1.

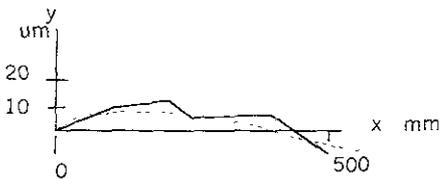


Figura 3.8 Errores determinados por procesos de calibración

$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + ..$ $y = A_1 \text{ sen}(x) + A_2 \text{ sen}(2x) + .. + B_1 \text{ cos}(x) + ..$ <p>Polinomios racionales</p> <p>Varios autores proponen polinomios de Chevishev sin proponer un método de solución</p>
<p>Tabla 3 1 Funciones de interpolación probables.</p>

Llamando a las lecturas X_m, Y_m , y a las posiciones reales simplemente X, Y , los vectores de posición serían:

$$x = x_m + f_1(x_m)$$

$$y = \text{polinomio ajustado para } y$$

Para un segundo móvil localizado en una guía recta dependiente cinemáticamente de la primera, tendríamos:

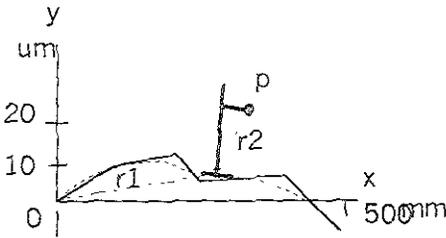


Figura 3.9. Función de error interpolada y propagación de error para un móvil.

$r_2^0 = \text{vector } r_2 \text{ para no inclinación}$ $r_2 = \text{val abs de } r_2 = \text{cte. para mov } y = 0$ $y' = \frac{\partial y}{\partial x}$ $\phi = \tan^{-1}(y')$ $\vec{r}_1 = x_i i + y(x_i) j$ $\vec{r}_2 = r_2^0 + r_2 \text{ sen}(\phi) i + r_2 (1 - \text{sen}(\phi)) j$ $\vec{p} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$	<p>Tabla 3.2 Funciones para el cálculo de la posición p del palpador.</p>
---	---

Y para un móvil montado en una segunda guía no recta, tendríamos que calcular el polinomio de la guía transformada:

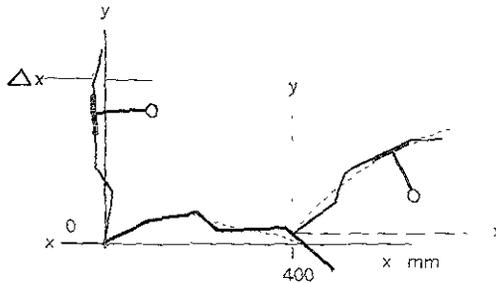


Figura 3.10 Forma de una guía transformada.

$$\Delta x(0) = A_0(0) + A_1(0)x + A_2(0)x^2 +$$

$$\Delta x(400) = A_0(400) + A_1(400)x + A_2(400)x^2 +$$

Donde habrá un continuo de coeficientes A_k ($0 \leq k \leq \text{grado del polinomio}$) para cada posición a lo largo de x , o de otros equivalentes si se escogen otros modelos. La necesidad de transformar el segundo polinomio de la guía dependiente, plantea el problema de obtener un algoritmo rápido de transformaciones a fin de evaluar continuamente las nuevas inclinaciones para las nuevas posiciones.

Vale la pena resaltar en esta parte el modelo propuesto por Cresto [6] en que establece el álgebra de propagación de primer orden, para los 21 errores fuente, considerando que aunque hay dependencia cinemática de funciones, las funciones de cabeceo se conservan para las guías dependientes. Por ser de especial interés este modelo, y manejado como referencia con variantes por otros autores, se discutirá con mayor detalle en el capítulo siguiente.

3.2 PAPEL QUE JUEGAN LAS VARIABLES DE EXACTITUD EN LOS PROCESOS DE CONTROL DE CALIDAD, Y UTILIDAD DEL INSTRUMENTO VIRTUAL.

3.2.1 Aparición de nuevas fuentes de incertidumbre.

Aunque si bien es cierto que los errores o incertidumbres propagados a partir de los errores fuente se puede determinar o estimar, el proceso de medición indirecta tridimensional plantea nuevos problemas adicionales de interpretación de resultados y de sus incertidumbres

Para ilustrar someramente la clase de problemas a presentarse analicémos los casos de medición de superficies y de arcos circulares:

3.2.1.1 Errores por incertidumbre de orientación de palpado. Estos se refieren a la incertidumbre de la orientación del vector de contacto entre centro de esfera de palpación y punto de contacto, sobre todo en objetos de curvatura desconocida o no precalculada, por ejemplo en tubos inclinados, en álabes, etc.. Frecuentemente este error se comete por suponer que se ha palpado con el "polo sur" del palpador, o a la altura del ecuador en máxima dirección $+x$ o $+y$ o $-x$ o $-y$, cuando en realidad se palpó de manera diagonal. Este error es reducido eligiendo esferas de "diámetro nulo", o por procesamiento numérico que produzca tal efecto. En cualquier caso el error persiste y se transfiere a los valores finales de la medida.

Por ejemplo, la generación de filetes de roscas de perfil trapezoidal se puede representar fácilmente por dos funciones paramétricas en un sistema de coordenadas cilíndricas, y obtenerse por conversión un conjunto de puntos de control en coordenadas ortogonales. Sin embargo la base de datos así generada servirá sólo para verificarse con palpadores de *diámetro nulo*, que no existen; ya que la posición de centros de esfera del palpador (datos que verdaderamente manejan los modelos), se localizarán a un radio del punto de palpación en dirección normal a la superficie elegida (Ver figura 3 11)

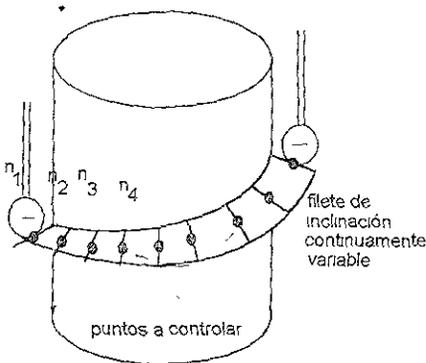


Figura 3.11 Variación de normales de palpación en una superficie continuamente variable

$Z = Ap\theta - h\alpha$	$x = R \cos(\theta)$
$R = r_m + h$	$y = R \text{sen}(\theta)$
	$Z = Z$
donde. A es $1/2\pi$	
R = Radio base del tornillo	
p = paso de la hélice	
θ = desarrollo de la hélice	
h = profundidad del filete	
α = ángulo del filete	

Tabla 3.2 Parametrización de superficies helicoidales.

Se requiere así de un proceso o polinomio de generación de normales en el flanco de la rosca, para la trayectoria en particular

El problema de interpretación aun permanece por resolver, pues en la práctica de medición de roscas los parámetros sobresalientes son: paso y diámetro medio (máximo más mínimo entre dos), y ocasionalmente ángulo de flanco. Habría que palpar en muchas más direcciones, establecer los criterios de toleranciado (superficies de máximo y mínimo material), y protocolos previos, procesos de alineamiento local para hacer inmune el proceso de medición a ligeros desalineamientos de montaje o de fabricación de roscas, que por otra parte no estarían presentes en un proceso de medición directa (método de los tres alambres, método de proyección de contornos etc)

3.2.1.2 Errores por procesamiento geométrico. Estos se refieren a los resultados de una medición indirecta, como centro de curvatura, inclinación de segmentos planos, etc., que pueden poseer gran error si se eligen puntos cercanos de medición. Ordinariamente este error es cometido por operadores de escasa y media formación

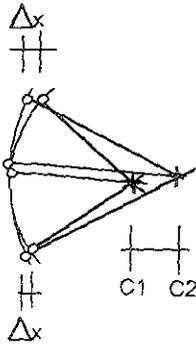


Figura 3.12 Amplificación de radio y centro como producto de mediciones indirectas

El problema frecuente en la interpretación de medidas es la de asociar una exactitud x , y ó z , a los resultados de la medida, por ejemplo si se desea medir el diámetro, radio o posición de centro de un arco, se asocia a estos la exactitud de la MMC, sin embargo ésta es mucho mayor al obtenerse por un proceso indirecto. Al analizar la figura 3.10 e puede observar la gran variabilidad de centros para pequeñas variaciones de puntos directamente medidos.

Se han elegido como ilustrativos los ejemplos previos sin ser exhaustivos, pero como conclusión debe afirmarse que los procesos de medición añaden nueva incertidumbre a las medidas finales obtenidas por procesos indirectos. En la literatura existente es muy escasa la investigación realizada para este tipo de errores propagados, y que podemos llamar *errores de proceso de medición*

3.2.2 Empleo de recursos virtuales para estimar propagación de errores

A este fin de asistir a los operadores de MMCs y validar procesos de medición para las primitivas básicas (línea, arco, superficie inclinada, esfera, cilindro, cono), el PTB (ver glosario)

ha desarrollado un **sistema experto llamada MMC virtual** (ofertada en USD 150 000). Tal instrumento opera bajo los siguientes principios:

- a) Es necesario definir un presupuesto de errores fuente, ya sea supuesto, ya obtenido por un proceso de calibración
- b) Un operador simula medir los elementos geométricos descritos
- c) Siguiendo las leyes cinemáticas de propagación de errores de una MMC simple (sólo tiene 21 las fuentes de error sistemáticos), se calculan incertidumbres finales para cada vector de palpación x, y, z
- d) Probablemente un generador de ruido produce poblaciones de vectores de palpación x, y, z diferentes (esta parte no es revelada por PTB)
- e) Para esta nueva población de vectores de palpación se generan las poblaciones de centros de arcos, posiciones y orientaciones de planos, radios y orientaciones de cilindros, y se calculan los casos extremos de cada parámetro o su dispersión; llamando la atención para los casos en donde se caería fuera de tolerancias

La utilidad de este instrumento finalmente consiste en aconsejar sobre el uso de una MMC en particular o un modo particular de operación para una aplicación. Adicionalmente sin embargo, puede tener utilidad para calificar operadores, diseñar de rutinas de medición, o adoptar procesos alternativos a la ISO-GUM y más seguros de cálculo de incertidumbres 3D.

3.3 PAPEL QUE JUEGAN LAS VARIABLES DE EXACTITUD DE INSTRUMENTOS MULTIEJE EN LA VALIDACIÓN UNIVERSAL DE MEDIDAS, Y UTILIDAD DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

La validación universal de una medida $M \pm \sigma M$, y su incertidumbre longitud por ejemplo, por un instrumento I , se demuestra cuando al medir un objeto patrón trazable (el proceso por el cual el patrón se calibra es otro problema) de longitud L , se cumple que $M - L \leq \sigma M$.

Ahora bien, la trazabilidad de L se establece comparando la longitud del patrón con el patrón primario internacional. Para el caso de otras medidas geométricas se establecen **patrones absolutos** (definición nuestra que no pertenece al vocabulario de metrología legal), consistentes estos en dispositivos que **reproducen positivamente** (es decir de manera segura) la magnitud geométrica en cuestión. Para el caso de formas complejas existen patrones absolutos de escuadría, esfera sólidas, esferas huecas (media esfera), cilindro sólido y cilindro hueco, conos de diferente apertura, ángulos de diferente apertura, hélice, espirales, envolvente. Estos patrones absolutos permitirían validar las medidas de las MMCs de tales formas o atributos geométricos; sin embargo, por los fenómenos descritos en el apartado anterior, la combinación de: formas, procesos de medición, conversión de coordenadas y sistemas de referencia,

incertidumbres de palpado, deformación de objeto y palpador, dificulta la estimación de la bondad de las MMCs en la medición de arreglos geométricos complejos (perfil de dientes en engranes cónico helicoidales por ejemplo), localizados en sistemas sujetos a variabilidad (en el caso del engrane cónico helicoidal se permite juego rotacional en ensambles). Ante tal dificultad se ha polarizado la opinión de expertos acerca de las pruebas de aceptación de medidas de MMCs

- Por una parte se encuentran quienes aseguran que para ver si una MMC es idónea para medir cigüeñales, levas o engranes, debe probarsele con cigüeñales, levas y engranes, con características lo más semejantes a los objetos que realmente se van a medir. Adicionalmente tienen a su favor el argumento de que este proceso es influido por variables de temperatura, polvo, vibraciones, inercia, etc., condiciones reales y no simuladas

- Por otra parte se encuentran los que afirman, (PTB entre otros [5]), que encontrándose todas las magnitudes geométricas dentro de un espacio tridimensional, es posible establecer las relaciones de trazabilidad de cualquier forma geométrica con sólo asegurar trazabilidad en longitud y relaciones de longitud adecuadas dentro de ese espacio. Por ejemplo para asegurar la bondad de medición de escuadría sería suficiente con demostrar la habilidad de la MMC de medir longitud a lo largo de x (cateto), a lo largo de y (cateto) y en diagonal (hipotenusa). Esta posición de investigadores de PTB establece ***criterios verdaderamente revolucionarios*** dentro del contexto trazabilidad, al convertir la MMC en instrumento universal y patrón, al ahorrar la necesidad de patrones absolutos para calibrarse. Otros criterios igualmente poderosos reafirman tal posibilidad al dar a las MMCs la posibilidad de ***autocalibrarse***. **Sobre el tema de autocalibración nuevamente entran en juego los patrones virtuales** y patrones de forma y tamaño libres (no puede ser exhaustivo en este espacio su discusión)

- Finalmente la opinión de un servidor apunta en la dirección que para muchas formas no podrán fabricarse patrones absolutos con los cuales sean probadas las tareas de las MMCs, sin embargo parece válida la objeción de la gran cantidad de magnitudes de influencia y modos de operación de una MMC que las aleja de las MMCs virtuales. Queda abierta sin embargo la posibilidad de completar los instrumentos virtuales con nuevas propiedades como inercia, elasticidad, histéresis, polvo, vibraciones, variaciones térmicas, rugosidad de especímenes, que la asemejarían a las reales, y con esas consideraciones puedan ser tomadas en cuenta como verdaderos sustitutos de las reales para fines de validación

3.4 PAPEL QUE JUEGAN LAS VARIABLES DE EXACTITUD EN LOS PROCESOS DE CALIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS, Y UTILIDAD DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

En el Apéndice B se hace una discusión de los procesos normalizados de verificación de máquinas, los que en base a pruebas sencillas diagnostican si un instrumento cumple con tolerancias para los propósitos de medición. Por los fenómenos discutidos el párrafo “papel de la exactitud en procesos de control de calidad”, es obvio que las pruebas del Apéndice B no diagnostican totalmente al instrumento. Pensando en una MMC como posicionador, o una fresadora para realizar trazos, ¿permiten las pruebas del Ap. B diagnosticar su habilidad?

Por otra parte existen otras problemáticas al calificar un instrumento como a) ¿Quién va a dictaminar exactitud en las transacciones de venta del instrumento? b) ¿Quién validará los procesos de medición para propósitos de políticas de calidad de empresas? c) ¿Cómo se demostrarán los resultados o fallos de su calificación?

La respuesta parece ser un instrumento virtual que reproduzca el comportamiento real del instrumento en cuestión en base a pruebas normalizadas o en base a nuevas pruebas sugeridas por usuarios, peritos evaluadores o autoridades; que permita convertir resultados de una prueba en otra (ANSI -> Swiss Procedure -> Renishaw); que prediga su comportamiento en condiciones de operación no ortodoxas (como posicionador por ejemplo), y finalmente sería deseable que tal instrumento virtual represente aquellas variables fuente causantes de los errores (rectitud, escala, ortogonalidad, cabeceos, giros, polvo, backlash, elasticidad, sensibilidad térmica, inercia, entre otros), pues se convertiría en el instrumento ideal para deshacer controversias ocasionadas por su calificación, o para corregir mecánica o numéricamente su comportamiento, o afectarlo de constantes o polinomios para mejorar su exactitud bajo ciertos modos de operación.

3.5 REFERENCIAS

- 1 ANSÍ B89 M12 Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines
- 2 VDI/VDE 2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines Characteristics and their Checking Generalities
- 3 "CMMA", Accuracy specification for coordinate measuring machines 1985 Coordinate measuring machines manufacturers association
- 4 HP 5528 A Measurement Laser System Manual..

- 5 Hartig, F. et al, Traceability of Coordinate Measurements according to the Virtual CMM Concept 5 th IMEKO Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, Zaragoza, Spain, 25-27 october 1995
- 6 An alternative method for calibrating and mapping errors in CCM Sánchez José et al, Proceedings of XIII Word Congress, September 5 – 9, Torino Italy, 1676-1682

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE MODELOS ESTÁNDAR DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL.

PROPUESTA DE MODELO E INSTRUMENTO VIRTUAL PROPIO.

4.1 INTRODUCCION

Trayendo el concepto de instrumentación virtual definido en el capítulo primero como: “el conjunto de modelos matemáticos y en su caso métodos de solución, bases de datos, interfaces, primitivas CAD, ambientes de animación”, que representan el comportamiento de instrumentos multicoordenada potencialmente reales, con alguno de los propósitos siguientes

Facilitar el entendimiento de fenómenos de error 3D, en el seno del volumen de medición, ya sea como producto de errores más elementales, ya sea como una práctica defectuosa de medición.

Que permitan corregir medidas a fin de mejorar exactitudes.

Que permitan diagnosticar errores fuente de instrumentos o sus equivalentes, y en su caso corregirlos, a partir de pruebas sencillas en el seno del volumen de medición.

Que faciliten el diseño y enseñanza de protocolos de medición.

Que permitan poner a prueba procesos de medición, procesos de calibración nuevos o ya normalizados, o convertir resultados de un proceso de calibración en otro.

Puede observarse en los tres primeros propósitos a uno fundamental con que debe cumplir un instrumento virtual! éste debe modelar sus errores, ya sea para corregirlos, para diagnosticar MMCs, o para restaurarlas

Se han omitido de éste capítulo los instrumentos virtuales cuyos propósitos son la presupuestación de incertidumbres finales porque a) su análisis ya se realizó en el capítulo anterior, b) porque desde éste análisis no cumplen otra función que la de generadores de ruido, c) porque no permiten el conocimiento de errores en magnitud y signo para diagnóstico o restauración de MMCs, d) porque un propósito primordial de ésta investigación es distinguir modo y cantidad de contribución de errores a fin de controlarlos por alguno de los siguientes recursos: por corrección numérica, por diseño de partes, por modos de operación de MMCs, por modos de control

Para fines de apreciación y en su caso de comparación de instrumentos virtuales se tomará en cuenta en primer lugar la “bondad” de modelos de error fuente y los modelos de su propagación hacia el seno de volúmenes de medición, pero habiendo satisfecho las necesidades de elección de buenos modelos de error y su propagación, apenas un poco menos importantes que aquellos se **considerarán como partes de un instrumento virtual las facilidades matemáticas, numéricas y computacionales para su manejo como son: menús, gráficos analíticos, proyecciones 2D de sólidos, gráficos 3D de sólidos, interfaces de operación, interfaces con ambientes CAD estándar. Adicionalmente se considerará como mejor instrumento virtual aquel que permita obtener inversamente los errores fuente a partir de errores propagados, mediante pruebas sencillas directas realizadas según los modos normales de operación del instrumento.**

Por su importancia en los tipos de análisis de error y las consecuencias a que llevan, sobresalen los modelos de Soons [1] con un enfoque general, y el modelo simplificado de Cresto [2], que al ser adoptados por varios investigadores podemos considerar como modelos estándar. Finalmente con base al análisis de estos modelos para propósitos prácticos de calibración, corrección de medidas, de modelado computacional de deformaciones y de mantenimiento de máquinas, se propondrá un modelo propio

4.2 ANÁLISIS DE MODELOS ESTANDAR.

4.2.1 MODELO GENERAL DE SOONS

El modelo de Soons está basado en la intención de establecer una metodología general de aproximación y propagación de errores en una máquina multieje. Para ello establece que pueden existir máquinas con cadenas cinemáticas en paralelo, considera que de los errores que contribuyen al presupuesto final de errores podemos distinguir los estáticos o permanentes y los cuasiestáticos, de entre los que destaca la dilatación térmica, la deformación elástica y variabilidad de ensambles; finalmente propone como modelos de errores fuente a los polinomios pieza maestra o “+” (piecewise polynomials)

Para establecer la propagación de errores, Soons propone una máquina compuesta de $m + n$ cuerpos rígidos en dos ramas “rama a” de m cuerpos y “rama b” de n cuerpos; inicialmente considerados como cuerpos rígidos. Ver figura 4.1

El sistema de referencia es una estructura base a partir de la cual se apoya la *rama a* y la *rama b*, ambas ramas terminan respectivamente en la herramienta y en la pieza. Llama al sistema (frame) final de la herramienta sistema tl (tool) y al de la pieza wp (workpiece)

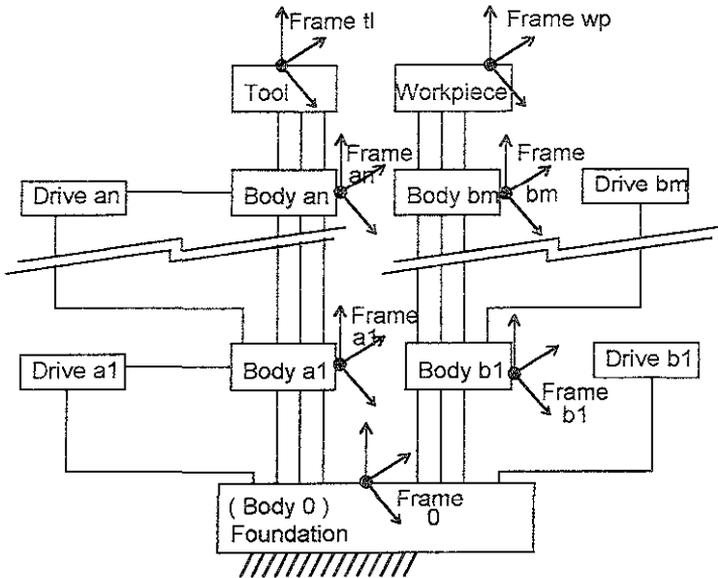


Figura 4.1. Nomenclatura de Soons para los sistemas inicial finales e intermedios de una máquina multieje con $n + m$ cuerpos en paralelo.

Las líneas verticales que parten de la cimentación o del *cuerpo 0* de la máquina, representan las distintas maneras en que puede transmitirse error al primer cuerpo; la línea que llega al cuerpo a1 por el *drive a1* significa las fuentes de error ocasionadas por el control posicional de ese cuerpo. El *cuerpo an* será afectado de las fuentes de las cadenas entre el *cuerpo 0* y en *cuerpo n*.

4.2.1.1 Propagación de errores estáticos.

Soons considera como errores estáticos aquellos que permanecen por largo tiempo, y son independientes del modo de operación. Las relaciones que habrá entre dos puntos ${}^k P$ y ${}^l P$ de los cuerpos k, l , expresada en coordenadas homogéneas será

$${}^l P = {}^l T_{l1} P \quad (S.1)$$

donde

$${}^l T_{l1} = \begin{bmatrix} {}^k R_l & {}^k t_l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (S.2)$$

y

$${}^k P = [{}^k P_x \quad {}^k P_y \quad {}^k P_z \quad 1]^T \quad (S.3)$$

En este sistema la sub-matrices ${}^k R_l$ y ${}^k t_l$ representan las inclinaciones de la estructura l con respecto a la estructura k , y la traslación del origen de l respecto al sistema k respectivamente

Y la transformación inversa puede ser expresada.

$${}_i P = {}_i T_{k-1} P \tag{S 4}$$

$${}_i T_k = \begin{bmatrix} -{}_k R_i^T & {}_k t_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \tag{S 5}$$

Las relaciones de transformación aplicadas sucesivamente a través de n cuerpos en la rama a , y de m cuerpos en la rama b , nos permitirá obtener la matriz de posiciones del sistema herramienta respecto del sistema pieza:

$$\begin{aligned} {}_{wp} T_{il} &= {}_{wp} T_{00} T_{il} \\ &= {}_{wp} T_{bm} \prod_{k=m}^1 ({}_{ok} T_{bk-1}) \prod_{k=1}^n ({}_{ak-1} T_{ak}) {}_{an} T_{il} \end{aligned} \tag{S 6}$$

Las transformaciones expresadas pertenecen a transformaciones nominales o libres de error

Para un paso de transformación donde el cuerpo k soportado en el cuerpo $k-1$, tiene errores traslacionales llamados.

$${}_{k-1} e_{kx}, \quad {}_{k-1} e_{ky}, \quad {}_{k-1} e_{kz}$$

a lo largo de los ejes x, y, z respectivamente, y errores rotacionales llamados:

$${}_{k-1} \epsilon_{kx}, \quad {}_{k-1} \epsilon_{ky}, \quad {}_{k-1} \epsilon_{kz}$$

alrededor de los ejes x, y, z respectivamente, la relación de transformaciones nominales $({}_{k-1} T_k)$ en actuales $({}_{k-1} T_{ac_k})$ será:

$${}_{k-1} T_{ac_k} = {}_{k-1} T_k (I + {}_{k-1} \delta T_k) \tag{S 7}$$

donde

$${}_{k-1} \delta T_k = \begin{bmatrix} 0 & -{}_{k-1} \epsilon_{ky} & {}_{k-1} \epsilon_{kx} & {}_{k-1} e_{kx} \\ {}_{k-1} \epsilon_{kz} & 0 & -{}_{k-1} \epsilon_{kx} & {}_{k-1} e_{ky} \\ -{}_{k-1} \epsilon_{kx} & {}_{k-1} \epsilon_{kx} & 0 & {}_{k-1} e_{kz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{S 8}$$

e I es la matriz identidad 4×4 .

4.2.1.2 Propagación de errores cuasiestáticos.

En comparación de los errores estáticos, Soons considera otra categoría de errores llamados cuasiestáticos, que son aquellos que pueden estimarse en base a ensayos o modelos de predicción, ellos son de rigidez, de deformación térmica y de ensambles, y producirán las matrices de transformación. sE , tE , y mE , respectivamente. Las transformaciones entre dos cuerpos sucesivos serán: ${}_{k-1}^sE_k$, ${}_{k-1}^tE_k$, ${}_{k-1}^mE_k$ por cada efecto; y el efecto combinado será

$${}_{k-1}E_k = {}_{k-1}^sE_k + {}_{k-1}^tE_k + {}_{k-1}^mE_k \quad (S 9)$$

produciendo rotaciones y traslaciones. A su vez, los efectos del *cuerpo 1* ($k=1$) pueden estar referidos a un cuerpo dominante (por ejemplo los errores de escala axial en un carro de torno serán debidos principalmente a la sensibilidad térmica de la bancada) o *cuerpo 0* ($k=1$). Y en otras ocasiones el cuerpo dominante será el propio *cuerpo k* (deformaciones en el carro, por efectos de la fuerza que soporta la herramienta, la fuerza a su vez se transmite al carro pero no deforma la bancada, o es de segundo orden).

En lo sucesivo Soons no profundiza más en el análisis de las interfaces o ensambles, pero es obvio que varias transformaciones ${}_{k-1}^mE_k$ serán a su vez función de la fuerza aplicada, y de la localización o estado actual de la máquina multieje o de la temperatura local; por ejemplo: las deformaciones de la interface flecha-caja de balero del husillo de un taladro será función de fuerzas laterales pero también del estado actual de posiciones (de ellos depende la producción de momentos), o los espesores de películas de aceite de colas de milano en una máquina herramienta podrán a su vez ser función de la temperatura.

4.2.1.3 Propagación de errores totales

Aunque Soons no lo menciona, es de suponer entonces que los errores estáticos y cuasiestáticos tienen propiedades aditivas, ya que la dilatación térmica producirá un efecto aditivo a los errores de escala, o errores de cabeceo serán incrementados o compensados por torsiones de origen térmico. Con estas consideraciones deducimos la ecuación S 10, que resume los efectos de distorsiones estáticas y cuasiestáticas

$${}_{k-1}Tacc_k = {}_{k-1}T_k (I + {}_{k-1}\delta T_k + {}_{k-1}E_k) \quad (S 10)$$

4.2.1.4 Determinación de errores fuente estáticos.

Soons propone los procesos de calibración directa [cita 1, pág 13], es decir por algún procedimiento clásico de láser, de autocolimadores, de niveles o de patrones a pasos alineados cerca de escalas

Los modelos de estos errores fuente que él propone son llamados piezas maestras (traducción nuestra de *piecewise polynomials*) consistiendo estas en los llamados polinomios truncados o “+”, definidos como

$$\bullet u_{+} = u \quad \text{if } u > 0 \quad \bullet u_{+} = 0 \quad \text{if } u \leq 0 \quad (\text{S.11})$$

y para representar una función de error E con k nodos t_1, \dots, t_k y un polinomio con $k+1$ piezas para una variable independiente q , puede ser escrita.

$$E(q) = \sum_{j=0}^n \beta_{0j} q^j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^n \beta_{ij} (q - t_i)^j. \quad (\text{S.12})$$

4.2.1.5 Determinación de errores fuente cuasiestáticos.

En este tipo de errores Soons sólo comenta que pueden utilizarse modelaciones por elemento finito (FEM), los cuales permiten predecir deformaciones por efectos elásticos (stiffness) y térmicos, estos segundos a su vez determinados por la localización de sensores en el seno de las estructuras, o si la variación de temperatura es lenta y homogénea, con un solo sensor y con el modelado correspondiente por elemento finito. En cuanto a la predicción de errores por ensamble sólo comenta que las transformaciones sobresalientes entre dos ensambles pueden estar referidas a un elemento dominante, sin hacer mayor comentario.

4.2.2 MODELO ESTÁNDAR DE CRESTO

El modelo de propagación de errores fuente que a continuación se describe es compartido por varios investigadores incluido Soons, del que es una simplificación, aunque no los polinomios para modelarlos. Se le ha identificado como modelo Cresto [2] porque es quien lo ha expresado de la forma clara y simplificada, y porque esboza un principio de calibración práctico (autocalibración) que ahorra la calibración directa de errores fuente, siendo también el propósito de esta investigación. Por otra parte Cresto no entra en el análisis de errores de distorsión térmica, elástica ni de ensambles.

4.2.2.1 Propagación de errores fuente.

A fin de facilitar la construcción del álgebra de propagación Cresto establece que su modelo de MMC tiene una cadena cinemática de cuerpos que se desplazan según el siguiente orden: Cuerpo principal a lo largo de X , cuerpo soportado en el anterior, que se desplaza a lo largo de Y , y un cuerpo adicional soportado en el anterior que se desplaza en Z , teniendo una cadena cinemática $X \rightarrow Y \rightarrow Z$.

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$, representan las traslaciones actuales de los carros X, Y, Z .

$R(x_m), R(y_m), R(z_m)$, representan las matrices de rotación de los carros X, Y, Z .

- T representa el vector de posición del palpador respecto del carro Z
- x_m, y_m, z_m representan los desplazamientos nominales (lecturas) de los carros
- $\delta_{uv}(u_m)$ es el error de traslación en la dirección v , bajo los efectos de movimiento en u (se asocia el signo del error como el signo de la dirección v). Para cada caso se elegirán las coordenadas u ó v
- $\epsilon_{uv}(u_m)$ es la rotación alrededor del eje v bajo los efectos de movimiento en u (se toman positivos en sentido contrario al reloj)

Considerando estas definiciones, la posición actual \vec{P} de la punta de prueba será:

$$\vec{P} = \vec{X} + R^{-1}(x_m) \cdot \vec{Y} + R^{-1}(x_m) \cdot R^{-1}(y_m) \cdot \vec{Z} + [R^{-1}(x_m) \cdot R^{-1}(y_m) R^{-1}(z_m)] \cdot T \quad (C 1)$$

donde: $\vec{X} = \begin{bmatrix} x_m + \delta_{xx}(x_m) \\ \delta_{xy}(x_m) \\ \delta_{xz}(x_m) \end{bmatrix}$, $\vec{Y} = \begin{bmatrix} \delta_{yx}(y_m) \\ y_m + \delta_{yy}(y_m) \\ \delta_{yz}(y_m) \end{bmatrix}$, $\vec{Z} = \begin{bmatrix} \delta_{zx}(z_m) \\ \delta_{zy}(z_m) \\ z_m + \delta_{zz}(z_m) \end{bmatrix}$ (C 2)

y $R(x_m) = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{xz}(x_m) & -\epsilon_{xv}(x_m) \\ -\epsilon_{zx}(x_m) & 1 & \epsilon_{xx}(x_m) \\ \epsilon_{xy}(x_m) & -\epsilon_{xx}(x_m) & 1 \end{bmatrix}$ (C 3)

$$R(y_m) = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{yx}(y_m) & -\epsilon_{yv}(y_m) \\ -\epsilon_{vy}(y_m) & 1 & \epsilon_{vx}(y_m) \\ \epsilon_{vy}(y_m) & -\epsilon_{yx}(y_m) & 1 \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

$$R(z_m) = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{zx}(z_m) & -\epsilon_{zv}(z_m) \\ -\epsilon_{zx}(z_m) & 1 & \epsilon_{zx}(z_m) \\ \epsilon_{zx}(z_m) & -\epsilon_{zx}(z_m) & 1 \end{bmatrix} \quad (C 5)$$

Las coordenadas de \vec{P} serán finalmente $\vec{P} = \begin{cases} x_p = x_m + x_T + \Delta x \\ y_p = y_m + y_T + \Delta y \\ z_p = z_m + z_T + \Delta z \end{cases}$ (C.6)

Considerando la ortogonalidad de R $R^{-1}(u_m) = R^T(u_m)$, obtenemos que los valores $\delta_{uv}(u_m), \epsilon_{uv}(u_m)$ son despreciables, y aplicándolo a las ecuaciones C.2 a C 6 obtenemos las expresiones de error

$$\Delta x = \left[\delta_{xx}(x_m) + \delta_{yy}(y_m) + \delta_{zz}(z_m) \right] + \left[\epsilon_{xy}(x_m) + \epsilon_{yx}(y_m) \right] \cdot z_m - \epsilon_{xz}(x_m) \cdot y_m - \left[\epsilon_{xz}(x_m) + \epsilon_{yz}(y_m) + \epsilon_{zz}(z_m) \right] \cdot y_T + \left[\epsilon_{yx}(x_m) + \epsilon_{yy}(y_m) + \epsilon_{zy}(z_m) \right] \cdot z_T \quad (C 7)$$

$$\Delta y = \left[\delta_{xy}(x_m) + \delta_{yy}(y_m) + \delta_{zy}(z_m) \right] + \left[\epsilon_{xx}(x_m) + \epsilon_{yx}(y_m) \right] \cdot z_m + \left[\epsilon_{xz}(x_m) + \epsilon_{yz}(y_m) + \epsilon_{zz}(z_m) \right] \cdot x_T + \left[\epsilon_{xx}(x_m) + \epsilon_{yx}(y_m) + \epsilon_{zx}(z_m) \right] \cdot z_T \quad (C 8)$$

$$\Delta z = \left[\delta_{xy}(x_m) + \delta_{yy}(y_m) + \delta_{zy}(z_m) \right] + \left[\epsilon_{xx}(x_m) + \epsilon_{yx}(y_m) \right] \cdot z_m + \left[\epsilon_{xz}(x_m) + \epsilon_{yz}(y_m) + \epsilon_{zz}(z_m) \right] \cdot x_T + \left[\epsilon_{xx}(x_m) + \epsilon_{yx}(y_m) + \epsilon_{zx}(z_m) \right] \cdot z_T \quad (C 9)$$

Consistiendo estas ecuaciones lo que podrían llamarse una aproximación de primer orden con respecto a una descripción más general (ver Análisis de dependencia geométrica de errores, parte B, capítulo III)

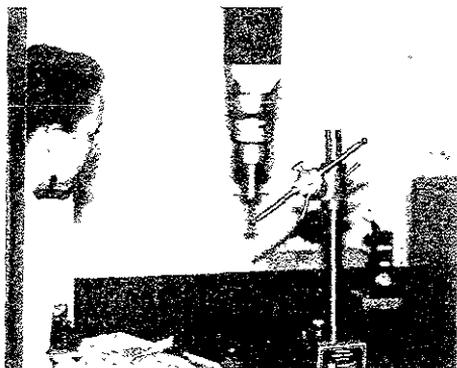
4.2.2.2 Polinomios de parametrización de errores.

Propone Cresto los polinomio de Chevishev, cuya forma general es.

$$f(x) \cong \sum_{r=1}^p a_r \cdot T_{r-1}(x) \quad (C 10)$$

4.2.2.3 Principio de calibración propuesto.

Cresto propone cualquier objeto del que se pueda presumir invariancia de tamaño y forma, para ser empleado como patrón, y del que se puedan extraer relaciones bien definidas (distancias entre centros, escuadría, etc), útiles para explotarse relaciones algebraicas que involucren parámetros de modelación. Dos son los instrumentos actuales más usados que cumplen con tales condiciones. Barras con esferas en los extremos, y arreglos bidimensionales planos (placas de bolas) con localizaciones prefijadas o al azar en el espacio de medición. Ver figuras 4.2 y 4.3



Figuras 4.2. Barra de extremos esféricos para calibrar MMCs, desarrollada en el Centro de Instrumentos UNAM.

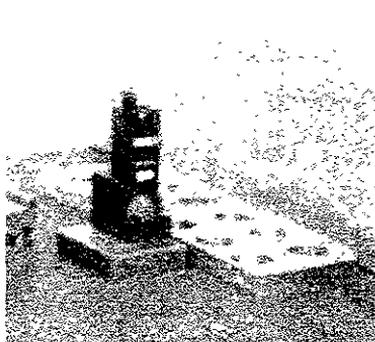


Figura 4.3. Placa patrón de orificios para calibración de MMCs, desarrollada en el Centro de Instrumentos UNAM.

Las relaciones de invariancia posibles para la barra son la distancia entre esferas (relevante), y su diámetro; y para la placa las distancias entre $\sum_1^n (n-1)$ pares de esferas, posición respecto a referencias locales en arreglos ortogonales y diámetro de esferas

Finalmente establece que la invariancia de cotas entre cada par invariante correlacionado, debe satisfacer para dos posiciones i, k cualquiera la relación (C.11).

$$\left\{ \left[(x_A - x_B)_i^2 + (y_A - y_B)_i^2 + (z_A - z_B)_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(x_A - x_B)_k^2 + (y_A - y_B)_k^2 + (z_A - z_B)_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = 0 \quad (\text{C.11})$$

Finalmente Cresto afirma que empleando las funciones C.10 de Chevishev en las ecuaciones C 7 a C.9, éstas en el arreglo C 6, y finalmente éstas en la ecuación C 11, es posible establecer por linealización por series, las ecuaciones necesarias para determinar las a_i , que definen los errores fuente (aproximadamente $21 * 3 = 63$ ecuaciones lineales y hasta 105 ecuaciones)

4.3 EVALUACIÓN Y CRÍTICA DE MODELOS ESTÁNDAR

4.3.1 Ventajas de ambos modelos, que los convierten en estándar

La álgebra de propagación de errores de Soons parece de validez universal, en el sentido de que se pueden construir cadenas paralelas de objetos rígidos y determinar las relaciones de error entre cualquier par de objetos ya sea localizados en la misma rama o localizados en ramas diferentes, es posible inclusive añadir una tercera rama y relacionarla con la estructura de referencia "0" para establecer los desplazamientos actuales siguiendo la misma metodología.

El modelo de Cresto, parece una simplificación y caso particular del modelo de Soons, al introducir una única rama de dependencia cinemática $X \rightarrow Y \rightarrow Z$, al hacer énfasis en las transformaciones ortogonales que simplifican términos de las matrices de transformación, que a su vez redundan en una simplificación en la obtención de propagación de errores. C 7 a C 9

4.3.2 Desventajas del planteamiento de Soons:

El enfoque que da Soons al análisis de propagación de errores llamados por él estáticos es sólo éste, de la propagación hacia el seno o medida final en el volumen de medición, pero partiendo que este se conoce, y lo afirma varias veces, haciendo referencia a la necesidad de una buena calibración (en el sentido ortodoxo de la calibración). Su modelo es de utilidad unidireccional, es decir de los errores fuente a los propagados. **En este sentido no es posible definir tales errores fuente partiendo de ensayos sencillos dentro del volumen de medición.**

Los errores cuasiestáticos, al igual que los estáticos, son considerados errores fuente que deben conocerse previamente, o modelados; pero conocidos en su valor actual (para cada posición) a fin de introducirlos convenientemente en las transformaciones correspondientes (ecuaciones S.10). Nuevamente no propone ensayos sencillos para su determinación; habría que establecer funciones para determinar polinomios de deformación elástica, térmica y de ensambles (probablemente no lineales) para su evaluación y corrección continua en la práctica de la medición.

En la determinación de funciones de error fuente, propone los polinomios “+”, paramétricos de alto grado. Si bien estos polinomios pueden determinarse por única vez en procesos de calibración, como realmente se llevan a cabo en fábrica, y aplicarse para cada medida, no parece que estos polinomios puedan aplicarse a los errores cuasiestáticos, pues éstos serían a su vez dinámicos (el polinomio de distorsión de un puente, sería diferente para cada temperatura y para cada perfil de aceleración); y tendrían que aplicarse dobles funciones función elegida de polinomios “+”, dentro de la cadena de propagación, y otra función para evaluar las constantes del polinomio “+” para los valores actuales de distorsión de elementos o ensambles. **La utilidad del álgebra de propagación de distorsiones cuasiestáticas, parece más bien aplicable a la estimación de incertidumbres que a la predicción de deformaciones.**

4.3.3 Desventajas del planteamiento de Cresto:

La autocalibración, que pudiera ser la ventaja principal del modelo de Cresto, se ve dificultada por la enorme cadena de sustituciones para anidar en las relaciones de invariabilidad en C 11, en la linealización de C 11 una vez se ha expresado en funciones de Chevishev, y en la solución de los grandes arreglos lineales resultantes. No es afirmado por Cresto, pero seguramente habría que asegurarse de la no singularidad de los sistemas resultantes. **El trabajo presentado por Cresto no incluye las formas particulares de $T_{r,i}(x)$ en Chevishev, los pasos de sustitución**

C.10 en C.7 a C.9 en C.6 y en C.11, el procesos de linealización (Taylor), ni despeje de las a_i de los rearrreglos linealizados para su introducción a paquetes algebraicos de solución. Puede decirse entonces que es un procedimiento incompleto, que sólo es propuesto para que otros terminen de desarrollarlo.

4.3.4 Desventajas de ambos planteamientos:

- a) De ambos planteamientos puede criticarse la pretensión de **modelar con una exactitud ociosa, errores de segundo orden** que finalmente quedan enmascarados por otros errores que en este momento se les puede llamar ruido (errores por elasticidad, por vibraciones, por efectos viscosos, y por los mencionados como cuasiestáticos por Soons), que más bien parecen estimaciones para el diseño o para presupuestación de incertidumbres. Efectivamente, magnitudes de error en medidas ordinarias de MMCs de grado laboratorio son

Repetibilidad $U_{96} \pm [2.5 + L/250]$, micrómetros, mm

Ortogonalidad: $2'' = 9.61 \times 10^{-6}$ rads

Produciendo para desplazamientos de 1000 mm, errores de repetibilidad y desvío por ortogonalidad de $6.5 \mu\text{m}$ y $9.6 \mu\text{m}$ respectivamente. Errores de máquinas de otros tipos conservan esta relación.

El Instituto Gustavo Collonetti afirma emplear polinomios grado 5 ordinariamente. Las máquinas SIP parecen emplear polinomios ortonormales grado 25. Indiscreciones de investigadores de PTB revelan emplear polinomios grado 1 (uno) en espacios discretizados. Un sencillo análisis algebraico, y de la exactitud de la aritmética computacional permiten apreciar que sólo polinomios de bajo grado se justifican en la modelación de errores no lineales.

- b) El manejo independiente de errores podría llevar a contradicciones en la **reconstrucción de sólidos de guías o correderas**; pues el ruido obtenido por errores independientes podrá afectar de diferente manera las soluciones de rectitud y de cabeceo.
- c) La representación de errores de escalas, rectitud, cabeceos, giros, y sus sólidos por polinomios *piecewise*, Chebishev, ortonormales, y primitivas de los sólidos que los poseen, difícilmente se pueden integrar para representarse en las infraestructuras CAD actuales; pretensión que desde nuestro punto de vista debe tener un instrumento virtual.
- d) Ambos modelos ignoran el papel del diseño del instrumento, principalmente los fenómenos de Abbe, en la propagación de errores o en su determinación por procesos inversos. Una idealización que parece considerada es que en un ensayo de calibración del instrumento, las condiciones

límite de escala, rectitud y cabeceo de movimientos en el cubo de medición, coinciden con ejes de escalas y guías

- e) **Ninguno de los dos modelos es reversible**, es decir, ninguno de los dos permite establecer los errores fuente a partir de pruebas sencillas en el seno del volumen de medición, no permite diagnosticar MMCs y no permiten corregir mecánicamente.

4.4 PROPUESTA DE INSTRUMENTO VIRTUAL PROPIO

Del análisis de errores del capítulo III, del análisis de investigaciones del Apéndice D exceptuando las referencias D-A.12 y D-A.15, y del análisis precedente, se deduce que ninguno de los modelos propuestos satisface completamente nuestras expectativas de instrumento virtual, aunque el tema es abordado muy eficientemente por varios autores desde diferentes enfoques o para varios propósitos. En vista de las necesidades de instrumentación virtual mencionadas en el capítulo primero se propone el modelo e instrumento virtual propio con las siguientes especificaciones:

4.4.1 Especificaciones

- 4.4.1.1 El instrumento virtual debe tener clara equivalencia con instrumentos reales, a partir de primitivas simples CAD
- 4.4.1.2 Se integrarán los errores de: escala, ortogonalidad, rectitud, cabeceo y giro en dicho instrumento.
- 4.4.1.3 El instrumento virtual deberá permitir la comprobación geométrica de propagación de errores fuente hacia el volumen de medición
- 4.4.1.4 Se dotará al instrumento de reversibilidad, desarrollando metodologías de diagnóstico de errores fuente (cinemática inversa) a partir de pruebas simples en el seno del volumen de medición
- 4.4.1.5 El instrumento poseerá facilidades de operación interactiva, similares a los procesos usuales de medición y calibración

A fin de satisfacer estas especificaciones, se aplicarán los siguientes principios

4.4.2 Principios

- 4.4.2.1 El grado de un polinomio o modelo descriptivo de errores, se justifica en la medida que permita distinguir las componentes sistemáticas del ruido que acompaña una medición

- 4.4.4.2 Se considerarán los errores de rectitud y cabeceo como errores dependientes
- 4.4.4.3 Para fines de corrección de medidas, o de elección de regiones óptimas de operación, sólo es necesaria la correlación directa entre medidas reales y medidas absolutas (mapeo), sin que sea necesario el modelado de errores fuente ni el establecimiento de funciones de propagación.
- 4.4.2.4 Es posible integrar en primitivas elementales o en ensambles geométricos de objetos, todos los errores fuente.
- 4.4.2.5 En el caso de falla de hipótesis, que pudiera demostrarse por algún proceso directo de calibración, esas seguiría siendo válida para propósitos de corrección, y de calificación de instrumentos

4.4.3 ANTECEDENTES DE INSTRUMENTO VIRTUAL PROPIO:

Los siguientes modelos desarrollados en el Centro de Instrumentos UNAM se basan en algunos de los principios establecidos: **Correlación directa de medidas y valores absolutos, fácil representación geométrica, reversibilidad.** Dichos modelos pueden ser requeridos para algunas aplicaciones de los modelos CAD no lineales.

4.4.3.1 Instrumento lineal

La modelación lineal de medidas y valores absolutos de medidas, o de estas y sus errores, está basada en la capacidad de promediación de los procesos de ajustes por mínimos cuadrados; y de ellas se obtienen errores de escala, ortogonalidad y para algunos casos de cero u "offset" Algebraicamente se representa por

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & t_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & t_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad [X_m] = \begin{bmatrix} SR & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [X] \quad (P.1.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & t_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & t_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad [\Delta X_m] = \begin{bmatrix} SR & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [X] \quad (P.1.1)$$

Nota: se ha elegido esta notación (P.1.1), para distinguir los modelos de Soons y Cresto de los propios.

Donde la submatriz SR incluye los factores de escala y rotación, y no es ortogonal; la submatriz t representa los errores de “cero” cuando es relevante manejarla.

Estableciendo condiciones de ajuste, es posible obtener entre otras, las correlaciones mostradas en los gráficos 4.4 a 4.6 siguientes

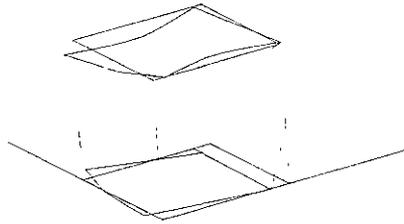


Figura 4.4. Minimización de todas las diferencias medidas menos modelo.

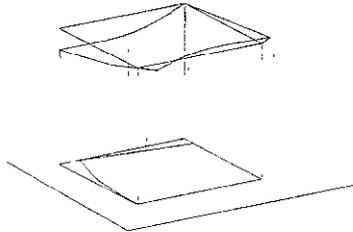


Figura 4.5 Minimización de todas las medidas, con preponderancia de ajuste en plano inferior.

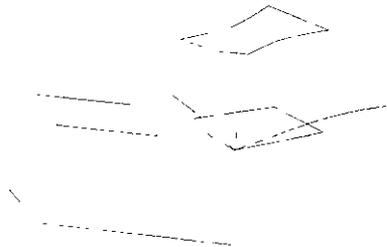


Figura 4.6. Aproximación y proyección de medidas de un objeto (medidas) deformable en un sistema deformable, a un objeto ortogonal (modelo) en un sistema perfecto desplazado y no paralelo.

Las cuatro formas de representación son empleadas, dependiendo de la forma de presentar resultados de una calibración, de la corrección de una medida o del modelado de errores; por ejemplo frecuentemente se privilegia el eje X para representar ortogonalidad, o se elige el plano x - y para representar la deformidad de mediciones de un cubo

4.4.3.2 Instrumento no lineal segmentado

La representación de errores no lineales en el cubo de medición puede efectuarse discretizando el espacio, su administración puede seguir varios protocolos, pero para su estimación se eligen procesos lineales de interpolación para todo un cubo interior. Su representación puede ser la de la figura 4.7, con retículos delimitadores de fronteras y retículos de error mapeados en los primeros. Carl Zeiss emplea este proceso

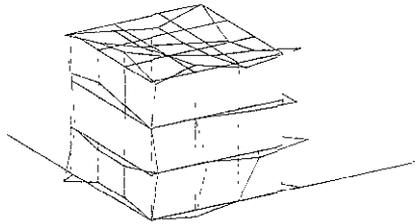


Figura 4.7 Cubo segmentado, edición de segmentos, y correlación lineal de medidas y valores absolutos dentro de cada segmento.

4.4.3.3 Instrumento no lineal senoidal

Un modelo de correlación para varios ciclos de variaciones a lo largo del intervalo de mediciones se puede efectuar con polinomios de grado creciente, así un polinomio de grado dos representaría una curvatura, de grado tres representaría dos curvaturas y un punto de inflexión, etc. Por el principio de operación de algunas máquinas, es probable que presenten errores periódicos de gran amplitud, entre otros, para estos casos, si éstos son sobresalientes pueden montarse funciones seno (ó coseno) sobre funciones lineales, y así representar el mejor ajuste de los errores de las máquinas. Las funciones típicas en una y tres dimensiones son:

$$\Delta x = A + Bx + C \text{sen}(Dx + E)$$

$$\text{ó} \quad \text{(P 2 1)}$$

$$x_m = A + Bx + C \text{sen}(Dx + E)$$

y

$$\begin{aligned}
 x_m &= A_1 + B_1x + C_1 \text{sen}(D_1x + E_1) + F_1x + G_1 \text{sen}(H_2y + I_1) + J_1x + K_1 \text{sen}(L_1z + M_1) \\
 y_m &= A_2 + B_2x + C_2 \text{sen}(D_2x + E_2) + F_2x + G_2 \text{sen}(H_2y + I_2) + J_2x + K_2 \text{sen}(L_2z + M_2) \quad (\text{P.2.2}) \\
 z_m &= A_3 + B_3x + C_3 \text{sen}(D_3x + E_3) + F_3x + G_3 \text{sen}(H_3y + I_3) + J_3x + K_3 \text{sen}(L_3z + M_3)
 \end{aligned}$$

Que son sumamente moldeables a gran variabilidad de conjuntos de datos [3]
 Las constantes se calculan anidando las funciones (P 2) en una función que explote un principio de calibración, por ejemplo invariabilidad de longitud de una barra con extremos esféricos.

$$\sum_{i=1}^n [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2] = \sum_{i=1}^n L^2 \quad (\text{P 3})$$

y empleando un proceso de solución de sistemas no lineales, por ejemplo del descenso más rápido de Faires Burden [4]

Efectuando un proceso inicial de ajuste lineal y luego el no lineal se tiene un diagnóstico.

$A_{1,2,3}$ Representan los errores de cero (escala promedio desplazada)

$$\begin{aligned}
 x_m &= B_1x + F_1x + J_1x \\
 y_m &= B_2x + F_2x + J_2x \\
 z_m &= B_3x + F_3x + J_3x
 \end{aligned}$$

Permiten calcular errores de escala y ortogonalidad;
 no se pueden extraer directamente de las funciones de Euler, pues no es matriz ortogonal

C_i de (P.2.2) se aproximarían a la amplitud de los errores de rectitud para los desplazamientos en x , las constantes G_i se aproximarían a los errores de rectitud para los desplazamientos en y , y las constantes K_i se aproximarían a los errores de rectitud para los desplazamientos en z .

La función $C_1 \text{sen}(D_1x + E_1)$, representaría errores no lineales de escala x .

Los valores $\frac{\partial x}{\partial y}, \frac{\partial x}{\partial z}$, , representaría errores de cabeceo de x en planos $x/y, x/z$ respectivamente

Para una correlación inversa, no sería posible despejar la variables x, y, z de (P 2.2), por lo que se tendrían que obtener por un nuevo proceso de ajuste no lineal. Los resultados de este proceso son similares a la figura 4.8 [3]

Este modelo de calibración, que correlaciona en forma directa varios errores, interpreta como constantes o extruidos los errores ortogonales ($x/y, x/z$, etc.), cosa que no ocurre en la realidad

por estar presentes los fenómenos de Abbe. Cuando medidas hechas cerca de guías manifiestan poco error después de los ajustes, se pueden aproximar los errores de cabeceo a las derivadas de las funciones seno.

Aunque no se incluyen más términos y representar errores de un segundo armónico, se tiene la justificación de no emplear exactitud ociosa.

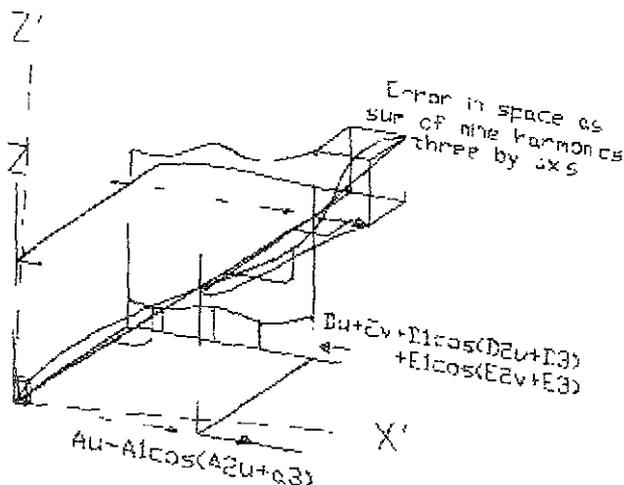


Figura 4.8 Correlación de posición (cubo mayor) y error (cubo menor) en un espacio tridimensional.

Los modelos presentados en estos antecedentes cumplen con los objetivos de: poder correlacionar por funciones simples las medidas y los valores absolutos; solucionarse por procesos del dominio público, representarse por primitivas CAD aproximadas (spline para senoides), ser reversibles (obtener $x = f(x_m)$). Resta obtener un modelo que incluya errores de cabeceo, efectos de Abbe, y acepte variabilidad no periódica de deformación de guías y escalas.

4.4.4 DESARROLLO DE UNA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS VIRTUAL NO LINEAL, DE ERRORES LIBRES E INTERFACES CAD

El instrumento desarrollado en esta investigación abarca 5 aspectos. Elección de modelos de error, elección de primitivas y soporte CAD, desarrollo de interfaces de manejo de medidas y errores, desarrollo de algoritmos de administración de datos numéricos, metodologías de diagnóstico de instrumentos.

Inicialmente el instrumento y sus interfaces se desarrollaron para una máquina bidimensional; posteriormente se desarrollaron los modelos para su manejo en 3D, donde los principios 2D son aplicables, y finalmente parte de los iconos para la creación de una interface 3D no lineal con ocultamiento de líneas. La interface 3D se encuentra actualmente en proceso de

desarrollo, sin embargo, aún se puede obtener la información tridimensional a partir de la información 2D administrada correctamente.

4.4.4.1 Elección de modelos de error.

Se han elegido los modelos paramétricos β -spline en lo sucesivo b-spline, ó pline (primitiva de Autocad) de los que los modelos de Bezier, constituyen el elemento básico. Las características más sobresalientes de estos modelos son a) son modelos paramétricos cuyos parámetros varían entre cero y uno ($0 \leq u \leq 1$) b), b) quedan definidos por ecuaciones de interpolación entre las posiciones de puntos o vértices de control, c) el grado de los polinomios y su *función de influencia* son variables, d) pueden construirse funciones de formas abiertas, periódicas, editables, cerradas, con distintos grados de polinomios, y con distintos arreglos de vértices, e) son continuas y derivables. La continuidad y derivabilidad sin embargo les permite representar funciones discontinuas en el espacio como es el caso de splines de grado 2, con cadenas de vértices donde coinciden tres o más

Un atributo no reportado por aplicaciones de splines, y empleado en esta investigación es la de asociar a los valores paramétricos valores geométricos que permiten mapear uno en el otro, y explotar en algunas aplicaciones el mapeo de valores absolutos de medidas sobre medidas reales

Para la representación de un alambre el polinomio es:

$$p = uV \quad (P 4)$$

donde.

p es la matriz columna de n puntos x, y en el plano, ó x, y, z en el espacio

u es la matriz $n \times 4$ de coeficientes paramétricos $[(1-u) \ 3u(1-u)^2 \ 3u^2(1-u) \ u^3]$

V es la matriz columna 4×1 elementos de vértices o puntos de control x, y , planos de x, y, z en el espacio que moldean el alambre

Este alambre nos permite representar error de guías y/o distribución de escalas. Ver figura 4.9

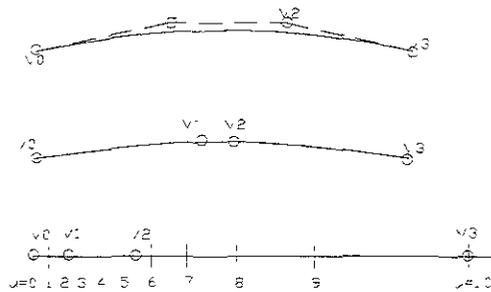


Figura 4.9. Representación de forma o distribución escalar por b-splines.

Y la representación de superficies por Bezier es:

$$p = uVw \tag{P.5}$$

donde: p es la matriz columna de n puntos x, y, z en el espacio.

u es la matriz $n \times 4$ de coeficientes paramétricos: $[(1-u)^3 \ 3u(1-u)^2 \ 3u^2(1-u) \ u^3]$

V es la matriz 4×4 elementos de vértices o puntos de control x, y, z en el espacio, que moldean la superficie.

w es la matriz $4 \times n$ de coeficientes paramétricos: $[(1-w)^3 \ 3w(1-w)^2 \ 3w^2(1-w) \ w^3]^T$

y su representación geométrica.

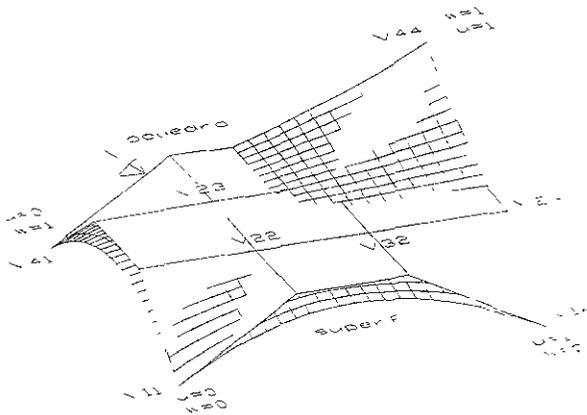


Fig. 4.10. El modelo de superficie Bezier grado tres permite moldearse con alta exactitud a cualquier segmento continuamente variable, recurriendo a la edición con continuidad si la exactitud lo requiere.

Aunque los elementos más moldeables son los polinomios paramétricos racionales o NURBS, éstos no están disponibles en los ambientes CAD libres, y plantean problemas serios de solución algebraica. Atendiendo a la economía del software, al fácil acceso de sus datos técnicos e intercambiabilidad con ambientes externos, se elegirán alambres o superficies Bezier de grado tres (alambre o superficie), para representar guías y escalas, atendiendo a que a partir de este modelo y grado, todas las representaciones de sólidos deformes y de funciones de error continuamente variables, son posibles. Para la representación de elementos lineales se elegirán primitivas usuales como línea, superficies de tres o de cuatro vértices, cubo, esfera, u otros elementos si fuera el caso.

Elección de infraestructura CAD

El instrumento llamado "mc-virt01.dwg" (máquina virtual 1) es construido sobre ambiente Autocad versión 10, de Autodesk, por ser un ambiente lo suficientemente completo para los propósitos de ingeniería de este proyecto, por estar basado en sistemas operativos DOS, por no requerir de accesorios o pago de licencias por uso, por que reconoce códigos de texto "*.dxf" y "*.scr" bastante conocidos o fáciles de interpretar, porque produce archivos de gráficos "*.plf" y "*.adi", bastante universales para la generación de documentos en windows, porque la sintaxis de creación de objetos es compatible con 3D Studio para la simulación por realidad virtual.

Características adicionales de Autocad V 10 de interés de relevancia en este proyecto son.

Es un ambiente en el que se puede especificar la exactitud de sus elementos geométricos, de su aritmética, y permite efectuar ampliaciones (zoom), a fin de verificar exactitud geométrica.

Permite obtener relaciones geométricas entre elementos.

Permite realizar operaciones de ampliación, giro, puntos de vista, ocultamiento de líneas, almacenamiento de imágenes.

Permite construir secuencialmente trazos, y presentar imágenes programadas, interrumpir y continuar secuencias, lo que es útil para describir procesos.

Permite conmutar el control del programa a programas externos, lo que facilita el análisis y e intercambiabilidad de datos.

Una característica de Autocad es que no proporcionan información exacta continua del paso del alambre, no proporciona información exacta de sus derivadas, ni de los valores paramétricos, ni es reversible, es decir no ajusta splines a nubes de puntos. La única información exacta es la de vértices y cercanía de alambres rectos con otros puntos.

4.4.4.2 Elección y manejo de primitivas del instrumento virtual en un espacio bidimensional

Splines. El elemento clave descrito para la construcción de elementos de deformación libre es el alambre b-spline cúbico, que en ambientes Autocad es conocido como *pline* en espacios planos y *3dpline* en espacios 3D, que para éste propósito sirve como guía de los carros o móviles que sostienen a los otros móviles o instrumentos de palpación. Los atributos de este elemento geométrico en esta aplicación son:

Editabilidad. En nuestro caso, se ha elegido como característica del instrumento la posibilidad de moldearlo después de creado, simulando la posibilidad de ensayar métodos de medición y calibración con distintas máquinas; su deformación es libre, se efectúa sobre ambiente autocad, y un proceso externo busca en los archivos desarrollados por autocad las nuevas formas (busca las nuevas posiciones de vértices) para construir la MC virtual correspondiente. El segmento de programa empleado es *ext-verts* [4] y se le invoca como subrutina en el programa principal que se describirá posteriormente; el modo de intercambio es por archivos *entiti.dxf*,

Dando la posibilidad de construir guías tan diferentes como lo muestra la figura 4.11.

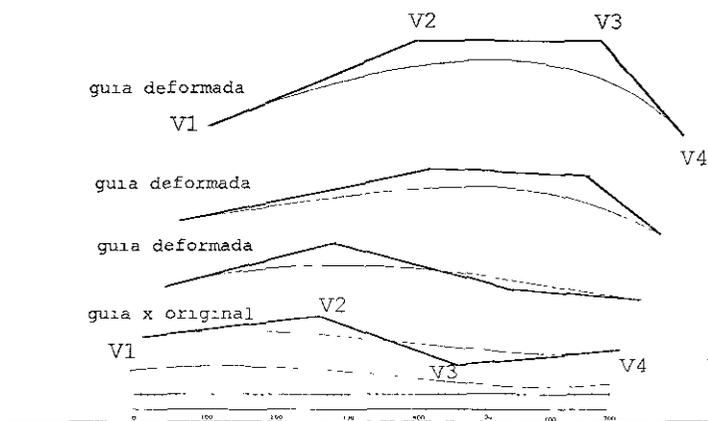


Fig.4 11. Manipulación de b-splines para representar guías de deformación libre de cualquier máquina virtual, potencialmente real.

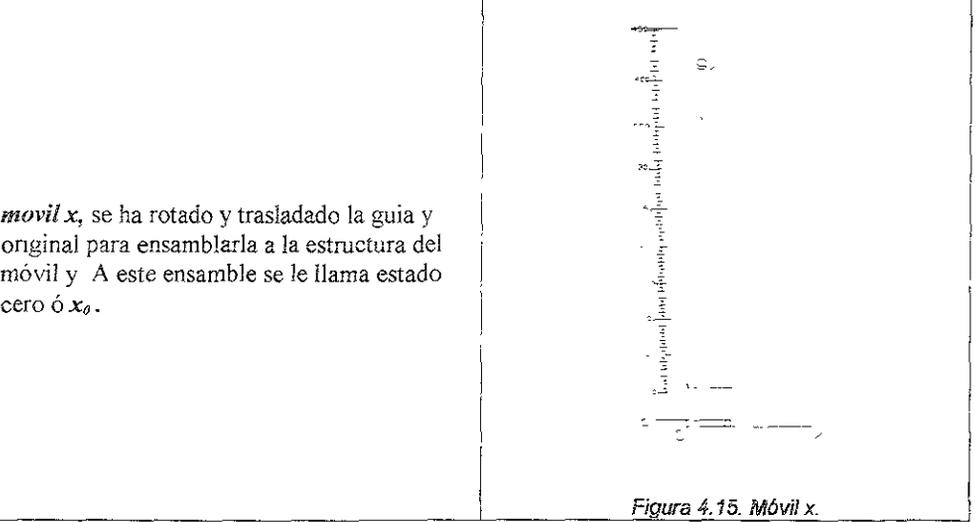
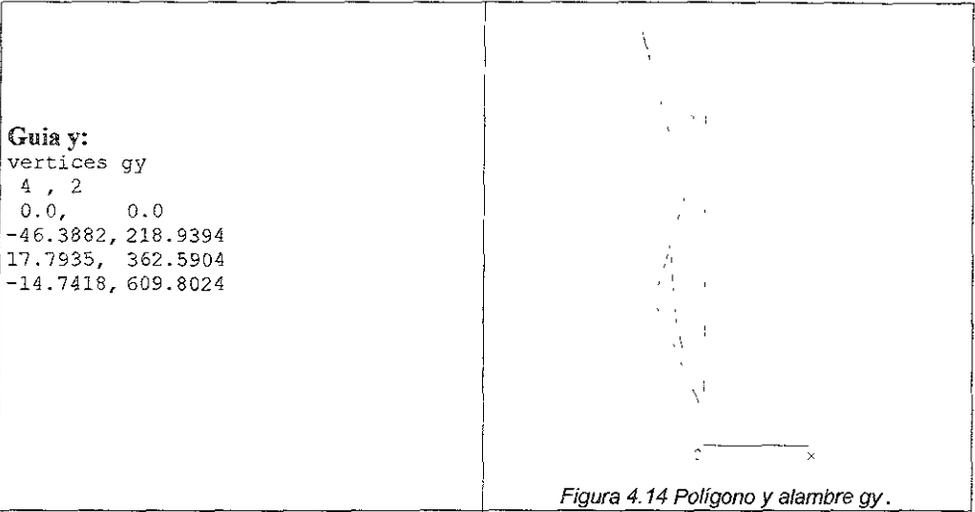
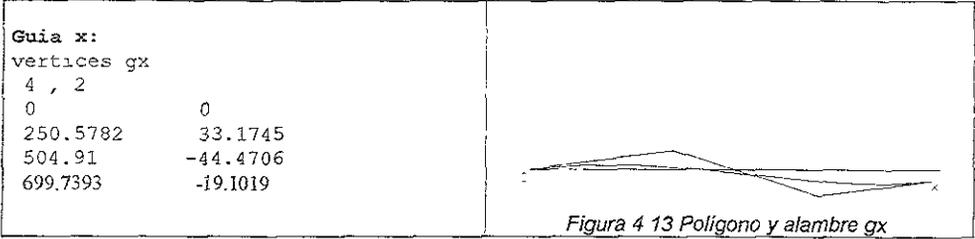
Soportabilidad Para la localización de otros elementos se necesita conocer posición exacta¹ e inclinación, obteniéndose ésta última de P.4

por arreglos 3D de vértices según un orden (CCW para las caras que se ven y CW para las caras que no se ven), o por arreglos de arreglos que se almacenan e invocan con contraseñas de posiciones y orientaciones. Su invocación puede hacerse desde operación en tiempo real o en construcción programada por archivos "*.scr". En este caso particular se crearon como bloques a:

- framex.dwg.* Consiste en el trazo amarillo que representa el medio de soporte de la guía x y su escala, así como la propia guía y escala.
- movilx.dwg.* Consiste en los cuerpos rígidos que se deslizan sobre la guía x : guía y , soporte de la guía y , escala y , y nonio de lectura y .
- movily.dwg.* Consiste en el carro de palpación, que se mueve sobre la guía y , su nonio y su puntas de palpación.
- escalas.x, y.dwg* Estas son trazos "libres", cuya distribución se puede aproximar por una correlación cúbica, en el caso particular y para fines de sencillez, se eligió la distribución cúbica de los valores paramétricos de los modelos de guías. Podrían haberse elegido escalas totalmente libres, pero se tendría que crear la función cúbica de correlación, u otra correlación de más alto grado, en virtud de lo caprichoso de esa distribución.
- patron2d.dwg* Consiste en un bloque de 64 círculos, que se asemeja al patrón bidimensional de vidrio desarrollado en el Centro de Instrumentos, cuyo concepto es ampliamente usado para los propósitos de calibración. El **Patrón** además consiste en una base de datos que se invoca desde los ambientes de correlación y desde la interface numérica-gráfica que se describirá después.
- patronl.dwg* Consiste en el trazo "exacto" de escalas, que se invocan desde autocad y permiten "Calibrar" o evaluar escalas de forma directa o absoluta. Su función sería equivalente a la de un laser de calibración de errores fuente de escala. Se puede rotar y trasladar para compararse con escalas x ó y .

4.4.4.3 Ensayo numérico cinemático de transformaciones de elementos de diseño del instrumento virtual:

Diseño original de partes.



Móvil y

El punto de referencia es la intersección del nonio con la línea de soporte y deslizamiento del patín



Figura 4.16 Móvil y.

Ensamble en la posición paramétrica 0, 0

FrameX

La estructura básica llamada *framex* se inserta tal cual, y se integra con la *escala x*, y con la *guía x*

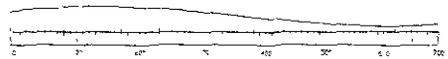


Figura 4.17 estructura base.

móvil x, (incluye guía y y escala y)

Se calculan las posiciones e inclinación para los valores paramétricos 0,0 de la escala x y guía x respectivamente, que son.

$$(x_{escala}) = 0$$

$$(x, y)_{guía} = 0, 0$$

inclinación *guía-x*.

$$(x/y) = 7.5416^\circ = 0.1316 \text{ rads}$$

la matriz de transformación

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(7.5416) & T(0) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}$$

se aplica a móvil x, a partir de datos de diseño.



Figura 4.18. Ensamble de móvil x transformado

Móvil y

Se calculan las posiciones e inclinación para los valores paramétricos 0 de la *escala-y* y *guía-y* respectivamente, que son

$$(y_{escala}) = 0$$

$$(x, y)_{guía y} = -7\,875, 59\,481$$

inclinación *guía-y*:

$$(x/y) = 113\,8121^\circ = 1.9864 \text{ rads}$$

la matriz de transformación

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(113\,8121) & T(0) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}$$

se aplica a *móvil-y*

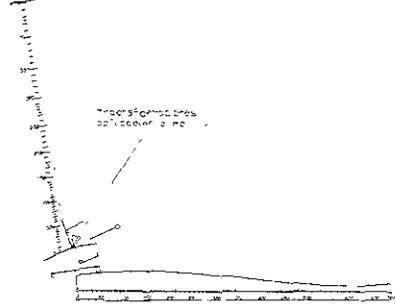


Figura 4.19 Ensamble de móvil y transformado

Palpador:

Las coordenadas de palpador definidas en el diseño son ahora las coordenadas del palpador en el espacio llamado por nosotros "absoluto" o de coordenadas absolutas. En este caso se han elegido como coordenadas absolutas las coordenadas de diseño de partes en Autocad, pero se pueden establecer correspondencias lineales entre estas y otros sistemas de coordenadas, como traslaciones o rotaciones, lo importante es tener disponible un sistema de coordenadas de referencia o absolutas y un sistema de coordenadas real de mediciones

Ensamble en posición paramétrica 0.7, 0.5**móvil x, (incluye guía y y escala y)**

Se calculan las posiciones e inclinación para los valores paramétricos 0.7

$$(x_{escala}) = 490$$

$$\text{inclinación } \textit{guía-x} (0.7) = 85.6267^\circ$$

$$\begin{bmatrix} x_7 \\ y_7 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(85\,6267) & T(490) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}$$

se aplica a *móvil x*, a partir de datos de diseño.

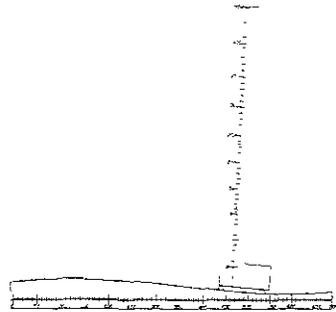


Figura 4.20. Móvil x transformado.

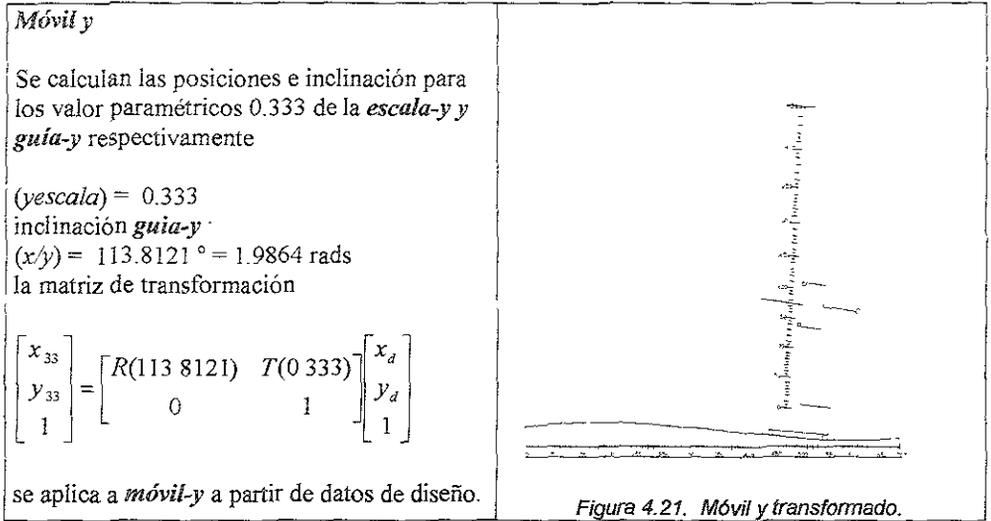


Figura 4.21. Móvil y transformado.

4.4.4.4 Exactitud del instrumento virtual.

Una intención principal de este proyecto consiste en desarrollar o simular la posibilidad real de que tal instrumento exista, y cumpla con las condiciones de ensamble “exacto” y lectura exacta para las condiciones actuales de la MMC en particular. **La utilidad de este objetivo apunta al convencimiento de técnicos, científicos y autoridades de calibración acerca de la correcta interpretación de la información obtenida de ensayos de calibración.** Se pueden observar tres áreas de exactitud geométrica para tal instrumento deforme:

4.4.4.5 Exactitud de posiciones: Estas se verifican llevando el instrumento virtual a cualquier posición y verificar que las posiciones y orientaciones de guías y bloques coincide con la proporcionada por autocad, cuando éste se ha configurado para reportar la exactitud correspondiente (al menos seis cifras significativas, mas de 256 trazos para splines, y ampliificaciones de 1 mm² por pantalla). En este sentido la información resumen que verifica la exactitud de todo el arreglo es la posición final del palpador. Ejemplo numérico:

Llevar la máquina a la posición 400, 300 (valores medidos):

Posición de palpador por cálculo cinemático 630.290, 212.058

Invocando en Autocad “id”, point> “cen” > 630.29003, 212.05775

Marcando diferencias menores de 0.2 micrómetros.

4.4.4.6 Exactitud de escalas. El cálculo cinemático que se efectúa al invocar: "shell" c:\> "tr 490, 175" transforma *móvil x* y *móvil y* de tal manera que sus escalas apuntan realmente a esa posición (guía y escala son no lineales), como puede apreciarse en las ampliificaciones 4.22 a 4.26 siguientes.

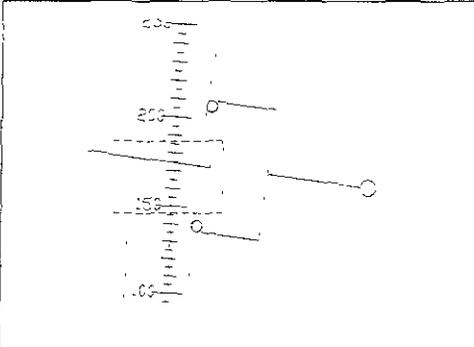


Figura 4.22. Amplificación de la región de lectura de escalas: intersección de nonio y eje de escala.

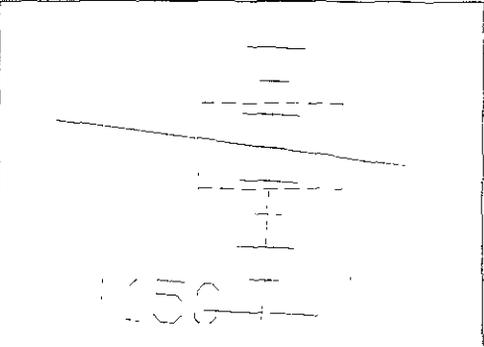


Figura 4.23. Siguiete ampliificación

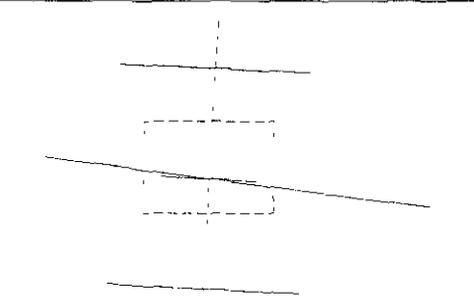


Figura 4.24. Siguiete ampliificación.

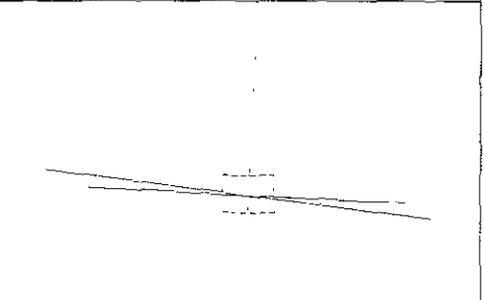


Figura 4.25. Siguiete ampliificación.

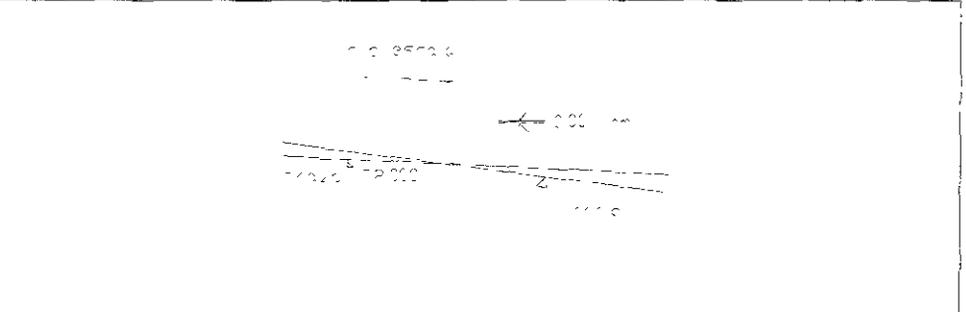


Figura 4.26. Amplificación de 640:1; aún no se aprecia el error de posicionamiento en escala

4.4.4.7 Exactitud de ensambles. De acuerdo a las consideraciones de dependencia entre rectitud y cabeceo de guías, la normal del punto medio de centros baleros del carro, coincide con la normal de la guía para ese punto. Esto será cierto para segmentos planos o circulares, pero no para curvaturas variables. El error de ensamble puede sin embargo ser de segundo orden. Este error puede estimarse por los procedimientos CAD usados previamente, aplicados al ensamble del *móvil* y observados en los gráficos 4 27 a 4 30

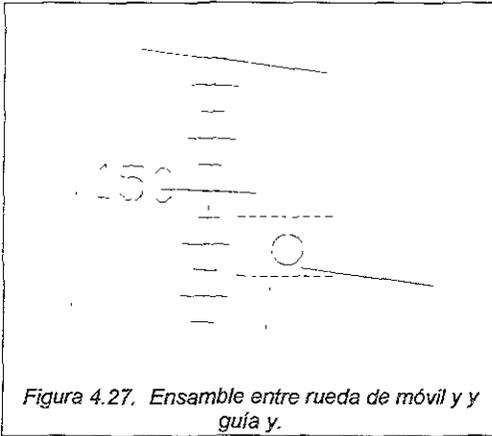


Figura 4.27. Ensamble entre rueda de móvil y guía y.

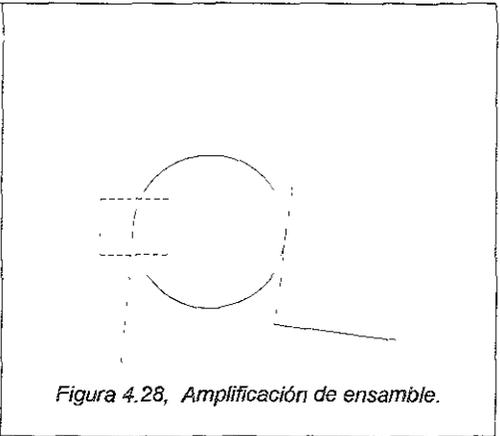


Figura 4.28. Amplificación de ensamble.

Los errores de impactación de ruedas y guías por no linealidad de curvatura, se pueden superar sin embargo siguiendo procesos de cálculo fino de ensambles con los mismos métodos de transformaciones cinemáticas seguidos hasta ahora

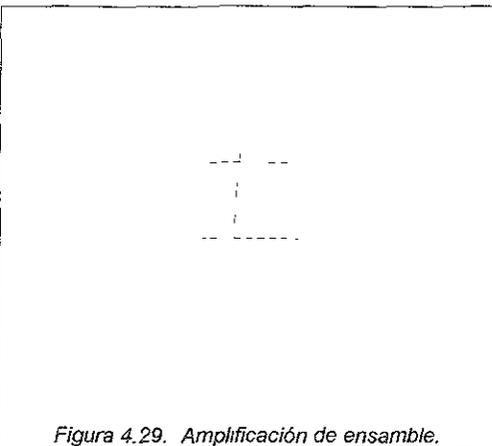


Figura 4.29. Amplificación de ensamble.

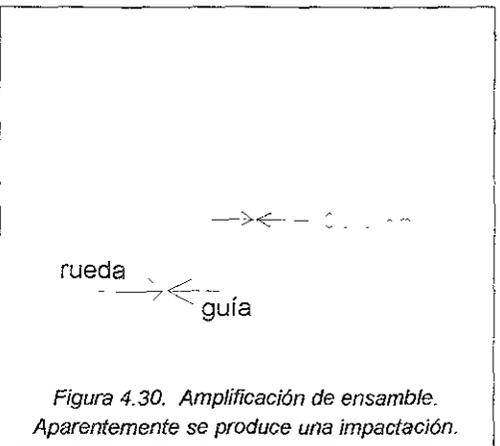


Figura 4.30. Amplificación de ensamble. Aparentemente se produce una impactación.

No se considera necesario para esta interfase y probablemente para ninguna el ajuste fino (en segundo orden) de ensambles, tomando en consideración además que los errores de rectitud de éste instrumento virtual se han amplificado 15,000 a 60,000 veces respecto de los originales

4.4.5 Interface numérica de cálculo de posiciones

Cuando se ha completado la construcción de la MMC virtual, ésta se puede operar dentro del ambiente autocad si se tiene un ambiente externo de transformaciones

4.4.5.1 Ambiente externo de transformaciones “tr2.exe”.

El programa “tr2.exe” se invoca desde Auocad invocando secuencialmente las instrucciones

Command> “shell”

C \> “tr2 xxx,yyy” donde xxx, yyy son las posiciones de lecturas a trasladar
Al término del programa, este regresa el control a Autocad, se invoca el comando

C \> script”

C \> <mc-vrt01> “enter” Se creó un programa de texto llamado *mc-vrt.scr* que incluye las transformaciones. Se puede verificar la exactitud de transformaciones por amplificación.

El álgebra empleada en tr2 es la siguiente

Se desea obtener la posición paramétrica de u para una lectura p conocida de la función:

$$p = uV \quad (P 4) = (P 7)$$

que es una relación no lineal

Se aproxima linealmente u $u_0 = \frac{p}{p_{max}}$ (P 8)

1 Se obtiene el error de p $\Delta p = p(u_0) - p$ (P 9)

2 Se calcula la sensibilidad de p $S_p = \frac{\hat{\partial} p}{\hat{\partial} u}$ (P 10)

3. Se recalcula u . $u_1 = u_0 - \frac{\Delta p}{S_p}$ (P 11)

Se repiten recursivamente los pasos 1 a 3 hasta que Δp está dentro de tolerancia

Para los valores paramétricos obtenidos se calculan las transformaciones como se explicó en el ensayo numérico

Se crea un programa de texto *.scr aceptado por autocad que incluye el diseño de piezas transformadas

Al regresar a Autocad se observa el nuevo dibujo

Hasta este punto se ha desarrollado el instrumento virtual básico para representar medidas en el espacio 2D y sus lecturas. A fin de facilitar su uso, generación y administración de datos, se ha desarrollado una interface de operación y administración de datos

4.4.6 INTERFACE NUMÉRICA GRÁFICA DE OPERACIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE DATOS

A fin de dar cumplimiento a los objetivos del proyecto.

- i) Que es necesario probar el grado de bondad de modelos de corrección de medidas y de sus soluciones particulares, en pruebas de "ciego", a través de poblaciones abundantes de medidas realmente posibles.
- ii) Que la aplicación del método de calibración de instrumentos virtuales, deberá tener una equivalencia física con las metodologías de calibración",

se creó un recurso que permite obtener poblaciones abundantes de lecturas, según las prácticas metrológicas usuales, a fin de obtener las poblaciones de lecturas que permiten simular los procesos de calibración, corrección o diagnóstico

La interface es un programa cuyos atributos principales son

Crea iconos gráficos en pantalla equivalentes a

Guía X

Carro X

Columna o guía Y

Móvil y, y dispositivo de palpación

Consola de lecturas

Consola de posiciones absolutas o de calibración

Manipulador de movimientos

Botones de control: "Validar", "Infse Acad", y "Salir"

Obtiene la información de las bases de datos de guías x e y

Si se desea obtiene la información de Patrones.

Los íconos Carro X, Columna, y Móvil Y están animados de movimientos por medio de mouse, según la posición de control x ó y

Las posiciones de lecturas y posiciones reales son desplegadas en sendas consolas.

Pueden registrarse esas posiciones en bases de datos para su posterior utilización.

Puede invocarse la interface autocad y comprobar la equivalencia "exacta" entre lecturas y posiciones geométricas. Ver figura 4.31



Figura 4.31. Ambiente gráfico interactivo con bases de datos, herramientas de cálculo e interface autocad; ambientada con inserción de patrón bidimensional

4.4.6.1 Operación de la interface gráfico numérica

Principios empleados. De la misma manera que desde el ambiente autocad se puede invocar: Shell Tr2 xxx,yyy, calcular las nuevas posiciones e inclinaciones, y refrescar el dibujo para las nuevas condiciones, en este ambiente se están introduciendo por vía

"mouse" los incrementos a las lecturas, calculando las posiciones de móvil x e y , de manera continua, desplegándolas en las consolas, y animando de movimientos a los iconos para arreglos ensamblados ortogonalmente, pero que coinciden con la posición entera más próxima de la punta de palpación

Arranque La interface numérica gráfica se invoca desde un archivo de procesamiento por lotes llamados "mc-virt.bat" ó mc-ptm.bat", ya sea que se quiera visualizar o no el patrón empleado para calibrar o medir. Los archivos de procesamiento por lotes pueden a su vez invocar arreglos de patrones diferentes a los empleados en este ensayo

Estado. Se visualizará la máquina en la posición y con las lecturas en que se registró la última lectura antes de apagarse

Movimiento selectivo. Se llevará el mouse al icono de movimientos, y se escogerá la velocidad en dos ejes o por eje, localizando el mouse tan lejos de la cruz como velocidad se quiera imprimir. La variación de **velocidad es exponencial**, pudiendo controlar velocidades de diez milésimos de milímetro a decenas de milímetros cada segundo. La retícula rectangular central representa el límite logarítmico de movimientos 10 mm/sg

Validación. Al pulsar este botón, se crearán dos bases de datos cuyos nombres consistirán de "lct" + "hora" + " " + "día" formando dos palabras, por ejemplo: "lct1040 221" para el archivo de lecturas, y "vab1040 221" para el archivo de valores absolutos. Su información es

línea 1	Se abrió <i>tal archivo</i> a las 10:40 del 221 día del año.
línea 2	n, 2 dimensiones de la matriz
líneas 3 a n + 2	vectores x , y de lecturas

Interface Autocad. Al pulsar este botón (por mouse), se desencadenará un proceso que invocará a Autocad, y aparecerá el instrumento virtual descrito en el capítulo IV, en el estado en que se encontraba la interface gráfico-numérica a la última validación de lectura. Una vez dentro del ambiente Autocad, se podrá operar éste en forma normal, y al salir se reanudará la sesión abierta en "mc-ptm.exe"

Aspecto de posiciones.

El aspecto trazos de posiciones de móvil x (arreglo de base y columna) corresponde a las proyecciones x , y absolutas (restando la dimensión x del **móvil** y , y su proyección y absoluta), sin incluir su cabeceo.

El aspecto de posiciones del *móvil* x corresponde a las posiciones absolutas del palpador, sin incluir cabeceos

Para el trazo de ambos aspectos se han ajustado las posiciones al número entero más próximo de pixel de una pantalla VGA

Ventajas e interpretación de aspecto.

El aspecto elegido aparenta que el *móvil* x se impacta y flota sobre la *guía* x al moverse en dirección x ; su interpretación es el **desvío de rectitud de la guía** x

El aspecto de la columna al mover selectivamente el *móvil*- y , es que ésta oscila en dirección x ; su interpretación es el **error de rectitud de la guía** y . Cuando por algún otro proceso se han modelado y obtenido como resultados *gx.dxf*, *gy.dxf*, (archivos de guías), la interface numérico gráfica se comportará coherentemente con tales guías.

Se han evitado las simulaciones de cabeceo por la inversión de trabajo y tiempo computacional que requeriría y porque no se justifican dada la facilidad de interfacemiento con Autocad que ya lo hace

Salir. Al pulsar este botón se cerrarán los archivos abiertos, se grabará el último estado y se saldrá del archivo de procesamiento por lotes

4.4.6.2 ESCALAMIENTO Y MANEJO DE PRIMITIVAS DEL INSTRUMENTO VIRTUAL HACIA UN ESPACIO TRIDIMENSIONAL

Aplicando las ventajas de los modelos bidimensionales a espacios tridimensionales es posible escalar el instrumento a un espacio tridimensional con las siguientes modificaciones.

Elementos en espacio 2D	Elementos en espacio 3D
Escalas alambres planos con trazos normales según su distribución paramétrica Las matrices V de (P.4) son dos matrices: V_x , V_y , de 4×1	Escalas alambres tridimensionales con trazos normales según su distribución paramétrica Las matrices V de (P.4) son tres V_x , V_y , V_z de 4×1
Guías alambres planos con posición e inclinación variables	Guías superficies con posición e inclinación variables
Móviles polilíneas agrupadas	Móviles faces agrupadas
Patrones primitivas CAD bidimensionales	Patrones primitivas CAD tridimensionales

La operación de este instrumento virtual seguiría los mismos procedimientos 1 a 7.

- 1 Elección de posiciones escala a seguir

- 2 Cálculo de valores paramétricos correspondientes
3. Evaluación de posiciones y orientaciones de superficies en nuevas posiciones
- 4 Construcción de matrices de transformación
5. Aplicación de matrices de transformación a todos los elementos soportados.
- 6 Trazo de nuevos elementos soportados
- 7 Verificación de tolerancias geométricas de escala, ensamble, posición de palpador.

Ejemplificada en a los siguientes gráficos:

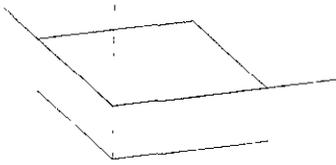


Figura 4.30. Diseño del mesa

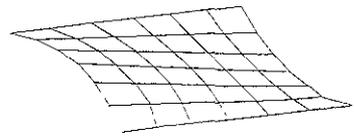


Fig. 4.31. Diseño de guía y

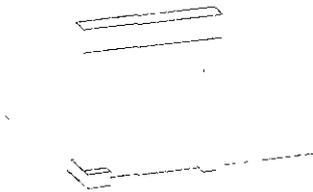


Figura 4.32. Diseño de puente

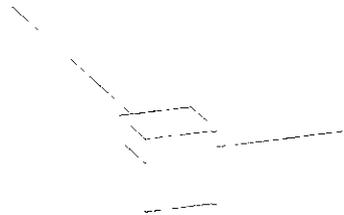


Figura. 4 33 Diseño de carro

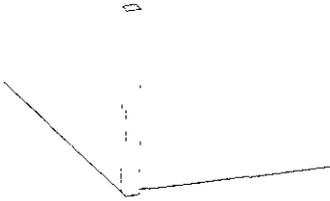


Fig. 4.34. Diseño de columna

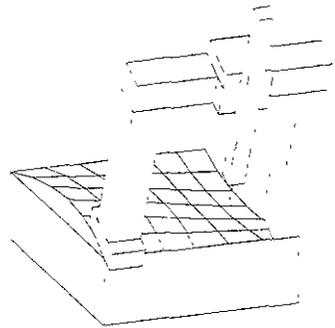


Fig. 4.35. Ensamble de partes

La interface de operación interactiva del instrumento 3D se encuentra en desarrollo. Ver figuras 4,36 a 4,439.

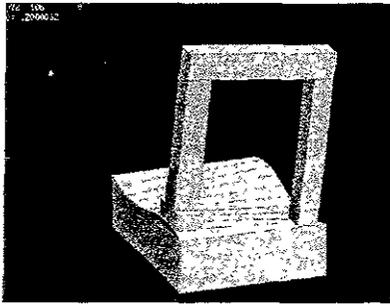


Figura 4.36. Posición de puente para desplazamiento 0.25 de y máx.

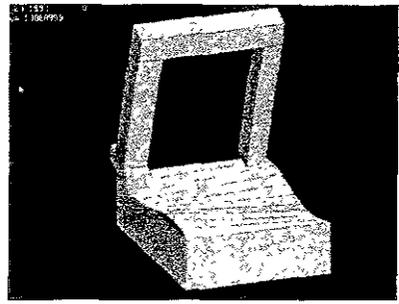


Figura 4.37. Posición de puente para desplazamiento 1.0 de y máx.

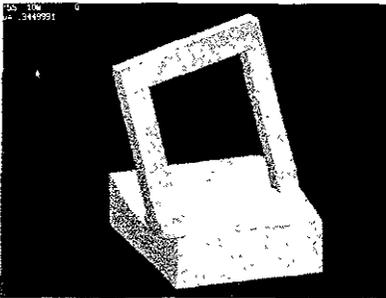


Figura 4.38. Posición de puente para desplazamiento 0.33 de y máx., con otro diseño de guía y.

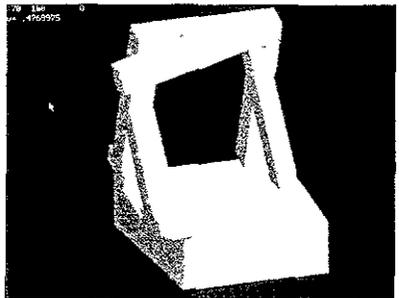


Figura 4.39. Posiciones de puente para desplazamientos 0.45, y 1.0 de y máx.

4.4.7 Reversibilidad.

Ordinariamente la reversibilidad de operación de instrumentos no se da, dados los problemas de reversibilidad comentados en los modelos de Soos y de Cresto, sin embargo se comentarán los procesos de reversibilidad de éste instrumento en el siguiente capítulo.

4.4.8 Códigos de programas.

Para la realización del instrumento virtual se han tenido que desarrollar formas, rutinas de cálculo, rutinas de graficación, rutinas de operación por mouse, formas CAD de patrones, etc. A fin de no distraer los objetivos de esta investigación, se han incluido resúmenes de código de esos procedimientos en el **APENDICE C CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN**

4.5 REFERENCIAS

- 1 J. A. Soons et al Modeling the errors of multi-axis machines. a general methodology. Precision Engineering Jan 1992, V 14, N 1 5 – 19
- 2 Selfcalibration with application to CMMs geometry error correction Pier Carlo Cresto. Advanced Mathematical tools in Metrology, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences N 16 World Scientific 1993
- 3 An alternative method for calibrating and mapping errors in CCM Sánchez José et al , Proceedings of XIII Word Congress, September 5 – 9, Torino Italy, 1676-1682
- 4 Análisis Numérico, Richard L. Burden, Cap IX, Soluciones numéricas a sistemas no lineales de ecuaciones Grupo Editorial Iberoamericana 1985

CAPÍTULO V

EMPLEO Y EVALUACIÓN DEL MODELO PROPIO

5.1 Consideraciones generales. La mayoría de instrumentos virtuales desarrollados por centros de investigación están enfocados a estimar o corregir algún aspecto de exactitud, éste se planteó como una herramienta de propósito general que cubre todas las expectativas de generación de medidas potencialmente reales, de propagación y reversibilidad de errores fuente sistemáticos. Si la confiabilidad de éste es aceptada dada su reversibilidad y posibilidad de representación 2D y 3D, puede convertirse en instrumento útil en procesos de evaluación de otros procedimientos, y aquellos que pretendiendo predecir nubes de error como función de propagación de incertidumbres fuente, pueden cometer el defecto de asociar valores menores de error en regiones donde los errores contribuyentes no se apegan a la esperanza estadística

Partiendo de la confiabilidad del instrumento, son propósitos de éste capítulo los siguientes.

- a) **emplear el instrumento como instrumento ordinario que produce medidas potencialmente reales, y emplear tales medidas potencialmente reales para establecer correlaciones de primer orden,**
- b) **emplear el instrumento en corrección de medidas y valores patrón, de forma directa reversible no recurrente,**
- c) **analizar la reversibilidad del instrumento, incluyendo fenómenos de Abbe (hacia guías),**
- d) **extrapolar su utilidad en calibración 3D.**

5.2 ENSAYOS DE MEDICIÓN Y CORRELACIONES LINEALES.

Para el ensayo de medidas de primer orden pueden emplearse las propiedades de invariabilidad de tamaño y forma de objetos, siendo los más simples el de distancia entre esferas separadas por barras de calibración, y la medición de patrones reticulares. Para ambos se diseñaron los formato de archivos de texto.

Patrones de forma	Consisten estos archivos en dos arreglos: a) patrones bidimensionales, representados por arreglos de círculos posicionados en 2D, según archivos DXF de ambientes CAD estándar, y b) como matrices 2D
Patrones de tamaño	Consisten estos arreglos en centros a pares de esferas de barras de longitud en arreglos matriciales 2D y 3D

5.2.1 Poblaciones de lecturas. En este reporte se incluyen como poblaciones de lecturas correlacionables las posiciones de un patrón bidimensional de 8 x 8 posiciones con separaciones de 50 mm entre posiciones, coincidiendo la posición inferior izquierda en la posición 200, 150 mm. de la máquina, según el arreglo de círculos verdes de la figuras 5.1 y 5.2. Los procedimientos y calibraciones por patrones de tamaño obran en poder del Centro de Instrumentos [1], [2].

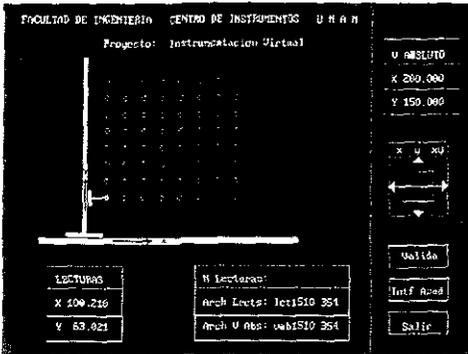


Figura 5.1. Proceso de medición en mc virtual.

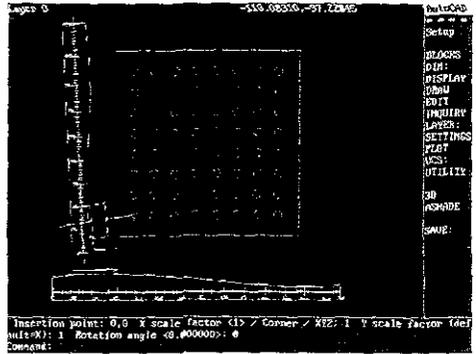


Figura 5.2 Equivalentes de medición en mc "real"

Las lecturas de las posiciones a tresbolillo (32)

Las lecturas de cuatro arreglos (uno por cuadrante) de cuatro posiciones cada uno

5.2.2 Modelos de correlación: Se estableció en el Capítulo III que el modelo a probar sería

$$\begin{aligned} \Delta x &= A + Bx + Cy + Dz \\ \Delta y &= E + Fx + Gy + Hz \\ \Delta z &= I + Jx + Ky + Lz \end{aligned} \quad (5.1)$$

Y que para una máquina bidimensional adopta las formas

$$\begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m & y_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & & \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m & y_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & & \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

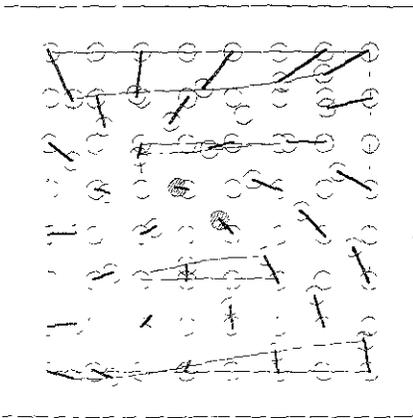
para sus errores y para su corrección, en coordenadas homogéneas respectivamente, donde: x_c = valor corregido, x_m = valor leído. Para poblaciones de lecturas

5.2.3 Solución de modelos de correlación:

Para un arreglo poblaciones dimensionalmente compatible, de menor tamaño o defectuosa, igual, o de mayor tamaño que el orden de la matriz a solucionar, se tiene el riesgo de tener arreglos mal acondicionados, singulares, o cercanos a la singularidad, de donde los métodos algebraicos tradicionales pueden proporcionar soluciones defectuosas, un método de solución bastante inmune a estos ofrece soluciones probables, soluciones exactas, o soluciones por mínimos cuadrados, por el recurso de la descomposición del valor singular [3]

5.2.4 Resultados de correlaciones

Las lecturas de las posiciones a tresbolillo (32) y medidas absolutas están graficadas en la figura 5 3 su correlación es la matriz 5.3. La corrección es aplicada por la correlación inversa 5.4, y la apreciación gráfica de su mejora en la figura 5.4.



$$[x_m \ y_m \ 1] = [x \ y \ 1]M \quad (5.3)$$

$$M = \begin{bmatrix} 4.060315E-03 & -1.07588 & 1.797402E-02 \\ 3.926114E-04 & 9595624 & -1.737925E-03 \\ 2269901 & 3141587 & -4.835287E-03 \end{bmatrix}$$

Figura 5 3 Sobreposición de valores absolutos y medidas

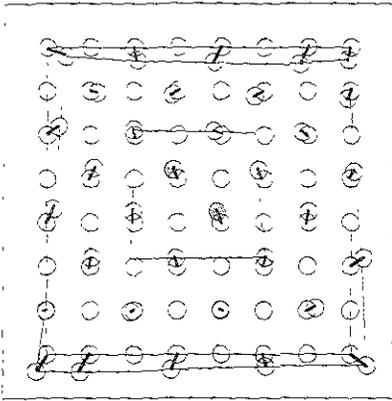


Figura 5.4. Corrección de medidas por correlación lineal

$$[x_c \ y_c \ 1] = [x_m \ y_m \ 1]M^{-1} \quad (5.4)$$

$$[M]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.178499 & -127963 & 4.423782E-09 \\ .1130182 & 1.16886 & 5.820766E-09 \\ 62.66706 & 69.93611 & 1.000001 \end{bmatrix}$$

Donde x_m, y_m son medidas corregidas

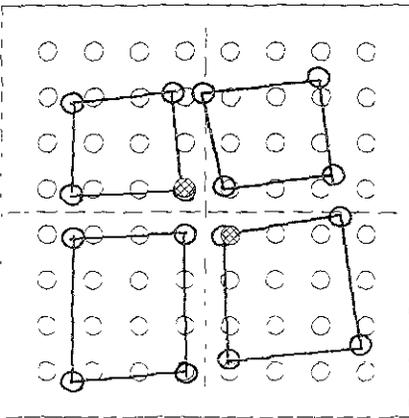


Figura 5.5 Sobreposición de valores absolutos y medidas para arreglos en cuadrantes.

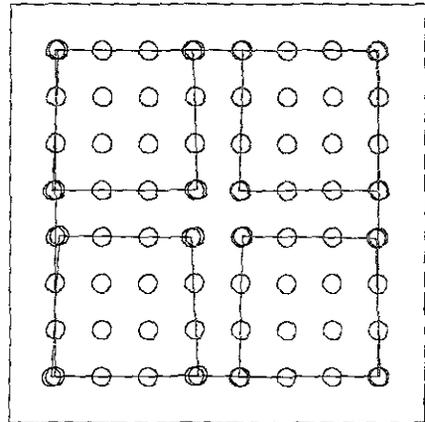


Figura 5.6 Corrección segmentada con correlaciones $M1^{-1}, M2^{-1}, M3^{-1}, M4^{-1}$ para cuatro cuadrantes.

5.2.5 Bondad de correlaciones

Estimando que los errores fuente de la máquina virtual varían de los 0 a los 29 mm para escala, de los 0 a los 25 mm para rectitud, de los 60 para ortogonalidad, es de esperarse que en su combinación se tengan errores individuales propagados de más de 56 mm, mínimos de 6, y promedio aritmético de 32 y logarítmico de 18, como efectivamente sucede entre objeto y su reconstrucción sin procesamiento. Ver figura 5.3.

Al aplicar la primera correlación, estos errores disminuyen a 20 mm para los peores casos, y a 1 mm para los mejores casos, obteniéndose una mejora que se estima entre 3 y 15 veces. Ver figura 5.4

Al aplicar la correlación segmentada, se obtienen errores límite de 1.59 mm, y se estima que para el centro de los cuadrantes será menor a 0.2 mm, por lo que se pueden estimar mejoras de 15 a 25 veces. Ver figuras 5.5 y 5.6

Un criterio de mejora promedio puede aplicarse por medio de cociente de normas cuadradas 5.5

$$Mejora = \frac{X_m - X_2}{X_c - X_2} \quad (5.5)$$

El significado de exactitud para máquinas industriales es que sus errores de rectitud, escala y ortogonalidad, que producen errores propagados de 25 a 3500 μm , se reducirán a 0.8 y 175 μm , lo que significa que las peores máquinas ascenderán en su clase entre uno y dos niveles

5.3 ENSAYOS DE MEDICIÓN Y CORRELACIONES NO LINEALES

Se pueden establecer varios tipos de correlación no lineal

5.3.1 Obtención de medidas absolutas mediante cinemática directa, por medio del instrumento, o por medio de las funciones y cadenas de propagación **cinemática ya analizadas en el capítulo anterior**.

5.3.2 Obtención de medidas a partir de posiciones absolutas por correlación algebraica directa.

Se tomó la población de medidas y sus correspondientes valores absolutos de las siguientes posiciones de la tabla 5.1

$x=0$ $y = y_{\max}$	$x = \frac{1}{3} x_{\max}$ $y = y_{\max}$	$x = \frac{2}{3} x_{\max}$ $y = y_{\max}$	$x = x_{\max}$ $y = y_{\max}$
$x=0$ $y = \frac{2}{3} y_{\max}$	$x = \frac{1}{3} x_{\max}$ $y = \frac{2}{3} y_{\max}$	$x = \frac{2}{3} x_{\max}$ $y = \frac{2}{3} y_{\max}$	$x = x_{\max}$ $y = \frac{2}{3} y_{\max}$
$x=0$ $y = \frac{1}{3} y_{\max}$	$x = \frac{1}{3} x_{\max}$ $y = \frac{1}{3} y_{\max}$	$x = \frac{2}{3} x_{\max}$ $y = \frac{1}{3} y_{\max}$	$x = x_{\max}$ $y = \frac{1}{3} y_{\max}$
$x=0$ $y=0$	$x = \frac{1}{3} x_{\max}$ $y=0$	$x = \frac{2}{3} x_{\max}$ $y=0$	$x = x_{\max}$ $y=0$

Tabla 5.1 Distribución de medidas a correlacionar por instrumento virtual

Obteniendo las poblaciones:

Lecturas		Valores absolutos	
Lecturas MC virtual el 11-07-00		Vals Abs MC virtual el 11-07-00	
16	2	16	2
0	0	92.7614	103.8922
233.333	0	361.0462	87.5063
466.666	0	600.3568	63.39394
700	0	792.7233	84.59128
0	149.9998	63.68886	225.6407
233.3333	149.9998	356.7879	212.6055
466.6666	149.9998	598.2256	188.5473
700	149.9998	763.912	206.4017
0	299.9998	51.35061	397.7729
233.3333	299.9998	378.958	383.7492
466.6666	299.9998	623.2999	359.2897
700	299.9998	751.943	378.5599
0	450	11.58359	631.1354
233.3333	450	386.4343	620.3578
466.666	450	634.7955	595.7371
700	450	712.6766	612.0072

Tabla 5.2 Medidas sobre instrumento virtual en las posiciones de la tabla 5.1

Tabla 5.3. Valores absolutos reportados por instrumento virtual o por valores de patrones.

A fin de establecer un proceso de correlación directa sin incluir la cinemática de mecanismos no lineales, se puede recurrir a la correlación $p = f(u, w, V)$, en que p son las posiciones absolutas, u, w son las posiciones de lecturas y V es un poliedro que moldea el parche de ambas, y no corresponde a los polígonos de guías

Las funciones a obtener para la correlación directa es (5.6) e inversa (5.7)

$$x = uV_x w \quad (5.6)$$

$$y = uV_y w$$

$$u = xV_x y \quad (5.7)$$

$$w = xV_w y$$

Obteniendo V_x, V_y, V_u, V_w poliedros, que permiten interpolar valores intermedios de todo el campo de medidas. Ver figuras 5.8 y 5.9

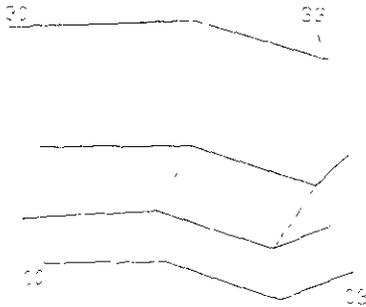


Figura 5.7 Poliedro V_x, V_y para mapear posiciones absolutas en función de medidas.

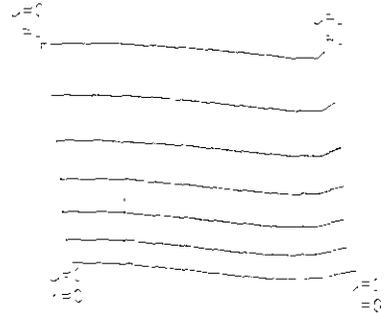


Figura 5.8 Medidas normalizadas interpoladas de V_x, V_y .

Es importante anotar que estos poliedros y sus límites no corresponden a los splines que moldean las guías, ni tienen la distribución paramétrica que esas; aunque existe cierta semejanza como se verá a continuación en el diagnóstico que incluye el fenómeno de Abbe. Para la obtención de V_x, V_y, V_u y V_w se puede recurrir a correlaciones SVD (singular Value Decomposition) [3].

Estableciendo las correlaciones se obtienen los poliedros V_u, V_w que permiten obtener la tabla 5.4 de lecturas interpoladas en función de los valores de la tabla 5.3 de valores absolutos, y V_x, V_y , que permite obtener la tabla 5.5 de valores absolutos interpolados a partir de la tabla 5.2 de lecturas

xm	$= [conv] * [x]$	$[ym]$	$= [conv] * [xm]$	$[x]$	$= [conv] * [xm]$	$[y]$	$= [conv] * ym$
16	1	16	1	16	1	16	1
2.241431E-03		1.449022E-03		92.76154		103.8923	
233.3288		-2.267074E-03		361.0448		87.50578	
466.6696		1.558007E-03		600.3558		63.39356	
700.0004		1.820676E-05		792.7234		84.5913	
4.730679E-03		150.004		63.68818		225.6396	
233.3408		150.0083		356.7931		212.6082	
466.6673		150.0011		598.2334		188.5515	
700.0071		150.0053		763.9125		206.4019	
6.839477E-03		300.0056		51.3501		397.7722	
233.3532		300.0167		378.9626		383.7517	
466.6826		300.0142		623.3077		359.2941	
700.0057		300.0039		751.944		378.5604	
-1.13131E-04		450		11.58355		631.1353	
233.3354		450.0046		386.4344		620.358	
466.6703		450.0057		634.795		595.7369	
700.0001		450.0002		712.6765		612.0071	

Tabla 5.4 Lecturas a partir de valores absolutos y correlación directa.

Tabla 5.5 Valores absolutos a partir de correlación directa.

Al comparar las tablas 5.2 y 5.4 se puede observar la reversibilidad con errores máximos de 5 micrómetros, así como al comparar las tablas 5.3 y 5.5. La reversibilidad de medidas y valores absolutos por procesos directos y no recurrentes (tanteos) queda demostrada.

5.3.3 Reversibilidad de errores fuente incluyendo fenómenos de Abbe, a partir de invariabilidad de patrones de forma.

El supuesto de los modelos estándar es que los errores de guías y escalas coinciden o se aproximan a los errores de forma y escala en los límites del espacio de mediciones, como puede suponerse al observar la figura 5.8; sin embargo esta idealización carece de validez cuando se tienen fuertes efectos de Abbe. La lejanía de guías y recorrido extremo de palpadores llega a ser de 40 % del recorrido total.

Puede apreciarse la semejanza de trayectorias para recorrido extremo inferior, y la forma de *guía-x*, sin embargo, apreciando el recorrido superior observamos intensificación de curvaturas en el extremo derecho. Siguiendo este criterio podría establecerse un criterio de extrapolación para deducir o aproximar el recorrido de *guía-x*. Ver figura 5.9. Los criterios de extrapolación sin embargo tienen que respetar las propias leyes del modelado geométrico, habiendo funciones imposibles de extrapolar al extremo deseado.

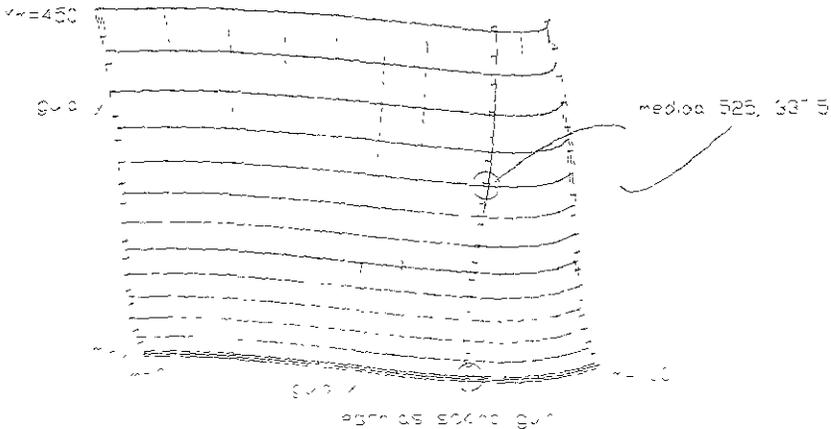


Figura 5.9 Máquina 2D con escalas y palpadores sobre ejes de guías, en que mapeo de lecturas y forma de guías coinciden.

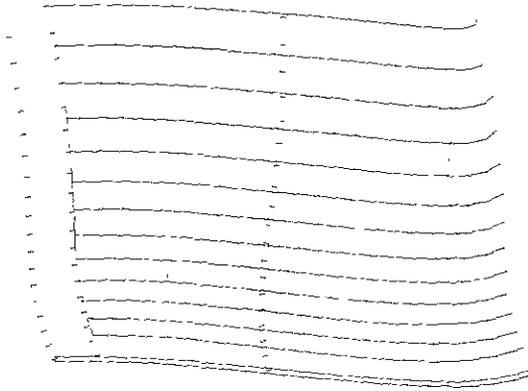


Figura 5.10. En el supuesto de tener guías cercanas al límite del espacio de mapeo, las guías pueden aproximarse por una extrapolación del espacio de medición.

Sin embargo, la extrapolación produce graves errores a la hora de interpretar errores fuente, pues no se cumplen condiciones cinemáticas de cuerpo rígido en los mecanismo o ensambles. Puede observarse en la figura 5.10 que el ángulo formado por trayectorias y x al inicio y al final no coinciden; razón por la cual no pueden interpretarse como guías las trayectorias

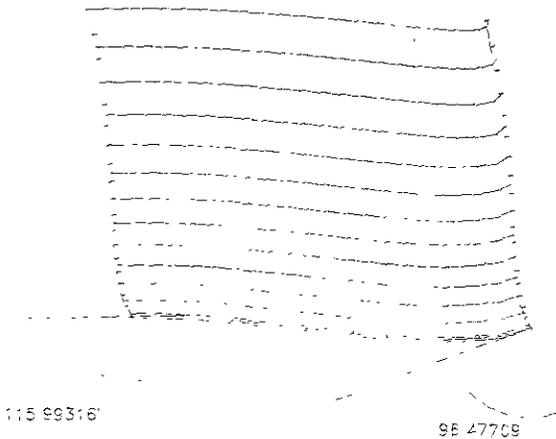


Figura 5.11 Variación del ángulo de ensamble de guías x y móvil x .

Las consideraciones a tomar en cuenta para definir el paso de guía es que los radios de curvatura de trayectorias son coincidentes, las trayectorias pueden estar desplazadas, y la separación normal entre guía y trazo $x = cte$ debe ser constante. Como puede apreciarse en la figura 5.11. El trazo inferior de la figura pertenece a la guía x

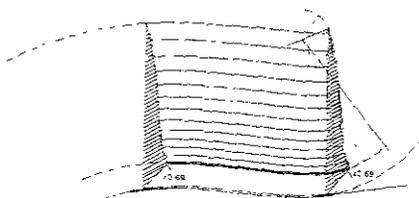
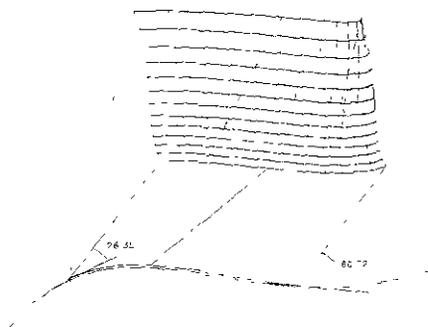


Figura 5.12. El trazo de guía x comparte centros de curvatura con trayectorias.

Una condición adicional que debe satisfacer la guía es que ésta debe conservar los ángulos del ensamble con el móvil y, en este ejemplo, no se conservan a pesar de conservar centros de curvatura y distancia con guía x . Ver figura 5.12.



5.13. Además de compartir centros de curvatura el ensamble debe conservar sus ángulos

Salvo el caso de desarrollar un método ex-profeso, para el paso de la *guía x*, puede establecerse un método recursivo de hipótesis, sobre las condiciones

Mismo centro y radio de curvatura para *trayectorias-x* y *guía-x*

Distancia de trayectorias a *guía-x* constante

Ángulos de ensamble entre móvil x y *guía x* constantes

En el caso general, la información semilla de procesos recursivos de cálculo pueden ser datos de diseño, una extrapolación de guía parche de medidas, y la determinación de curvaturas por ensayos numéricos o segunda derivada de splines en extremos

Se concluye de este análisis que es posible extraer de este modelo los errores fuente a partir de correlación de datos en el espacio de volumen de medición, explotando la información de forma de calibres bidimensionales

Este análisis permite deducir también que **los modelos considerados universales y estándar, no permiten definir errores de escalas y guías**, y que las idealizaciones sobre los ensambles pueden llevar a graves errores como lo prueba la figura 5.12. En el mejor de los casos, los errores serán semejantes y desplazados por efectos de Abbe

5.3.4 Reversibilidad de errores fuente incluyendo fenómenos de Abbe, a partir de la invariabilidad de tamaño de calibres.

Para la obtención de errores fuente explotando principios de invariabilidad de tamaño, se recurre al enunciado de que correlaciones de orden superior sólo se justifican si se puede distinguir la señal del ruido, o la equivalencia de la segmentación de espacios como recurso equivalente. Siguiendo la metodología previa de obtención de poliedros de correlación directa, es necesario ahora obtenerlos explotando la invariabilidad de tamaño

El álgebra involucrada en este objetivo deberá ser modificada para albergar funciones no lineales:

$$\sum_{i=1}^n [(x_{i,m} - x_i)^2 + (x_{i,m} - x_i)^2 - L_i^2] = 0$$

ó

$$\sum_{i=1}^n [(u_i - x_i)^2 + (w_i - x_i)^2 - L_i^2] = 0 \quad (5.8)$$

Donde un proceso recursivo puede ser empleado en la obtención de los poliedros de correlación equivalentes a (5.6) y (5.7). Ver diagrama de figura 5.14

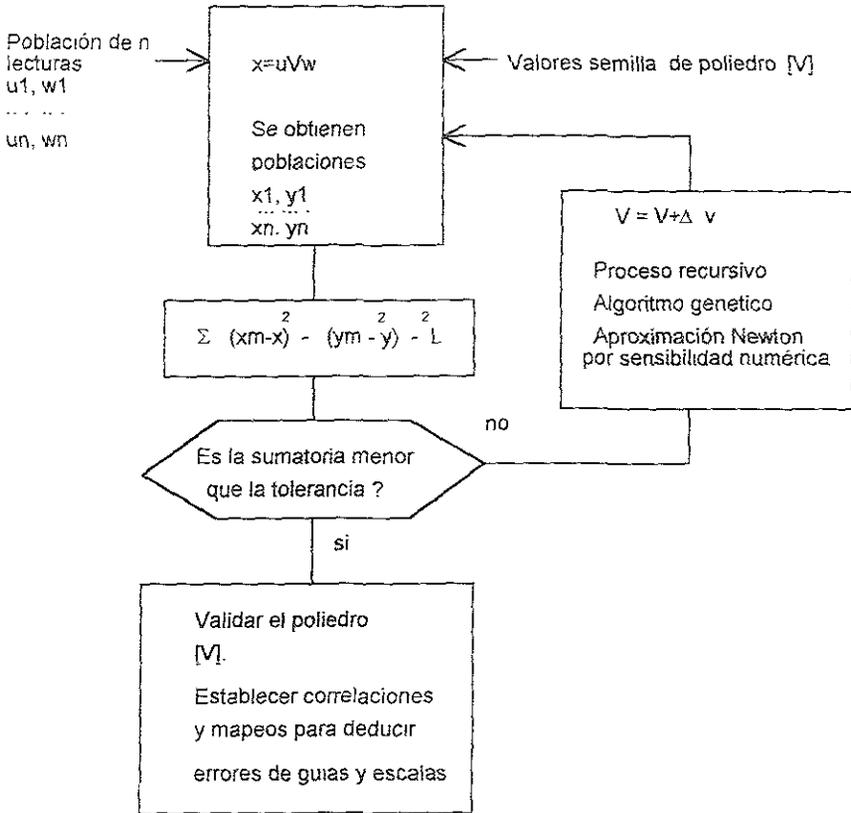


Figura 5.14. Un proceso de cálculo de [V] para establecer correlaciones entre medidas y errores fuente

El resultado de la búsqueda del mejor poliedro sin embargo, puede converger a soluciones consistentes pero falsas, pues existirá una familia de sistemas (poliedros) que satisfacen las condiciones de invariabilidad pero no reportar la orientación real del instrumento. En este caso cualquier sistema (poliedro) grado y trasladado semejante al obtenido en la figura 5.8 satisface las condiciones de invariabilidad. Ver figuras 5.15 y 5.16

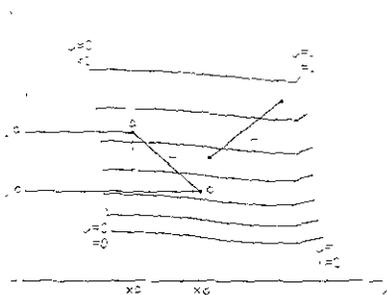


Figura 5.15. Obtención del sistema original que correlaciona valores absolutos y medidas a través de L^2 .

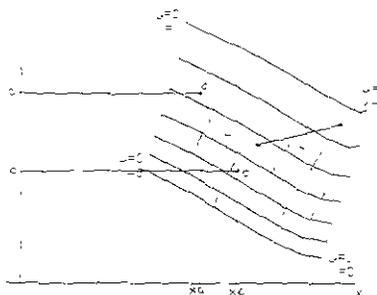


Figura 5.16. Sistema que también correlaciona valores absolutos y medidas a través de L^2 .

De las figuras 5.15 y 5.16, se deduce que para la calibración reversible de errores fuente, es necesaria otra prueba adicional a la invariabilidad de L_2 a fin de orientar el sistema absoluto; tal prueba puede ser la asignación de dos centros de esfera como valor absoluto, e inclinación absoluta, o combinaciones similares. En este contexto se puede deducir también que los procesos considerados estándar, y sólo emplean la prueba de invariabilidad de tamaño (procedimientos de Cresto), no permiten deducir de manera absolutamente cierta los errores fuente.

En este último análisis se ha obtenido el propósito del instrumento virtual, de poner a prueba otros procedimientos de calibración.

5.4 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS 3D POR EMPLEO DE PRINCIPIOS 2D.

5.4.1 Calibración lineal.

Los laboratorios primarios a la cabeza, e industrias como consumidores de servicios de calibración, han adoptado los patrones bidimensionales como recursos idóneos para la calibración lineal de máquinas 3D. Con estas pruebas es posible definir el cubo que soluciona los sistemas de coordenadas $P11$ propuesto. Es de suponer sin embargo que tal procedimiento requiera de mediciones adicionales para comprobar escuadría en los planos $x-z$ y $y-z$, de lo contrario el procedimiento no sería sensible para descubrir cubos deformes por giro de carro o mesa según se ve en las figuras 5.17 y 5.18.

Las propuestas de PTB, para la calificación del instrumento es la localización del patrón en las posiciones .

- Plano x-y a altura $z = 0$
- Plano x-y a altura $z > 0.7 Z_{máx}$
- Plano x-z a altura $y = y_{medio}$
- Plano y-z a altura $x = x_{medio}$
- Ver figura 5.11.

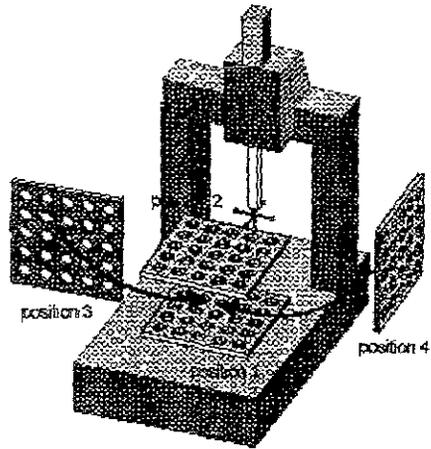


Figura 5.17 Localización de patrones del proceso de calibración de PTB.

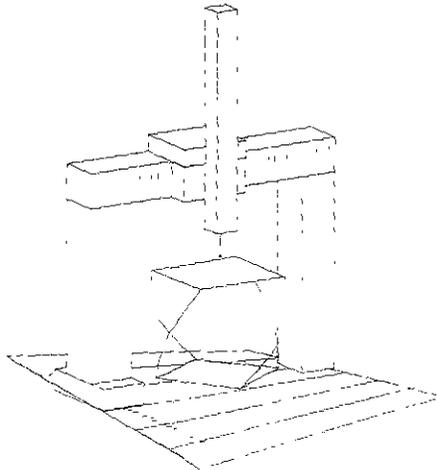


Figura 5.18 El arreglo de patrones de PTB pasaría por alto la tendencia al giro de puente y carro.

Las posibilidades de calibración por calibres de tamaño, se puede efectuar por procedimientos de barras pivotadas o barras libres, pero en ambos casos se obtendrán como soluciones familias de sistemas x , y , z que satisfacen condiciones de tamaño de barras. Se deben añadir entonces criterios de "alineamiento".

5.4.2 Calibración 3D no lineal

Empleando la ortodoxia del álgebra, para la calibración de un instrumento 3D, con segmentos editables con continuidad, requerimos de hiperparches tricúbicos, los cuales poseen 64 vértices de control, ó 64 x 3 grados de libertad

Para la solución de tal sistema (hiperparche), se requerirían calibres o patrones de al menos 64 posiciones con al menos cuatro capas no coplanares. Tales patrones no existen y probablemente no se puedan construir dado que requerirían medios de soporte que estorbarían los accesos a la palpación.

La calibración no lineal tridimensional plantea entonces el problema de no poseer patrones y procesos de recolección de datos. Por otra parte afortunadamente, es válida la generalización de que parches bicúbicos de planos idealmente paralelos son semejantes (o con diferencias de segundo orden). Esta situación permite entonces justificar el procedimiento de PTB, si es completado con un procedimiento adicional sensible al giro mostrado en figura 5.18.

Concediendo el beneficio de las simplificaciones necesarias, se plantea entonces pregunta sobre la necesidad de determinar la totalidad de errores fuente de un mecanismo tridimensional. Si esta no puede efectuarse, entonces cabe la pregunta de cuales variables pueden idealizarse o cuales son más sensibles a cometer errores, o cuales errores afectan más una medición. En este sentido la experiencia de metrologos, jerarquiza las tendencias a errar en el siguiente orden:

- 1° Errores de ortogonalidad son más frecuentes en el plano x - y que en x - z ó y - z .
- 2° Errores de escala son mayores en el orden x , y , z para máquinas tipo portal.
- 3° Errores de cabeceo y rectitud en *eje y* luego en *eje x* y luego en *eje z*, para máquinas tipo portal.

La conservación de curvaturas de giro de elementos alejados, analizada en figura 5.12, la suposición que el elemento terminal columna "z" es el elemento más ligero y con distorsiones de rectitud mínimas, y que la mayoría de aplicaciones son sobre el *plano x-y*, se considera que el desplazamiento del carro para ambos movimientos x e y , describe un resumen bastante completo de deformidades, al proyectar el patrón tridimensional en su plano de trayectorias. Ver figura 5.19 [5].

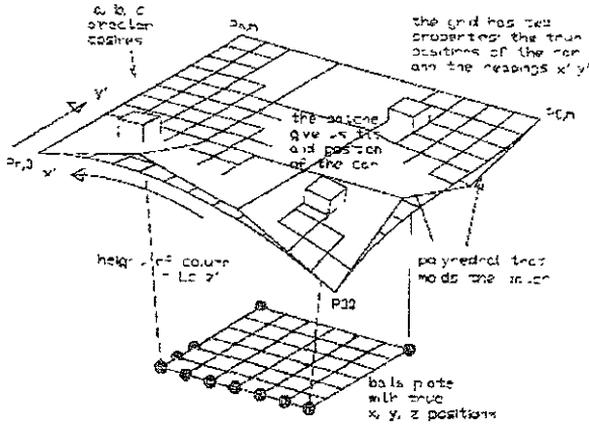


Figura 5.19 El empleo de patrones Tridimensionales proveen la información de posición del paso del carro, como resumen de los errores principales de primer orden de una MMC.

Para el propósito descrito, es necesario entonces conocer o determinar las posiciones de tal parche en 3D, lo que descarta el empleo de placas o patrones bidimensionales, requiriendo de patrones tridimensionales; en este caso de elementos geométricos simples (esferas) de arreglos “planos”, en que pueda determinarse con exactitud las variaciones de relieve de dichos planos o mapear la trayectoria del carro por pequeñas variaciones de la altura z . Ver figuras 5.19 y 5.20.

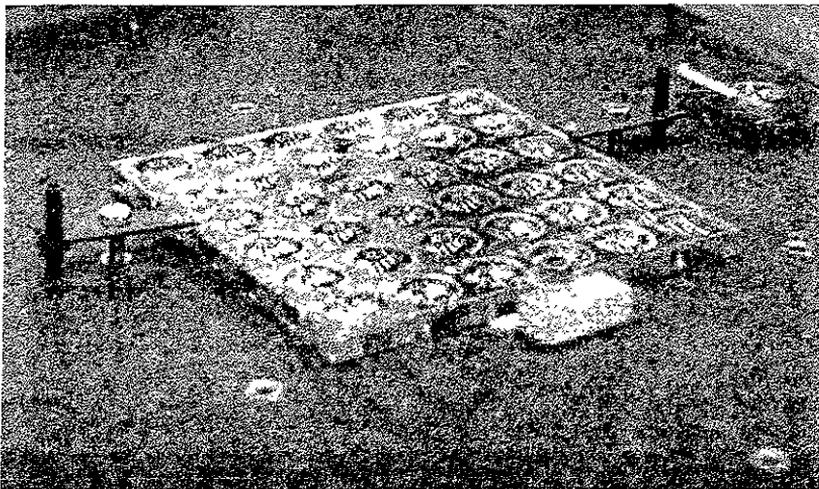


Figura 5.17. Placa patrón 3D de vidrio, para calibración de MMCs, desarrollada en el Centro de Instrumentos UNAM.

5.5 REFERENCIAS

1. Programas de computo cal-lin.exe. Laboratorio de metrología Centro de Instrumentos UNAM Programa de calibración que reporta: errores lineales de longitud y escuadría de máquinas 3D, y errores no lineales Autor: José Sanchez V.
2. Procedimiento de Calibración 32, Sistema de Calidad del Laboratorio de Metrología del Centro de Instrumentos – UNAM.
3. Numerical Recipes in C, University of Cambridge Press, London, Cap II, Singular Value Descompsition.
4. Hartig Et Al. Traceability of coordinate measuring machines according to the virtual CMM concept. 5 th IMEKO Dimensional Metrology Symposium. 25-27 October 1995, Zaragoza Spain Proceedings. 245-253
5. Sanchez Jose, et al. Evaluating Masters and Procedures of Calibration with non Linear Computational Mechanisms XIV IMEKO World Congress 1-6 June Tampere Finland, 1997, Proceedings, 129-134.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS. CONCLUSIONES.

6.1 RESULTADOS

Considerando los objetivos de esta investigación mencionados en 14 páginas 1.6, 1.7, se pueden resumir los siguientes resultados

6.1.1 En el Capítulo II se revisó de la evolución de exactitud de instrumentos geométricos, dando a conocer principios básicos de ingeniería de precisión, generalmente ignorados en la especialidad de la ingeniería mecánica. De esta manera se ha cumplido el objetivo **“1.4.1 Dar a conocer la importancia histórica, teórica, industrial, científica y legal de la metrología e instrumentación física y virtual multieje, principalmente la tridimensional ortogonal.”**

6.1.2 En el mismo capítulo II se han mostrado los Elementos constitutivos de un instrumento multieje; su arquitectura, sensores, actuadores, que influyen en sus exactitud; así mismo, se ha documentado la tendencia de esta instrumentación en el apéndice D, de esta manera se ha cumplido el objetivo de **“1.4.2 Dar a conocer los aspectos principales de diseño y de operación de instrumentos multieje que influyen en su exactitud, y las tendencias tecnológicas”**. El análisis del comportamiento dinámico de los instrumentos multieje, principalmente el de las cadenas de control, ha dado satisfacción al objetivo de dar a conocer los aspectos de operación que influyen en su exactitud

6.1.3 En el capítulo III se ha hecho un análisis exhaustivo del comportamiento de instrumentos multieje bajo la influencia de sus errores, y sobre todo de cómo afectan éstos las tareas metroológicas de control de calidad, de trazabilidad y de calificación de instrumentos, **concluyendo que la solución apunta a la creación de un instrumento virtual**. Se han cubierto los objetivos **“1.4.3 Hacer un análisis de la manera como afectan las variables de exactitud de instrumentos en diversos campos y aplicaciones; resaltando principalmente la utilidad y necesidad de desarrollar el recurso de la instrumentación virtual”**.

6.1.4 En el capítulo IV se han analizado los modelos estándar de error, considerando que éste análisis es el recurso base de modelación del instrumento virtual, y como antecedentes a tomar en cuenta en el desarrollo propio, pero este análisis ha permitiendo a su vez evaluar tales modelos.

Como contribución original se ha propuesto un modelo propio que satisface todas las expectativas del modelo virtual como son:

- 6.1.4.1 Ofertar medidas potencialmente reales.** Efectivamente, varios modelos generan medidas con error en base a polinomios de error; sin embargo estas poblaciones frecuentemente no son potencialmente reales o son muy improbables. Según el modelo propuesto, no hay duda de la potencialidad de las mediciones obtenidas pues se basan en cuerpos de deformación libre y cinemática “exacta”.
- 6.1.4.2 Posibilidades de correlación directa entre valores medidos y valores patrón.** Se obtuvieron correlaciones de primer orden (5.2 y subtemas), con mejoras de 3 a 25 veces; y correlaciones no lineales con mejoras de 6400 veces (0.05 mm / 32 mm), véanse los párrafos 5.3.2, ecuaciones (5.6) y (5.7), y tablas (5.6) y (5.7).
- 6.1.4.3** De acuerdo a los procedimientos y análisis discutidos en 5.3.3 y 5.3.4, se ha establecido la cinemática que permite diagnosticar errores fuente incluyendo fenómenos de Abbe, por pruebas que explotan forma de calibres y tamaño de calibres, satisfaciendo así el objetivo “1.4.4.4 Diagnóstico de errores fuente de instrumentos por pruebas simples, incluyendo fenómenos de Abbe.”
- 6.1.4.4 Representación de errores y constituyentes del instrumento para fines de disolución de controversias por calificación de instrumentos.** Este resultado se deduce de la posibilidad de diagnóstico reversible cuando se han incluido los fenómenos de Abbe; y de los principios elegidos de creación del instrumento virtual, al integrar en sólidos CAD ambos cuerpos rígidos del instrumento, escalas, y modelos de error. Una vez obtenidas las formas y ensamble de guías, y distribución de escalas, difícilmente se puede crear otro instrumento que produzca los mismos errores. Este instrumento produce una concordancia total entre errores de rectitud y cabeceo, que no está garantizada en los modelos estándar.
- 6.1.4.5 Adicionalmente, el desarrollo propio ha permitido evaluar otros procedimientos de calibración en los siguientes aspectos:**

Los datos positivamente ciertos de la tabla 5.3, pueden superar la esperanza estadística (3.131), con lo que se puede efectuar un proceso más fino de predicción de incertidumbres, según la región donde se mida.

Los arreglos 2D en 3D, que emplean propiedades bidimensionales de forma de calibres 5.4.1, fig 5.17, y la simulación de errores de giro en mesa por recursos virtuales, permiten estimar poca sensibilidad del proceso a descubrir errores de giro de mesa y puente, si no se amplían los ensayos con pruebas específicas de ortogonalidad, según se deduce de la figuras 5.17 y 5.18

Los modelos estándar no consideran el diseño de partes, a fin de incluir los efectos de Abbe en la determinación de errores fuente

Los procesos estándar que explotan invariabilidad de tamaño, no incluyen ensayos adicionales para determinar orientación de los sistemas corregidos respecto a los sistemas reales deformes, según se deduce del análisis 5.3.4, y figuras 5.15 y 5.16

La evaluación de estos procedimientos responde a las expectativas de un instrumento virtual que es la de permitir evaluar otros procedimientos.

Así mismo, al lograr la representación por cuerpos rígidos a los constituyentes del instrumento, la demostración de exactitud de propagación de errores y ensambles (4.4.4.4 a 4.4.4.7), este recurso se convierte en un aliado de evaluadores para convencer a autoridades y usuarios, en el veredicto de calificación de instrumentos, satisfaciendo así el objetivo deseable de un instrumento virtual “que permita: 1.4.4.3 posibilidades de representación de errores y constituyentes del instrumento para fines de disolución de controversias por calificación de instrumentos.”

6.2 CONCLUSIONES

- 6.2.1 **El instrumento virtual es el recurso actual necesario que completa e integra las tecnologías mecánicas, para fines de mejora de exactitud.**
- 6.2.2 **Explotando el estado del arte de la tecnología mecánica actual disponible, y de la instrumentación virtual, es posible emprender proyectos de instrumentación mecánica donde la exactitud sea un requisito fundamental.**
- 6.2.3 El instrumento virtual es el recurso por autonomía, para transmitir las ideas de fenómenos de error 3D en la enseñanza de las mediciones; ya que la aridez del álgebra pura, puede distraer y confundir los propósitos de la modelación de dichos fenómenos.
- 6.2.4 El instrumento virtual se convierte en el recurso idóneo y hasta ahora el único, para disolver controversias originadas por la interpretación de errores o calificación de instrumentos.
- 6.2.5 El diseño de procesos de calibración 3D, debe considerar las probables simplificaciones que la similitud de errores 2D en máquinas 2D tienen con planos en 3D, y similitudes de error 3D paralelos en planos paralelos, a fin de superar la limitación actual de disponibilidad de patrones 3D de al menos 64.
- 6.2.6 **Como continuación de la presente investigación, los modelos paramétricos de cuerpos, errores, y su cinemática, deben completarse a fin describir y controlar los comportamientos no reversibles; histéresis principalmente.**
- 6.2.7 Las bondades de intercambio de información e interacción con ambientes computacionales (interfaces), deben ampliarse a fin explotar los beneficios del presente instrumento en las áreas de: capacitación de medidas 3D, calibración y normalización 3D, diseño de protocolos de medición, o como herramienta para desarrollar sistemas expertos en la ingeniería concurrente, dirigidos al diagnóstico de procesos de fabricación, por evaluación de partes.

APENDICE A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A.1 TÉRMINOS BÁSICOS DE LA CIENCIA DE LAS MEDIDAS

Magnitud. Atributo de un fenómeno o de un cuerpo que es posible diferenciar cualitativamente y de determinar cuantitativamente Ejemplos masa, tiempo, temperatura

Magnitud Básica. Magnitud que se considera independiente de otras, en un sistema de magnitudes Ejemplos: en el sistema SI longitud, masa, tiempo, temperatura

Magnitud derivada. Magnitud que dentro de un sistema de magnitudes se considera función de otras más elementales o básicas Ejemplos en el sistema SI presión, energía, potencia

Sistema de magnitudes. Conjunto de magnitudes que definen un sistema de magnitudes de base y derivadas y sus expresiones de definición

Dimensión de una magnitud. Expresión exponencial de una magnitud en términos de magnitudes básicas de un sistema de magnitudes Ejemplo Fuerza, presión

$$F = MLT^{-2} \quad P = ML^{-1}T^{-2}$$

Escala de una magnitud. Es la expresión, base de datos, trazo o cualquier dispositivo que defina el valor de una magnitud

Medición. Es la acción de comparación por medio de la cual se define el valor de una magnitud en función de las unidades de esa magnitud

Unidad. Es el valor de esa magnitud cuyo valor convencional es la **unidad**

Patrón. Es el dispositivo, o definición que permite reproducir el valor unitario de esa magnitud o sus múltiplos o submúltiplos Ejemplos Kilogramo masa es la masa física que se encuentra en un laboratorio de Sevres Paris en el BIPM, Metro es el recorrido de la luz en el vacío en una fracción de tiempo

Principio de medición. Es la naturaleza del experimento en el que se basa la medición Ejemplo para la medición de masas se pueden explotar ambos principios para definir fuerza el de medición de desplazamientos en resortes, o por la medición de efectos inerciales sobre masas conocidas.

Método de medición. Es la naturaleza del proceso de comparación entre patrones o instrumentos, y objetos. Podemos distinguir entre otros los siguientes

Método de medición directa. Es el método de medición en que el valor de la magnitud se determina directamente por el dato arrojado por el instrumento de medición. Ejemplo el diámetro de un cilindro por un vernier

Método de medición indirecta. Es el método por el cual se define el valor de una magnitud a través de la medición de otras magnitudes y funciones de relación. Ejemplo aceleración de la gravedad por medio de longímetro y reloj

Método de medición por sustitución. Es el método que determina el valor de la magnitud a medir, sustituyendo el objeto a medir por otro objeto de magnitud conocida, cuando el dispositivo sensor para ambas coincide. Ejemplos se puede medir el diámetro de una flecha si se elige un dispositivo de medición de alturas, y se elige una combinación de bloques patrón que producen el mismo efecto el diámetro se determina cuantificando las longitudes de los bloques

Método de medición por cero. También llamado método de medición por nulos. Es el método de medición en el cual la magnitud a medir se determina llevando el dispositivo sensor entre la magnitud de referencia y la magnitud a medir a cero. Ejemplo. la medición de muy bajos voltajes por el empleo del potenciómetro.

Método de medición diferencial. Es el método de medición por nulos, excepto que si no se alcanza la condición de nulidad, se acarrea la señal no nula del dispositivo sensor

Método de medición por complemento. Es el método por el cual la magnitud a medir se complementa con otra magnitud conocida, y la suma corresponde a otra magnitud conocida mayor

Método de medición por transposición. Es el método de medición por el cual la magnitud a medir V se equilibra con una magnitud conocida A en un instrumento, enseguida la magnitud conocida sustituye por la magnitud a medir y se equilibra con otra magnitud conocida B , el valor de la V de la magnitud desconocida se determina por

$$V = \frac{A}{B}$$

Método de medición combinatorio en series cerradas. Es un método por el cual el valor de la magnitud a medir se puede determinar estableciendo relaciones entras o fraccionarias que coincidan con el valor de una magnitud conocida

Método de medición por resonancia. Es un método por medio del cual se puede establecer el valor de una magnitud desconocida cuando se alcanza una condición de resonancia relacionada con el valor conocido de esa magnitud. El caso más común es el de definir frecuencias, múltiplos o submúltiplos, pero el principio se aplica también a la

medición de elasticidades, longitudes, impedancias, donde las frecuencias de oscilación, de resonancia, de propagación, dependen de esas magnitudes [C-B 13].

Proceso de medición. Es el conjunto de operaciones que incluyen: la preparación de una medición, su desarrollo y su interpretación

A.2 TÉRMINOS RELACIONADOS CON CALIDAD DE MEDIDAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN, EXTRAÍDOS DEL VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL.

Valor real de una magnitud: es una abstracción conceptual del valor que puede llegar a tener una magnitud, y que está perfectamente definido; por ejemplo: $c = \text{la velocidad de la luz en el vacío}$. Es la única constante universal que no se define en función de otras. Propiedad tomada por acuerdo del BIPM. La adopción de esta "definición", tiene la implicación de que en lo sucesivo la velocidad de la luz en el vacío no se mide, se medirán las longitudes con un cierto grado de certeza en función del tiempo que esa luz tarda en recorrer, la incertidumbre tendrá como origen nuestra incertidumbre de *tiempo* pero no de *c*.

Valor convencionalmente verdadero de una magnitud: Es el valor de una magnitud, que para propósitos de comparación de otro valor de la misma magnitud, puede considerarse de errores nulos o despreciables. Por ejemplo, para propósitos de evaluación de reglas se considera valor verdadero el valor nominal de un bloque patrón

Error: Diferencia entre el valor medido y el valor real de una magnitud

Error límite valores límite al rededor del valor verdadero de una magnitud, cuya probabilidad de ser sobrepasado por una medición cualquiera, es menor que $\frac{1}{2}$ intervalo de confianza establecido

Errores sistemáticos: Errores que se repiten en magnitud y signo cuando se mide bajo las mismas condiciones

Errores aleatorios: Errores que no se repiten en magnitud y signo, cuando se repiten las condiciones de medición

Nota: Esta clasificación tiende a desaparecer, aclarando que no existen errores aleatorios, y que no se pueden repetir las mismas condiciones de medición, lo que sucede es el desconocimiento de las condiciones que alteran la medición

Error de histéresis. Es el error que se produce por el cambio de dirección de excitación de un instrumento de medición, ya sea en orden ascendente, o en orden descendente

Nota: Frecuentemente se asocia a este error un signo y una constante que dependen de la dirección de movimiento, pero en ensayos reales este error resulta mucho más no lineal e irrepetible.

Incertidumbre de una medición: es el intervalo del error definido por sus errores límite. Al igual que este, queda definida por intervalos de confianza, ordinariamente 95% , ó 96% si este intervalo es de 2 veces la desviación estándar de la dispersión de medidas al rededor del valor verdadero

Notas: Esta definición requiere de ajustes a cada aplicación particular, pues aunque existen normas y recomendaciones (DIN 1319, ISO), para su cálculo y expresión, dichas recomendaciones no prevén medidas multidimensionales, medidas basadas en funciones diferenciales, medidas simuladas en ambientes virtuales o en base aleatoria. En este campo la mayoría de investigadores no emplea tales normas y proponen sus propios métodos de determinación. Es un campo polémico sujeto a mejoras, y se propone la lectura de [C-D.9] y [C-D 12] a fin de arrojar luz sobre esta discusión.

Repetibilidad: Es la medida de la dispersión de medidas al rededor del valor medio. Para una distribución gaussiana, queda definida por la amplitud de la desviación estándar

Exactitud: Concepto que define el desvío de las mediciones respecto de su valor verdadero. Este concepto engloba ambas **la dispersión de la muestra de medidas, así como el desvío del valor medio**. El concepto cuantifica el error de una medida para un intervalo de confianza, se calcula con los desvíos conocidos o estimados de la media de una muestra, más $n \cdot \text{desvíos estándar}$. Si la muestra es de una medida entonces la dispersión es cero y sólo queda el estimado de su desvío o el dato de desvíos medios para medidas semejantes.

Precisión: El concepto se empleaba antiguamente para designar la repetibilidad de un instrumento de medición. Actualmente los organismos productores de normas recomiendan se evite este concepto, pues debe emplearse repetibilidad que es más idóneo; en el caso límite de muestras de una sola medida, no cabría la definición del término lo cual haría pensar que una sólo medida no es precisa

Notas: No hay universalidad de criterios respecto de estas definiciones; esta pertenece al vocabulario legal que recomienda se emplee exactitud en el término amplio. Por otra parte la recomendación es congruente, pues en el

caso límite de muestras de una sola medición, si cabe el término que si bien no habla de repetibilidad si habla de "bondad" de la medida.

Calibración: conjunto de operaciones que tienen por objeto la evaluación de los errores en magnitud y signo de un instrumento de medición

Notas: El término calibración es frecuentemente confundido con el de Evaluación Metroológica y con otros términos afines como: Accuracy verification, Performance Evaluation, Checking, Pruebas de Conformidad. En el caso particular de la Máquinas de Coordenadas, el tema es polémico; sin embargo en esta investigación se le da el significado exacto y obliga a definir valor, signo y posición de errores, y si fuera el caso orientación.

Trazabilidad: Característica de la calibración de un instrumento de medición, que manifiesta que se determinó por una cadena ininterrumpida de comparaciones con instrumentos y/o patrones de mayor jerarquía, hasta el patrón primario internacional de esa magnitud.

Nota: La importancia de la trazabilidad es tal, que su costo llega a sobrepasar al del instrumento.

Evaluación metroológica: Comprobación del cumplimiento de especificaciones de exactitud, de operación u otros aspectos importantes de operación de un instrumento de medición Una carta de calibración no es necesaria para una evaluación metroológica, pues no es lo mismo determinar que satisface tolerancias, a determinar la magnitud y posición de desvíos

A.3 TÉRMINOS USUALES QUE NO PERTENECEN AL VOCABULARIO METROLÓGICO LEGAL:

Accuracy verification, Performance Evaluation, Checking, Pruebas de Conformidad o similares, son términos que emplean diferentes normas o procedimientos para comprobar el cumplimiento de tolerancias de exactitud ofrecidas por un fabricante, o definir bandas de incertidumbre de medición, para un intervalo de confianza establecido

Certificación El concepto de Certificación, es actualmente ambiguo, pues en algunas ocasiones se aplica a instrumentos, o en otras a procesos, y en otras más a personas o instituciones, pero es necesario anotar que los certificados no revelan exactamente las propiedades de exactitud de tales instrumentos o personas En la actualidad, el software de aplicaciones metroológicas está siendo objeto de certificación en la Comunidad Europea, como condición para ser comercializado La dirección General de Normas de la SECOFI, argumenta que es la única que puede *certificar*, o emitir *certificados*, pero carece de la capacidad técnica y científica.

A.4 SIGLAS FRECUENTEMENTE USADAS EN EL VALCABULARIO METROLÓGICO:

- ANSI** American National Standards Institute 11 West 42 nd. Street floor US-N4, Nueva York N Y USA
Produjo la primera norma de MMCs
- ASPE** American Society for Precision Engineering. Wildwood 225, Ave , Unit B Woburn, MA 01811 USA
Socios realizan investigación de frontera en el tema.
- BIPM** Bureau Internationale des Poids et Mesures. Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France.
México es miembro.
- CEM** Centro Español de Metrología. Madrid, España. Laboratorio Primario México tiene acuerdos de colaboración.
- CENAM** Centro Nacional de Metrología. Km 4,5 Los Cues Municipio El Marqués Querétaro México.
Ya definidas sus funciones en capítulo primero.
- DGN** Dirección General de Normas, México. Av Puente de Tecamachalco N 6 México D.F. México.
- DIN** Deutscher Institut für Normung (Instituto de Normalización Alemán)
Realizó normas muy usadas para cálculos de incertidumbre.
- DKD** Deutscher Kalibrier dienst (Sistema de Calibración Alemán).
Frecuentemente se toman sus veredictos como válidos en México
- EUSPE** European Society for Precision Engineering Division Systèmes Mécaniques Université de Technologie de Compiègne 60206 Compiègne, Cedex France
Socios realizan investigación de frontera en el tema
- ISO** International Standardization Organization, Case Postale 56, CH 1211 Geneva Switzerland
- ISO-GUM** Guide for Uncertainty Measurement. (Guía ISO para el cálculo de incertidumbres)
- IMEKO** International Measurement Confederation. P O Box 457, H-1371 Budapest 5, Hungary. México a través de SOMI es miembro.

- IMGC** Instituto di Metrologia Gustavo Colonnetti Consiglio Nazionale delle Ricerche Torino Italy Laboratorio Primario de Italia.
México tiene acuerdos de colaboración y transferencia de tecnología
- InMetro.** Laboratorio Primario de Metrología. Brasil. Relaciones con México
- INTI** Instituto Nacional de Tecnología Industrial Buenos Aires Argentina
Laboratorios primarios de Argentina México tiene acuerdos.
- JSPE** Japanesse Society for Precision Engineering Department of Precision Engineering, Osaka University, Suita, Asaka 565, Japan
Socios realizan investigación de frontera en el tema
- NIST.** National Institute of Standrards and Technology. Gaitesburgh 20899, MD
And 20234, Washington D C USA.
Laboratorio regional para América en aspectos de comercio por acuerdos comerciales privados.
- NPL** National Physical Laboratory (Laboratorio Primario del Reino Unido)
- NRLM** National Research Laboratory of Metrology Minister of Industry and Trade of Japan. Laboratorios Primarios de Japón
Acuerdos con México. becarios mexicanos en cursos
- PTB** Phisicalisch Technische Bundesanstalt (Instituto Federal Fisicotécnico, Alemania), Bundesalle 100, Branschewig, Germany
Acuerdos con México. Becarios mexicanos, transfiere y ofrece la trazabilidad Internacional a México
- VDE** Verband Deutsche Elektrotechniker (Federación Electrotécnica Alemana)
Coautores de la norma VDI/VDE 2617
- VDI** Verein Deutscher Ingenieure (Asociación Alemana de Ingenieros)
Coautores de la norma VDI/VDE 2617 de Máquinas de Coordenadas

APÉNDICE B

DISCUSIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS NORMALIZADOS DE CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE MAQUINAS DE COORDENADAS, Y DE PROCESOS NO NORMALIZADOS QUE GOZAN DE PRESTIGIO

B.1 ANSI/ASME B98.1.12M-1985

Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. An American Standard.

El origen de esta norma se localiza entre usuarios de MMCs, quienes advirtieron sobre distintos errores intrínsecos, extrínsecos y de uso a que se ven expuestas las mediciones en MMCs. Inicialmente fue a través de ASME, que se propuso esta recomendación (más no norma), a fin de empezar a establecer criterios de validación y deslinde de responsabilidades por la exactitud de las máquinas. Posteriormente el gobierno de los Estados Unidos, en base a los esfuerzos previos de ASME, así como con las recomendaciones de expertos, generaron la ANSI B 89 1.12M.

Las principales partes de esta norma son:

Enfoque (Scope) de la norma. La *norma* inicia haciendo comentarios acerca de la sensibilidad de MMCs a variables ambientales y de formas de uso como: variación de longitud de escalas por temperatura, diferente comportamiento de la MMC por variaciones de voltaje o de suministro de aire a presión, o repetibilidad de palpado por vibraciones, continúa estableciendo definiciones de error, palpador, tipos de palpadores, tipos de MMCs, coeficiente de dilatación térmica, etc. Dentro de esta introducción recomienda formatos de registro de resultados de pruebas y de variaciones ambientales.

Entre estos criterios, establece que cuando los modos de operación de las MMCs requieren de computadoras para procesar datos numéricos, en sus formas normales de operación estas deben considerarse parte del instrumento, y los errores del software deben considerarse parte de los errores totales. Similares criterios establece para la influencia de errores ambientales y modos de operación, de tal manera que se avalúan directamente la máquina e indirectamente las condiciones y modos de operación. Recomienda que cuando se dan situaciones de no cumplimiento de tolerancias se midan vibraciones, temperatura y estabilidad de aire por separado para liberar a proveedores de responsabilidades si fuera el caso.

Especial énfasis establece para la interpretación de Exactitud (parte 5.4), expresado éste como la banda total de variabilidad de una medida, **no importa cuanto se**

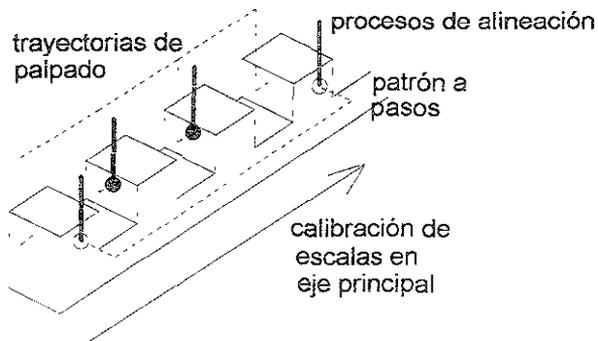
aleje el valor medio de medidas del valor verdadero, lo cual desde nuestro punto de vista es una inconsistencia

Los principios geométricos en que se basa son: a) la correcta medición de longitud que debe reportar en cualquier dirección, ya sea a lo largo de ejes alineados, en direcciones no paralelas a los ejes, ya sea en intervalos cortos de longitud, o en intervalos grandes; y b) en la repetibilidad de vectores reportados para idénticas posiciones

Para a) propone tres instrumentos básicos.

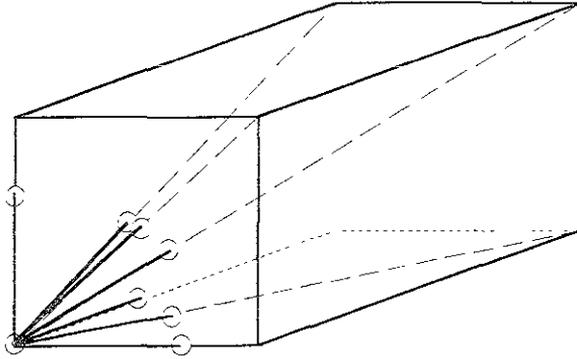
a.1 Medición de longitudes a lo largo de ejes por medio de interferómetro láser (ver Principios de metrología geométrica usados en la actualidad, y figuras 1.20 y 1 21).

a.2 Medición de longitudes por patrones de longitud a pasos. Consiste esta prueba en alinear tal patrón a pasos a lo largo de los ejes principales de la MMC y efectuar las mediciones.



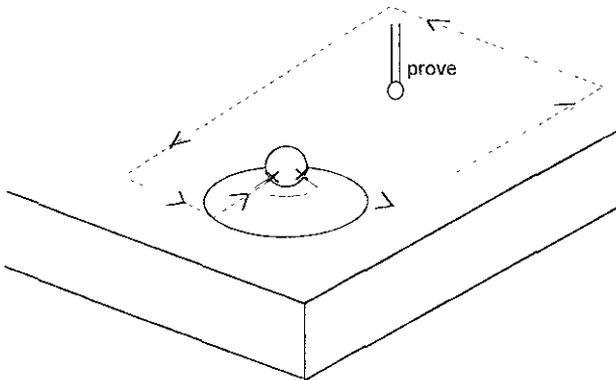
En ambos casos se presupone la correcta alineación de ejes ópticos de láser y de patrones a pasos. Para ambas pruebas, la información extraída es insuficiente, pues errores de escuadría y de rectitud quedan enmascarados, por lo que los resultados de mediciones se verán alterados cuando se tenga que explotar algún atributo de la MMC sensible a estos parámetros

a.3. Medición de distancias entre esferas localizadas en barras. (Ball bars). Esta prueba consiste en medir la distancia entre esferas de barras, colocadas en cada una de las esquinas del cubo de medición, para todas las localizaciones y orientaciones principales: a lo largo de x , a lo largo de y , a lo largo de z , en los planos x, y : de x^0, y^0 a x^+, y^+ ; de x^0, y^+ a x^+, y^0 ; de x^-, y^0 a x^0, y^+ ; x^+, y^+ a x^0, y^0 ; ; así respectivamente en planos Y, Z y en el volumen X, Y, Z .



Para llevar a cabo estas pruebas propone la construcción de patrones de longitud de esferas, con ajustes de longitud, y de accesorios de montaje de barras para distintas orientaciones. Propone también el uso de sokets para medir de forma continua alrededor de esferas pivote

Para b), repetibilidad de posiciones, propone dos pruebas: el sembrado de conos para fijación de barras en vez de palpadores, y la medición de centros de esfera ancladas a mesa de medición



Como resultado de esta prueba se obtienen cartas de desvío de medidas, las que no deben tener una banda más amplia que la clase de calidad del instrumento.

No se obtiene de esta prueba información alguna sobre el tipo de errores fuente ni maneras de corregirlo.

Comentarios de la B.89.1.12M

Ventajas: La principal consiste en la explotación de la invariabilidad de tamaño de barras para descubrir fallas de operación en la MMC, ya que si hubiera errores de ortogonalidad, éstos se descubrirían al cambiar de orientación las barras, así como de rectitud o cabeceos

Desventajas:

Comprometen a los usuarios al desarrollo de accesorios (sockets) que difícilmente podrán realizar, y que no son estrictamente indispensables para la ejecución de las pruebas.

No advierten a usuarios lo incompleto de las pruebas con láser y con patrones a pasos

No permiten descubrir desalineamientos de mecanismos contra mesa.

No permiten descubrir errores de esfericidad de palpadores, ni de umbrales de validación para recorridos en diferentes ejes o diferentes direcciones.

Puede darse el caso de medidas muy repetibles y muy sesgadas de los valores verdaderos y sin embargo los resultados reporten cumplimiento de tolerancias

B.2 VDI/VDE 2617 Blatt 2.1 (patre 2.1).

Es la norma que usualmente se emplea en Alemania, y fue propuesta por asociaciones de ingenieros. Básicamente coincide con otras en el sentido de que explota la invariabilidad de tamaño de patrones independientemente de su orientación, para poner a prueba MMCs

Inicialmente establece el criterio de incertidumbre, como la región donde se encuentran los desvíos de longitud respecto de sus valores verdaderos, y no deber ser rebasados según un parámetro de calidad expresado ordinariamente por una campana o ecuación

$$U_{95} \leq \{2.5 + L/250\} \text{ [}\mu\text{m, mm]}$$

Y se interpreta, el desvío de una medida de L longitud debe ser menor a debe ser menor a (Inecuación) para un intervalo de confianza de 95 %

Establece que las mediciones de longitud han de realizarse alrededor del centro de mediciones, para planos principales, y tridimensionalmente. Advierte sobre probables problemas que pueden presentarse si no se alinean los patrones de medición.

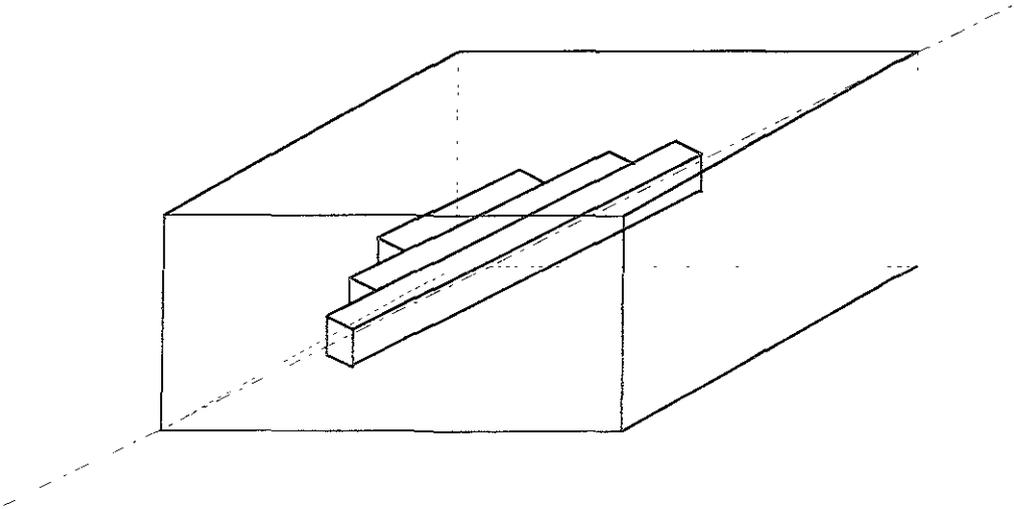
Básicamente provee un criterio de aceptación o rechazo de MMCs, pero no provee mayor información para corrección o para elección de regiones óptimas de medición, ni para predicción de comportamiento.

Al igual que la B 89, no atiende los aspectos de rectitud, ortogonalidad, paralelismo de mesa con mecanismos, esfericidad de palpador, o umbrales de palpación. No provee información de errores fuente.

B.3 CMMA. Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines of Coordinate Measuring Machines Manufacturers Association.

En esta norma, inicialmente se hace una explicación acerca de los distintos errores que se pueden encontrar en una MMC (errores fuente), pero al igual que B.89 o que VDI/VDA, no proporciona criterios para evaluarlos directamente, ni criterios geométricos matemáticos para deducirlos.

Al llevar a cabo las pruebas propone la localización de patrones de longitud en el seno del volumen de medición para orientaciones principales y para medidas diagonales 3D.



Finalmente se cae en la calificación de aceptación o rechazo de la MMC de acuerdo a la población de puntos medidos fuera de la campana.

$$U95 \leq |2.5 + L/250| \quad [\mu\text{m, mm}] \quad (\text{u otros valores})$$

Posee básicamente las mismas desventajas de B 89.1 y de VDI/VDA

B.4 **Measurement Uncertainty on Coordinate Measuring Machines, Of the Swiss Federal Institute of Technology.**

Esta norma (recomendación oficial), se basa en el diagnóstico de las MMCs en base a los resultados de medidas de circularidad de discos o anillos localizados, en diferentes direcciones y orientaciones dentro del volumen de medición de las MMCs

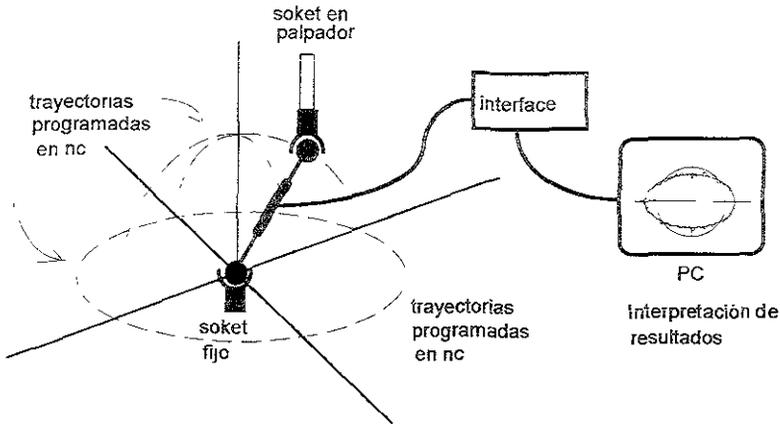
Dentro de los criterios de diagnóstico explica cómo una elipse para los resultados de medición de un disco colocado planarmente, revelaría errores de escala para uno de los ejes involucrados, revelaría errores de escuadría para una elipse con su eje mayor inclinado, y revelaría errores de palpadores al medir el objeto complementario (disco -> anillo)

Para la ejecución de pruebas recomienda la fabricación de anillos o discos en taller, los cuales se estima, tendrían la suficiente circularidad que permita descubrir tales errores. Las pruebas se basan en la invariabilidad del disco o anillo, y las pruebas reflejan desviaciones relativas respecto a una medida unitaria (el diámetro del disco).

Ventajas: Las pruebas efectuadas permiten calificar la aceptación o rechazo de la MMC, además permiten aproximarse a los probables errores fuente de primer orden de la MMC

Desventajas: Dado que los intervalos en que descubre errores se limita al diámetro de patrones, se requerirá de grandes discos o anillos para máquinas grandes. Puede confundir en la interpretación de resultados, pues hay combinaciones que producen idénticos resultados con diferentes errores fuente como . los diferentes umbrales de palpación en x e y , puede llevar a la interpretación errónea de errores de escala para algunos de los ejes. Aunque los autores (Knapp) afirman permite descubrir todos los errores fuente, no explica cómo. **No propone ningún método o principio de interpretación cuantitativa.**

B.5 Renishaw Ball Barr Tester. Es un instrumento y método de diagnóstico desarrollado por Renishaw (fabricante de palpadores de MMCs), que se basa en la determinación de variaciones de distancia entre una esfera viajera y una esfera fija (en un socket), por medio de un transductor (barra de longitud variable) y un sistema captador de datos. Es una variación de la recomendación suiza, sólo que a esta última se le ha integrado software no público de interpretación de datos. Como resultados provee la calificación dentro ó fuera de tolerancia de la MMC, errores de escala y errores de ortogonalidad



Es necesario aclarar que la distinción de errores escala ortogonalidad son una aproximación de solución de un sistema lineal; tal solución generalmente no coincide si se realizan pruebas directas de longitud, escala, ortogonalidad, cabeceo (ver capítulo 1) directamente, o si se aumentan o cambian las muestras de medición. Errores de rectitud o cabeceo (no lineales) no los puede diagnosticar.

B.6 Comparison of different artefacts for interim coordinate measuring machine checking, from the Swiss Standards Committee

Cabe mencionar este reporte como un resumen de los distintos procesos de evaluación de MMCs, que permite comparar principios de calibración, procesos, patrones requeridos, nivel de calidad requerido de éstos últimos, maneras de llevar a cabo las pruebas, y finalmente resultados que pueden obtenerse (cuantificación de 21 errores fuente) Para la determinación de todos ellos el autor establece que se pueden determinar indirectamente con medición de longitud, medición de circularidad (ya reportado el principio), medición de distancia de bolas en barras, medición de posiciones de centros de bolas u orificios en barras

Respecto a las expectativas que Knapp y el comité establece tenemos que decir lo siguiente

Probablemente sus expectativas de diagnóstico fino las basa en un análisis algebraico que no discute ni cita A este respecto **permítasenos discrepar rotundamente de sus criterios**, pues establece que la determinación de errores de **ortogonalidad** tanto como de **roll** (giro perpendicular al eje que se recorre), se pueden determinar con 45 medidas de longitud con bloques patrón. Lo cual en el primer caso es demasiado, pues **un sistema lineal que resuelva ortogonalidad requiere de mucho menos medidas**, y en el

segundo caso recordemos que el roll es una propiedad continuamente variable a lo largo de un eje. De donde saca que con 45 indirectas de longitud medidas queda definido este error? Similares afirmaciones plagan este artículo.

No existe (cuando menos para conocimiento nuestro) proceso en la literatura, donde para un número fijo de medida indirectas se pueda obtener la solución de un modelo no lineal. No se ha ofertado software de diagnóstico de MMCs en base a esos procesos indirectos. Aunque existen modelos propuestos de propagación de error punto a punto, no existe públicamente y dudamos que existan internamente procesos inversos de solución, para obtener errores fuente no lineales a partir de medidas indirectas tan simples como longitud (recomendamos consultar capítulo 3)

Conclusiones

Exceptuando los procesos Renishaw y el resumen del Swiss Committee, el resto de procesos parecen estar dedicados a cualquier tipo de usuarios de la industria en general, y para los cuales es necesario llamar su atención acerca de los distintos modos de cometer errores una MMC o en un proceso de medición tridimensional. Por lo mismo estas normas no están dedicadas a un diagnóstico más fino de las MMCs, sino más bien a una aceptación o rechazo. Para investigadores que se han dedicado más profundamente al análisis de MMCs, ya sea para la mejora de su diseño, ya sea para la creación de software de corrección, ya sea para el software de diagnóstico, estas *normas* son simplemente insuficientes, y muy primitivas. En cuanto a la utilidad el proceso Renishaw, se requiere que la MMC por diagnosticar permita sustituir sockets en lugar de palpadores y pueda realizar viajes circulares por NC; en ese supuesto la prueba permite descubrir los desvíos de la circularidad, sin embargo, la mayoría de MMCs no garantizan trayectorias circulares, y no por ello se pueda presumir que los puntos salida-> llegada en una trayectoria (la mayoría de veces en línea recta) estén fuera de tolerancia. Finalmente El reporte del Swiss Committee parece haberse emitido para científicos que a partir de él se puedan dedicar al desarrollo de métodos de prueba para descubrir los errores fuente. Finalmente parece que las tres primeras normas fueron emitidas para las necesidades más elementales del comercio de MMCs pero no más que eso.

Por lo que se refiere a la normalización nacional, debe anotarse que existe un vacío normativo medición y calibración 3D en todos sentidos, llevando en la práctica a los peritos auditores de MMCs a satisfacer las necesidades de acreditamiento de industrias cuando los errores endógenos de MMCs o de operación, no son graves para los parámetros de control de calidad en que estas se emplean.

Referencias

1. Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines An American Standard ANSI/ASME B98.1.12M-1985.

2. Accuracy of Coordinate measuring Machines. Characteristic Parameters Measuring Checking. VDI/VDE 2617 Blatt 2 1, Dec 1986
3. "CMMA" Accuracy s VDI/VDE 2617 Blatt 2 1ecification for Coordinate Measuring Machines
4. Comparison of different artefacts for interim coordinate measuring machine chaking. a report from the Swiss Standards Committee

APENDICE C

DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS Y COMANDOS PRINCIPALES DEL INSTRUMENTO VIRTUAL

Las declaraciones de subrutinas se han omitido, así como declaración de variables o de dimensionamiento pues no se consideran relevantes como código

Los *comentarios actuales* a los listados se encuentran en *Arial cursivas*.

```
mv.bat      echo off
              :inicia
              mc-ptrn2.exe
              cls
              echo   para ver acad:
              pause
              c:\d\acad\acad c:\d\mc-virt\mvert01 mvert01
              goto inacia
```

Es el programa de administración de comandos principal, que en un bucle invoca mc-ptrn2.exe, el instrumento que crea, mueve valida despliega lecturas o interface virtual.

Al interrumpir momentáneamente el programa con el comando acad, continúa el programa de procesamiento por lotes invocando a Autocad, invocando un dibujo para definir el estado de gratificación, y finalmente invoca un archivo de procesamiento por texto mvert01.scr, que fue creado previamente al suspender mc-ptrn2.exe.

mc-ptrn2.exe Ejecutable de mc-ptrn.bas.

mc-ptrn2.bas Código fuente del programa administrador de la interface virtual entre Autocad y bases de datos

```
' INTERFASE GRAFICA MAQUINA VIRTUAL
'   Incluye programa basico de raton QB deber cargarse:
qb /L qb.qib
'-----
' AQUI VAN LOS ALGORITMOS BASICOS
GOSUB INICIALIZA
GOSUB vertices
GOSUB crea.objetos
GOSUB captura.objetos
GOSUB RATON      'aquí SE ANIDAN LAS SUBROUTINAS DE OPERACIONES
END
'-----
```

```

DECLARE SUB traslada (vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4,
                    tx, ty)

' INICIO PROGRAMA
GOSUB separa

    guia$ = "gx"

    CALL datos(guia$, vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4)
    CALL punto(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, u, px, py)
    CALL derivada(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, u,
                 alfa)
    xx = px: yx = py: alfaXg = alfa * 180 / 3.141593

    guia$ = "gy"
    CALL datos(guia$, vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4)
    CALL rota(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, alfa)

    tx = xx: ty = yx

    CALL traslada(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, tx,
                 ty)
    CALL punto(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, v, px,
              py)
    CALL derivada(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, v,
                 alfa)
    xy = px: yy = py:
    alfaYg = alfa * 180 / 3.141593
    IF alfaYg < 0 THEN alfaYg = 180 + alfaYg
GOSUB salidas
CLEAR
END
'-----
salidas:

    OPEN "o", #2, "mvrt01.scr"

    PRINT #2, "blipmode"
    PRINT #2, "off"
    PRINT #2, "erase w -100,-100 -99,-99 "
    PRINT #2, "insert"
    PRINT #2, "framex"
    PRINT #2, "0,0 1 1 0"
    PRINT #2, "insert"
    PRINT #2, "COLOR 7"
    PRINT #2, "pline 0,0 250.5782,33.1745 504.91,-44.4706
699.7393,-19.1019 "
    PRINT #2, "pedit l s "
    PRINT #2, "REGEN"

CLOSE

    PRINT "DESPUES DE QUEAPAREZCA Command: _ Pulsar
SCRIPT <Ù <##> <Ù"
RETURN
'-----

```

La **subrutina separa** e identifica los valores xxx,yyy ó lecturas a trasladar los móviles que se han pasado por línea de comandos

La llamada a **datos**, captura diseño de guías o la distribución de la escala

Las llamadas a **traslada y derivada** son rutinas internas para calcular rotación traslación de móviles.

La llamada a **salidas** produce el programa de texto mc-vrt.scr, que rediseñará el dibujo de acad, y que al pulsar Command:> Script 'enter' se ejecutará. Ver programa mc-virt.scr

mc-virt01.scr

2

```

blipmode
off
erase w -100,-100 -99,-99
insert
framex
0,0 1 1 0
insert
movilx
519.6462,-20.60601 1 1 -4.102006
insert
movily
521.1027,225.4025 1 1 83.03194
COLOR 7
Pline 0,0 250.5782,33.1745 504.91,-44.4706 699.7393,-19.1019
Pedit 1 s
REGEN
Insert
Escalax
0.0 1 1 0

```

2 Le dice a Autocad que el dibujo enviado por comando se trace.

Blipmode, off, erae, configuran la pantalla

insert

framex

0,0 1 1 0 Se inserta el dibujo "framex" en la posición 0,0, en escalas 1,1, y giros alrededor de z 0 grados.

Enseguida se insertan los móviles x, e y, la guías x, y finalmente la escala x.

Paramet.exe Ejecutable de parament.bas

Paramet.bas *Calcula el mejor valor paramétrico de puntos cercanos a un alambre.*

Código:

```
' parametriza puntos sobre alambres por montecarlo
'INICIO PROGRAMA

      guia$ = "gx"
      p$ = "p"

CALL parametrico(guia$, p$, vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3,
      vx4,      vy4, px, py, u, pux, puy, e)
CALL derivada(vx1, vy1, vx2, vy2, vx3, vy3, vx4, vy4, u, dux,
      duy, alfa)
GOSUB salidas

END
'-----
mcarlo:
      uu = u1: ee = (e1 + e2) / 2

      FOR i = 1 TO 100
      u1 = uu + 1 * RND * SGN(RND - RND) * ee / dedu
      GOSUB matrizu
      pux = u1 * vx1 + u2 * vx2 + u3 * vx3 + u4 * vx4
      puy = u1 * vy1 + u2 * vy2 + u3 * vy3 + u4 * vy4

      e = SQR((pux - px) ^ 2 + (puy - py) ^ 2)
      IF e < ee THEN uu = u1
      IF e < ee THEN ee = e
      NEXT
RETURN
'-----
```

Los datos son enviados por gx y por p

La llamada a paramétrico invoca a su vez a mcarlo (montecarlo)

El programa basa su proceso de cálculo en el cálculo de errores de posición $abs(p' - p)$ realimentando su cálculo por un proceso aleatorio relacionado con el error y la derivada de el parámetro con la posición

normar.exe *Programa empleado para normalizar entre valores inferior y superior las lecturas de medidas a fin de convertirlas en parámetros de polinomios paramétricos.*

```
' programa de normalización de matrices
CLS
```

```
INPUT "matriz a normalizar"; mx$
      nrmal$ = "lc" + MID$(mx$, 4, 4) + "-n." + RIGHT$(mx$, 3)

INPUT " VALORES PARAMETRICOS inferiores u, w: "; Uinf, Winf
INPUT " VALORES PARAMETRICOS SUPERIORES U, W: "; Usup, Wsup

OPEN "1", #1, mx$
OPEN "o", #2, nrmal$
```

Como entradas se tienen los valores leídos; en un proceso interno se revisan los valores superiores e inferiores, asignando linealmente los valores límite e intermedios a los valores entrada distribuidos;

*Como salidas se tienen los mismos valores acotados en los límites
 $u_{inf} \geq 0.0$ y $u_{sup} \leq 1.0$*

U3w3.bas

Programa que obtiene la matriz de productos de acuerdo a la ecuación 5.7 para establecer correlaciones directas.

```

' OBTIENE MATRIZ DE PRODUCTOS DE VALORES PARAMETRICOS
CLS
INPUT "MATRIZ DE VALORES U"; u$
INPUT "MATRIZ DE VALORES W"; W$
                                uw$ = "uw" + RIGHT$(u$, 4)

OPEN "I", #1, u$
OPEN "I", #2, W$
OPEN "o", #3, uw$

LINE INPUT #1, comentariox$
LINE INPUT #2, comentarioy$

FOR i = 1 TO n

    INPUT #1, u1(i), u2(i), u3(i), u4(i)
    INPUT #2, w1(i), w2(i), w3(i), w4(i)

    uw1(i) = w1(i) * u1(i)
    uw2(i) = w1(i) * u2(i)
    uw3(i) = w1(i) * u3(i)
    uw4(i) = w1(i) * u4(i)

    uw5(i) = w2(i) * u1(i)
    uw6(i) = w2(i) * u2(i)
    uw7(i) = w2(i) * u3(i)
    uw8(i) = w2(i) * u4(i)

    uw9(i) = w3(i) * u1(i)
    uw10(i) = w3(i) * u2(i)
    uw11(i) = w3(i) * u3(i)
    uw12(i) = w3(i) * u4(i)

    uw13(i) = w4(i) * u1(i)
    uw14(i) = w4(i) * u2(i)
    uw15(i) = w4(i) * u3(i)
    uw16(i) = w4(i) * u4(i)

    PRINT #3, uw1(i), uw2(i), uw3(i), uw4(i), uw5(i), uw6(i),
    uw7(i), uw8(i),
    PRINT #3, uw9(i), uw10(i), uw11(i), uw12(i), uw13(i),
    uw14(i), uw15(i), uw16(i)

NEXT
CLOSE
END

```

(a)(b).exe
A,B,C

Programa de producto de matrices, ejecutable, se le puede invocar como subprograma dentro de programas de graficaciones o transformación mediante las instrucciones:

SHELL *(a)(b).exe* A,B,C donde A y B son las matrices a multiplicar en

modo texto en disco o en ram, C es la matriz de resultados, a escribirse en disco o en RAM

(a)-l.exe A, B Programa de inversión de matrices, se invoca y pasa nombres de matrices a transformar y transformada por línea de comandos

(a)t A, B Programa de transposición de matrices, pasando por líneas de comandos los nombres de matrices a transponer y transpuesta.

vx.bat (a)t uw0 uw1
(a)(b) uw1 uw0 uw2

Programa de procesamiento por lotes para obtener típico que efectúa transposición de uw0, lo convierte en uw1, y multiplica uw1 por uw0 obteniendo uw2.

La ambientación para la correlación interactiva de datos para diagnóstico, corrección de medidas, calificación de instrumentos, dibujos o trazos de piezas, puede hacerse creando programas que creen programas de procesamiento por lotes como el mostrado

APÉNDICE D

BREVE RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INVESTIGACIONES PRINCIPALES DE TEMAS AFINES

La selección de los artículos se basan en los siguientes criterios por la originalidad y oportunidad de su aparición en el tema que abordan, por la semejanza de su análisis con esta investigación, por la semejanza de objetivos que persiguen, y por su utilidad en el desarrollo de nuevas tecnologías (nanotecnología, metrología 3D sin contacto o por visión)

Aunque se han publicado investigaciones de temas lejanos en revistas dedicadas a la ingeniería mecánica como ASME, de sociedades dedicadas a la metrología como METROLOGÍA del Sistema Interamericano de Metrología y METROLOGIA de la Academia Mexicana de Metrología (AMMAC), de instrumentación como **Instrumentation and Development** de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI), a la fecha los medios de publicación de las investigaciones más sobresalientes son:

Precision Engineering (Antiguamente el journal de la American Society for Precision Engineering {ASPE}, y actualmente de ASPE y de sendas sociedades: Europea {EUSPE} y Japonesa {JSPE}) Estas sociedades y revista, de muy estricto refereo, publican las más audaces investigaciones en el campo de la mecánica, nanotecnología y ciencias afines, de muy alta precisión Estas mismas sociedades organizan también cuatrianualmente un **Seminario Internacional de Ingeniería de Precisión (IPES)**, con refereo estricto, y la publicación de sus proceedings Participan en este foro principalmente universidades y centros de investigación en metrología, robótica, óptica, nanotecnología, telecomunicaciones

Measurement. Es el órgano de publicación de la International Measurement Confederation (IMEKO), foro científico de metrología, cuyos trabajos no se enfocan sólo a la ingeniería de muy alta precisión sino que abarcan también aspectos de la trazabilidad de las mediciones, universalidad de medidas, enseñanza y filosofía (científica) de la medida Esta sociedad organiza también un congreso trianual y publica las proceedings correspondientes Participan en este foro principalmente universidades, centros de investigación en metrología, y laboratorios primarios de la mayoría de gobiernos Este órgano propone pero no define nuevas magnitudes, unidades, patrones, normas y procedimientos Este órgano es similar al BIPM sin el carácter gubernamental de sus participantes

Metrologia (en francés) Órgano del BIPM, en su aspecto científico es de muy alta calidad, está dedicado básicamente a los aspectos de metrología básica (redefinición del metro, del kilogramo, de la sustitución del amperio por el ohm, etc). A la fecha la publicación de trabajos en el contexto de esta investigación es muy escasa.

Metrology. Órgano equivalente a **Metrologia** del BIPM en el bloque ex-soviético. No ha publicado temas en el contexto de esta investigación.

Se han buscado órganos de publicación de alta calidad equivalentes a *Transactions of IEEE*, pero a la fecha no han publicado trabajos en el contexto de esta investigación

La abundancia de publicaciones de IMEKO y en menor medida de Precision Engineering reportada, se considera justificada en los párrafos previos. Otras publicaciones importantes relacionadas con el tema de investigación se han citado ya en la bibliografía correspondiente de cada capítulo.

El formato de resúmenes de publicaciones fué respetado en cuanto es posible, y cuando ha sido el caso, se ha elegido el adoptado por Measurement, o por Precision Engineering, aunque con algunas correcciones, como caracteres gráficos que no tienen equivalencia con el alfabeto latino, o algunas faltas de ortografía según el inglés británico. Adicionalmente en algunos casos se subrayan las frases que relacionan sus temas con nuestro tema de investigación, cuando pueda no quedar claramente establecida por su título, o por su vaga descripción

D-A ANÁLISIS DE ERROR, MODELADO DE COMPORTAMIENTO DE INSTRUMENTACION MULTIEJE, INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL, SOFTWARE DE PRUEBA Y ANÁLISIS.

D-A 1 Temperature perturbation effects in a high precision CMM

P. S. Lingard, M. E. Purss, C. M. Sona, E. G. Thwaite and G. H. Mariasson

Abstract: Two definitive temperature perturbations were introduced into the environment of a high precision Leitz PMM-866 coordinate measuring machine (with scale temperature compensation) using heaters arranged to simulate aspects of horizontal and vertical temperature gradients in the Y-Z plane. A 250 mm ULE and Zerodur ball-bar was repeatedly measured by the CMM. The CMM itself was used to probe the specimen table as a reference plane during the course of the temperature change.

A vertical temperature gradient of up to 9 C across the granite linte comprising the probe carriage slideway produced an approximately linear change of apparent ball bar length with the time at a rate averaging about 1 $\mu\text{m deg}^{-1}$ C. Changes of slideway straightness and apparent specimen table height were also measured. However, a similar temperature rise of one steel bridge supporting column relative to the other produced a variable small effect, without change of apparent ball-bar length.

It is shown that the effect of introducing the vertical gradient can be predicted assuming a curvature of the portal beam giving rise to a gradient of pitch along the slideway and resulting in probe tip position errors which, to a first approximation, vary linearly with duration of the temperature gradient. A finite element thermal stress analysis technique is employed to explore the measured distortion of the slideway beam.

Keywords: coordinate measuring machines, temperature effects.

D-A 2 **The Assembly/Adjustment of Coordinate Measuring Machine and the Analysis of Error**

Jiro MATSUDA, Hiroshi YANO, Tadao NAKAYA and Katsuyuki OGURA

The measurement errors of a CNC coordinate measuring machine is known to depend on machine adjustment carried out in the final assembling process. The purpose of this study is not only to identify the factors in the adjustment procedure that have large effect on accuracy of measurement, but also thereby to improve the efficiency and the performance of adjustment. Experiment was performed on the direct product of orthogonal arrays L₃, and L₄, which were assigned adjustment and measurement conditions, respectively. Analyses were carried out from the viewpoints of error magnitude and dispersion. The rigidity of the air bearing of Y axis was found to have the largest effects on the dispersion, but not on the magnitude. The perpendicularity in various planes are found to have the second largest contribution to both the magnitude and the dispersion. Efficiency of the adjustment procedure was improved significantly on the basis of these results.

Key words: CNC, coordinate measuring machine, quality engineering, SN ratio, analysis variance, orthogonal array, signal factor, error factor

[JSPE-57-121, 91-12-2225 j]

D-A 3 **Modeling the errors of multi-axis machines: a general methodology**

J. A. Soons, F. C. Theuws, and P. H. Schellekens, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands

Abstract. A methodology is presented to obtain a generalized error model, for multi-axis machines of arbitrary configuration. The model accounts for errors due to inaccuracies in the geometry, finite stiffness, and thermal, deformations of the machine's components. Special statistical techniques are applied to the calibration data to obtain an empirical model for each of the errors. In a feedback loop, the identified significant parameters in these models are used for the computer-aided optimization of artefact-based test procedures. Results are shown for a five-axis milling machine and a three-axis coordinate measuring machine.

Keywords: multi-axis, machines, volumetric accuracy, nonrigid body effects; least squares estimation; calibration, performance test.

PRECISION ENGINEERING, January 1992, vol 14, n 1

D-A 4 **PREDICTION OF POSITIONAL ERRORS OF A THREE AXIS MACHINE TOOL USING A NEURAL NETWORK**

Narayan Srinivasa, John C. Ziegert, and Scott Smith
Department of Mechanical Engineering University of Florida, Gainesville, Florida

ABSTRACT. The accuracy of a part being machined depends directly on the total error in position of the cutting tool with respect to the workpiece. This error is due

to a combination of geometric and thermally induced errors that occur in the structural elements of the machine tool. In this paper, the positional error map of a three axis machine tool is predicted using a neural network based on the back-propagation algorithm. The inputs to the network are the three coordinates of the cutting, tool and a bias input corresponding to each of these coordinates which is used to account for the direction of motion of each slide. The outputs from the network are the components at the tool point positioning error at this point in the workspace. These bias nodes account for the reversal errors that occur in machine tools. Three different training sets were created using the kinematic model of the machine tool with different methods in sampling the data. Computer simulations show that the neural net is able to learn the error map of the three axis machine tool accurately with excellent generalization properties in both ideal and noisy environments.

JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation – Vol 1 ASME 1992

D-A.5 A statistical analysis of positional errors of a multiaxis machine tools

Y. C. Shin* and Y. Weit.

*School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, and Department of Industrial and Management Systems Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA

Abstract. This paper addresses one of the most fundamental problems in precision engineering: machine tool repeatability. The paper presents a synthesis and transformation method for the prediction of Accuracy and repeatability of any cinematic machines based on the error information in each axis, which can be measured by using a measurement device such as laser interferometer. It also introduces a procedure to calculate the probability of positioning errors, with a specified limit, based on the homogeneous transformation method in conjunction with a statistical synthesis technique for mean and variance composition. An example shows the actual calculation of probability curve with respect to different tolerance values.

Keywords machine tools, accuracy; repeatability; error modeling; statistical modeling

PRECISION ENGINEERING, JULY 1992, VOL 14, N 3

D-A 6 Testing of coordinate measuring machine software

F. Wildele, B. Bittner, K. Busch, R. Drieschner, and R. Elligsen
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Postfach 33 45, 3300 Braunschweig,
Germany

Abstract. The measuring accuracy of coordinate measuring machines (CMMs) depends to a large extent on the software system implemented. For this reason, the Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) supported by the Commission of

the European Communities (Community Bureau of Reference; BCR) has started a project to test this software. Simulated data sets representing parts of geometric elements with known distortions were distributed to manufacturers of CMM software. The results of various software packages were compared with those of PTBs reference software. All evaluations were based on the Gaussian least-squares method. The main result of the test showed that only 37 % of the solutions were acceptable. An investigation was also conducted into the ability of current CMM software to measure gears and to check geometric tolerances according to ISO 1101 and ISO 5459.

Keywords: coordinate measuring machines; software

PRECISION ENGINEERING, APRIL 1993 VOL 15, N. 2.

D-A.7

**MATHEMATICAL PROBLEMS IN METROLOGY
MODELLING AND SOLUTION METHODS**

N. Bellomo and L. Preziosi Department of Mathematics, Politecnico, Torino, Italy

Abstract. This paper provides a survey of mathematical methods, from modelling to solution techniques, related to the analysis of systems in continuum physics. The general frame work is the one of the mathematical problems which arise in metrology and, in particular, in thermophysical applications. The content is focused to the mathematical treatment of nonlinear problems for partial differential equations with particular attention to inverse and stochastic problems

Keywords. Modelling in metrology, non-linear models, inverse and stochastic problems

**Proceedings of the Workshop
Advanced Mathematical Tools in Metrology, Torino, Italy, October 1993**

D-A 8 **Self-calibration with application to CMMs geometry error correction**

Pier Carlo Cresto

Istituto di Metrologia "G. Colonnelli" - CN-K - Strada delle Cacce 73, Torino

Abstract Coordinate measuring machines (CMM) are more and more used in dimensional metrology Their calibration is frequently a long procedure requiring expensive ancillary instrumentation. Therefore, faster and cheaper calibration methods are desirable. Selfcalibration by means of reference artifacts (ball-plates) fulfils the requirements. In addition, calibration accuracy seems to be improved. The paper presents the mathematical foundations of the procedure, and the algorithm developed by IMGC

Keywords CNM, ball-plate, selfcalibration, kinematic model

**Proceedings of the Workshop
Advanced Mathematical Tools in Metrology, Torino, Italy, October 1993**

D-A.9 SOFTWARE FOR GEOMETRICAL INSTRUMENTS AND ITS EVALUATION BY USING VIRTUAL MACHINES

Sanchez J-; Ruiz G Centro de Instrumentos, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Abstract Instruments for geometrical measures as. x-y tables, scanners, microscopes, CCD cameras, coordinate measuring machines (MMC's), and any real machines suffer geometric deviations, so that a process of calibration and correction is needed When they are used as precision instrument. Several tests have been developed to verify and calibrate such instruments, but the reliability for all tests and methods of calibration is not guaranteed. This work deals with three ideas: the first one is the discussion of modes to interpolate errors inside volume of measure, the second one is the development of a synthetic machine, made to capture data from potentially real CMM'S, quickly and free of environmental variations; the third one is the employ of that kind of machines to evaluate different methods of calibration The mechanical properties of machine and corrected data are translated to CAD mediums, assuring right geometrical meaning.

5th Symposium on **DIMENSIONAL METROLOGY In Production and Quality Control, 25-27 October 1995 Zaragoza Spain.**

D-A.10 3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a kinematic touch trigger probe

J.R. René Mayer *, Abdeljabbar Ghazzar, Olivier Rossy

Ecole Polytechnique, Department of Mechanical Engineering, C.P. 6079, Succ. "Centre-Ville", Montréal, Québec, Canada, H3C3A7

Abstract Kinematic touch trigger probes are widely used with coordinate measuring machines (CMMs) to register the position of their axes when contact between the probe tip and the object occurs. However, much interest has been devoted recently to the compensation of systematic errors produced by this type of probe due to the pre-travel variation. This paper proposes an experimental means of characterising the pre-travel behaviour of the probe system in 3D and independently of the CMM error sources. On the basis of these results, a 3D error correction model is proposed which determines the actual pre-travel. The model only requires a small number of parameters for its definition. It is based on a sliding contact between the probe tip and the object. A method for updating the model from CMM measurements on the re-qualification sphere is then presented. The effect of the stylus length and of the tilt of the probe axis relative to gravity are also studied. Experimental validations show that the simple correction model provides an effective correction of the probe systematic error. © 1997 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Kinematic touch trigger probe, Coordinate measuring machines; Pre-travel; Error correction, Dimensional metrology

D-A 11 EVALUATING MASTERS AND PROCEDURES OF CALIBRATION WITH NON LINEAR COMPUTATIONAL MECHANISMS

Sanchez J., Padilla S., Ruiz G.

Metrology Department, Instruments Center, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Abstract: To date, many masters, mathematical models and procedures of calibration of coordinate measuring machines (CNWs), have been developed in order to satisfy purposes such as: the knowledge of bandwidth of errors, the knowledge of their behavior under several conditions, the improvement of their accuracy, the establishment of mathematical relations and physical tests that could relate properties of accuracy in one and three dimensions, and therefore to establish traceability criteria. Although there are previous computational developments that aid those tasks, the own is conceived for fine analysis, that can include dynamic and thermal conditions. It is built with solids, and the masters like the bodies of machine, may be considered as a part of machine; so parts of machine may be represented into "perfect" CAD ambient. Real conditions of touching of masters and their readings are the primary matter which may be used to assert the right correction of software, as well the use of masters for diagnose fine and non linear errors of machines.

Keywords: virtual machines, geometric modeling

IMEKO World Congress 1-6 JUNE 1997, Tampere Finland

D-A 12 VIRTUAL COORDINATE MEASURING MACHINE FOR EVALUATION OF PERFORMANCE IN FAST PROBING

Y. Cheng, B.C. Wang, T. Shunshi and A. Shimokohbe

Precision & Intelligence Laboratory Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8503, Japan

Abstract For in-line inspection, coordinate measuring machines (CMMs) are expected to probe much more points per minute. In fast probing of CMM, inertial forces and driving forces will cause dynamic deformation of the mechanical structure and bearing gap change of the air-bearings of the machine. In this paper, a Virtual Coordinate Measuring Machine (Virtual-CMM) approach is proposed, to evaluate and compensate the measuring errors in fast probing. A bridge-type CMM is chosen as the object of case studies. Models are established for its mechanical structure and air-bearing systems. Algorithms about inertial and driving forces, deformation or bearing gap change, and probing point position errors are also investigated. With the developed Virtual-CMM software system, the measuring process of an inspection task could be simulated. The system can evaluate the points position error caused by fast probing of the CMM. Two case studies, measuring of a cylinder gauge and a plane plate, are introduced. In this

way, the measuring accuracy and uncertainty of fast probing for CMMs in production line, could be calibrated and compensated virtually

Keywords: CMM, Virtual machine, Error evaluation, Fast probing.

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

D-A.13

**THE EFFECT OF THERMAL EXPANSION AND POSITIONING
MEASURING SYSTEM ON THE ACCURACY OF MACHINE TOOLS**

P. Oksanen, S.J. Torvinen and P.H. Andersson

Institute of Production Engineering, Tampere University of Technology, Tampere,
Finland

Abstract: Thermal behaviour of machine tools is one of the main reasons for process dispersion of modern accurate production. This paper presents a project concept for comparison of the effect of thermal expansion and positioning measuring system on the accuracy of machine tools. The aim of the project is to research and compare the positioning accuracy of pulse encoders and linear positioning measurement systems in different temperature conditions. Both measuring systems will be used interchangeably on each machine tool at the same time as temperature measuring system will be gathering information on temperature behaviour. The main goal is to get better production accuracy and use research results to construct new machine tools. The test environment will include modern sheet metal turret punch press and two horizontal machining centres. Before the actual test phase the initial state of the machinery will be examined in a throughout inspection using both conventional measuring equipment and modern quick tests using a double ball bar and a grid encoder devices. All actual workpiece and test piece measurements will be performed in a coordinate measuring machine at the accredited measuring laboratory of the Institute of Production Engineering.

Keywords: machine tool, positioning, accuracy

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

D-A.14

**RESEARCH INTO ROTATIONAL ERRORS OF A COORDINATE
MEASURING MACHINE TABLE**

A. Rymewicz, M. Kowalski, J. Gawlik and J. Rewlak

Department of Production Engineering,
Cracow University of Technology, Al. Jana Pawla II 37, 31-864 Krakow, Poland

Abstract: The paper presents the measuring stand for inspecting rotational errors incurred during travel of a Coordinate Measuring Machine table and the testing procedure. The measurement method applies laser interferometer equipped with additional units for measuring angular displacements. For analytical description of

obtained data spline functions were used. It made it possible for a total coordinate measurement error to be calculated in any point of a measuring space.

Keywords: measurement, rotational errors, coordinate machine unit.

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

D-A.15 A software system to estimate the uncertainty contribution of the workpiece shape in coordinate metrology

M. Knauer, A. Weckermann,

Department Quality Management and Manufacturing Metrology, University
Erlangen-Nuremberg 91052 Erlangen – Germany. qfm@qfm.uni-erlangen.de

Abstract. In coordinate metrology the shape of the workpieces under inspection is probed point-by-point. For geometric features (straight line, circle, plane, cylinder, cone, sphere) geometrical ideal substitute elements are calculated from the measured point coordinates according to different evaluation criteria. Using objective-oriented evaluation criteria, the parameter values of the substitute element depend on the coordinates of only a few specific sampled points in extreme location, which are determined by the form, especially the form deviations of the workpiece. For that reason the workpiece shape in connection with the measurement strategy contributes to the uncertainty of the measurement result. A simulation system was built up to investigate the consequences of real workpieces subject to deviations on the uncertainty of characteristic values calculated with objective-oriented evaluation algorithms. With the help of such a tool it is possible to define appropriate task specific measurement strategies.

Keywords: coordinate measuring machine, measurement strategy, uncertainty, simulation

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

D-A.16 Virtual-CMM for Fast Probing using FEM Approach

*Y. Cheng *, B. C. Wang, T. Shimshu and A. Shimokohbe*

Precision & Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology
Nagatsuda 4259, Midori-ku Yokohama, 226-8503, Japan
shimo@pi.titech.ac.jp

Abstract. Fast probing is an effective way to improve measuring efficiency of CMMs. In fast probing, the machine structure is deformed and the air-bearing gaps are changed by inertial and driving forces, so that the probe position is deviated. A Virtual-CMM software could be used for simulating the behavior and performance of CMM. In this paper, a FEM approach is proposed for establishing the fast probing error model. In FEM modeling and computation, the whole CMM is divided into 4 major assemblies, to reduce FEM computation amount. A soft material cushion model is proposed to simulate the effect of real air-cushion.

Based on the fast probing error model and machine structure model, the Virtual-CMM software system is developed. Application case studies are presented for measuring and calibrating of CMM. The concise models and algorithm can be embedded into CMM controller for real time error compensation and virtual calibration of CMM.

Keywords: CMM, Fast probing, Virtual machine, Calibration, FEM

IMEKO XV World Congress, PROCEEDINGS
June, 13 – 18, 1999 Osaka, Japan

D-B DISEÑO Y CONTROL DE INSTRUMENTOS 3D, INSTRUMENTOS Y PROCESOS DE MEDICION 3D DE NO CONTACTO.

D-B.1 Development of a System for Measuring Dimensions Based on the Detection of Positional Vectors and Normal Vectors

Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI, Katsumasa SAITO and Masaharu KAWAI

This paper presents the development of a system for measuring a positional vector and a unit normal vector of a point to be measured, and proposes new measuring methods of dimensions such as a distance between parallel planes and radii of a cylinder and a sphere. The system is constructed of a CNC three coordinate measuring machine and a newly developed probe which consists of a quartz glass ball with a thin resistant film of thin and four electrodes of Au. Since the probe is able to directly detect the contact point between the probe and an object to be measured, the system is able to measure a position vector and a unit normal vector of the contact point. The measuring accuracy of the system is 0.1 degree in the directions of 0 and 95 which are spherical coordinates to indicate the normal vector. The proposed methods are based on measurements of position vectors and unit normal vectors, and obtain two-fold and threefold measuring efficiency in comparison to conventional methods. The usefulness of the proposed methods is confirmed by experiments of measurement of a block gauge, a cylinder gauge and a steel ball.

Keywords: coordinate measuring machine, probe, position vector, unit normal vector, dimension, plane, cylinder, sphere

JSPE, MAY 1991, VOL 57, N 5

D-B.2 Non- contact optical probing sensor applying optical feedback effects in laser diodes

J. Kato*, J. Yamato†, N. Kikuchi†, R. Furutani† and S. Ozono†

*Optical Engineering Lab, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1, Hiroosawa, Wako-shi, Saitama, 351 -01 Japan

†Department of Precision Machinery Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japan

The possibility of a non-contact optical distance/displacement sensor, making use of optical intensity variations caused by optical feedback effects in laser diodes, was investigated. A compact sensor system and a simple signal processing technique were proposed to realize the sensor system. The experimental results indicated that the resolutions were of sub-mm order in distance measurements and about 40 nm. in displacement measurements. The allowable maximum speed of displacement can be improved up to several cm/s. The influence of temperature variation on the measurement accuracy was discussed and the advanced sensing technique utilizing a synthetic wavelength of laser diodes was proposed. These methods are applicable even to an object with rough surfaces.

Keywords: Optical, non-contact, probing sensor, laser diodes, optical feedback

ELSEVIER - Measurement, Oct – Dec 1991, Vol 9, N 4.

D-B.3 Interference probe head for coordinate measuring machines

Marek Dobosz *, Eugeniusz Ratajczyk

*Centre for Metrology and Measuring Systems, Warsaw University of Technology,
Chodkiewicza 8, 02-525 Warsaw, Poland*

Abstract. The idea and theory are presented of a probe head with interferometric transducer for coordinate measurement by means of coordinate measuring machines. The main metrological parameters of the switching probe are described, as well as a method of their calculation. The test stand is presented together with the results of investigation of the interference probe prototype.

Keywords. Coordinate measuring machine, Switching probe, Laser interferometer.

ELSEVIER - Measurement, 14 (1994), 117-123.

D-B.4 A new damper design for machine tool structures: the replicated internal viscous damper

Alexander H. Slocum, Eric R. Marsh, and Douglas H. Smith, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

Abstract. Good stiffness and damping are each necessary, but not individually sufficient, requirements for a precision machine. Damping provided by the materials and joints in a machine are typically low. This article introduces the concept of an internal damping device: a replicated internal viscous damper. This type of damper uses internal beams covered with a viscous fluid that are then replicated in place inside structural members. The viscous fluid first acts as a mold release and then as a very thin viscous shear layer. The design theory is developed and shown to agree with experimental results. Amplification at resonance factors (i.e., the quality factor Q) on the order of 20 are obtainable (one to two orders of magnitude better damped than many types of materials). This enables machine tool and instrument design engineers to worry less about material damping considerations, which can help to increase design options.

Keywords: replicated internal viscous damper; viscous fluid; damping

PRECISION ENGINEERING, JULY 1994 VOL 16, N 3.

D-B.5 A surface motor-driven precise positioning system

Yoshiyuki Tomita, Yasushi Koya Inagawa, and Fumiaki Satoh

Systems Engineering Laboratory, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan

A novel precise positioning system incorporating a surface motor (SFM) drive, called the SFM positioning system, has been developed and its performance experimentally evaluated. The positioning stage is guided along a base plate by three air-bearing pads and driven in 3° of freedom (x, y, O_z) by coupled forces produced by three brushless-type linear DC motors. The positioning and guidance of the stages planar motion is accomplished via the simultaneous operation of three identical force-controlled servo systems with a laser interferometer position feedback loop. The system's advantageous design features and its fundamental configuration and operating principles are described. In addition, we discuss the design of the servo control system, being based on proportional-integral-derivative and decoupling compensations and providing dynamic accuracy as well as rapid response capabilities, including the control system configuration, which incorporates a high-performance parallel processor. Evaluations of experimental positioning tests indicate that a resultant positioning resolution of 10-20 nm, maximum speed of 150 mm/s, and frequency response bandwidth of 105 Hz are successfully achieved.

Keywords: surface motor; positioning system; laser-interferometer system; servo control,- laser micromachining; semiconductor production

PRECISION ENGINEERING, JULY 1994 VOL 16, N 3

D-B 6 Development of a new non contact probe for 3D CMM

T MIYOSHI and Y TAKAYA

Osaka University, Osaka, Japan

Abstract. This paper describes development of a new non-contact probe for 3 dimensional coordinate measuring machine(3D-CCM) which is not influenced very much by inclination angle and radius of curvature of the work surface and can measure accurately profile of 3-D free form surface. We propose an unique non-contact probe called "optical ring image sensor" From on-machine measurement as well as fundamental experiments, it is verified that this proposed probe is a very useful sensor for profile measurements of delicately shaped surfaces such as sculpture surfaces, model surfaces, mold cavity surfaces etc

Keywords: Non-contact measurement, 3D profiles, 3D-CMM, Free form surface, On-machine measurement

IMEKO XIII World congress 5-9 Sept. 1994 Torino Italy

D-B.7 **ScanMax - a novel 3D coordinate measuring machine for the shop-floor environment**

Werner Lotze

IMM Ingenieurbuero fuer Moderne Messtechnik, Dresden

Abstract. Coordinate measuring machines (CMM) are universal devices for geometrical quality inspection of workpieces in manufacturing. But conventional CMMs are very large, expensive and very slow because of the point-by-point mode, they require a specially trained operator and exquisite environmental control. A novel CMM consisting of only one linear guideway and two linkages as known from Scara robots is described. It is manually operated in scanning mode with up to 400 measuring points per second. The high accuracy of the system has been reached by the precise design, the 3-D analog probe and force sensor, a novel calibration system for determining the linkage parameters as well as powerful correction of geometric, cinematic and deformation errors. Thermal errors are reduced to a great extent by carbon fibre and ceramics. The overall accuracy of the system is about 5 μ m. The software contains powerful models for data validation and error correction, automatic detection of geometric elements, evaluation of form profiles as well as for calibration and self testing.

Keywords: Quality control, Coordinate measurement, Workpiece scanning; Error correction

ELSEVIER. *Measurement*, V. 18, N. 1, (1996), pp. 17-25

D-B.8 **SCANMAX - A NOVEL 3D COORDINATE MEASURING MACHINE FOR SHOP-FLOOR ENVIRONMENT**

Werner Lotze, Dresden

IMM Ingenieurbüro für Moderne Messtechnik, Dresden, Germany

Abstract: Coordinate measuring machines (CMM) are very universal equipments for geometrical quality inspection of workpieces in manufacturing. But conventional CMM's are very large, expensive and very slow because of the point by point mode. They require special trained operators and exquisite environmental conditions. A novel CMM based on the Scara robot cinematic has been developed. It is manually operated in scanning mode with up to 400 measuring points per second. The high accuracy of the System has been reached by the precise design, the 3D analog probe and force sensor, a novel calibration system and the correction of geometric, cinematic and deformation errors. Thermal errors are reduced to a great extent by carbon fibre and ceramics. The overall accuracy of the system is about 5 μ m. The software contains powerful models for data validation and error correction, automatic detection of geometric elements, evaluation of form profiles as well as for calibration and self testing

Keywords: Quality control, coordinate measurement, workpiece scanning

D-B 9

SURFACE MICROGEOMETRY 2D I 3D MEASUREMENTS

T. Miller

Department of Geometrical Metrology The Institute of Metal Cutting 30-011
Cracow, Poland

Abstract: The stand and software allowing measurements of surface microgeometry using contact method in the range of traditional 2D and stereometric 3D measurements are presented. PGM-1C profilometer, computer, special equipment for three dimensional measurements and metrological system software integrated with the system are included in the stand. The range of applied measurement results analysis, calculated parameters and distributions for roughness, waviness and real profile (non filtered), possibilities of results graphical presentation as well as calculations performed for 3D measurements are presented. Directions of software development being a result of measuring instruments users needs, including process engineers are stated. The meaning of execution of stereometric 3D measurements is emphasised and examples of their usage for technological needs are shown. The examples of comparison of measurements results analysis application executed using traditional methods with possibilities achieved using stereometric measurements results analysis are presented.

Keywords: three-dimensional analysis, surface roughness, roughness parameters

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-B.10

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TOLERANCES ON ROBOT PRECISION

D.M. Todoran

Universitatea de Nord Baia-Mare, Romania

Abstract: We present an analysis of the influence of the tolerances of the component elements and the precision of the excentric element of a robot. The paper describes an analysis of the calculation of deviation of a robot executive element, depending on the tolerances of his component elements. For example, the case of a DDS-structure is presented. The deviations are established according to the influence of the component on the command problems.

Keywords: precision, technology, robot

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-B.11 A NEW MODEL OF THEODOLITE INDUSTRIAL MEASURING SYSTEM

C. Xiong 1 and S. Ye 2

1 Department of Civil Engineering,
2 College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering,

Tianjin University, 300072 Tianjin, P. R. China

Abstract: Comparing with Coordinates Measuring Machine (CMM), Theodolite Industrial Measuring System (TIMS) can be easily moved and it can measure large-sized industrial targets contactlessly. But up to now the precision of TIMS has been considered so low that TIMS isn't applied to some industrial measurements. The error in self-locating of TIMS is a main factor which affects the precision of TIMS. A new model of TIMS is given out in this paper, and it can eliminate the error in self-locating of TIMS. The new model is not only investigated and analyzed theoretically but also verified by the real measured data.

Keywords: model, theodolite industrial measuring system (TIMS), self-locating of system.

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-B.12

Development of 3 DOF Parallel-CMM

M. Hiraki 1, N. Yoshikawa 1, K. Takamasu 1 and S. Ozono 1
1 The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
hiraki@ozono.pe.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Coordinate Measuring Machines (CMM) have been developed and widely used to industrial goods. Traditional CMM tends to become large and heavy in order to avoid the influence of the bending and twisting of its components and to decrease measurement errors, because it is based on a serial mechanism. This paper deals with the development of a new type of CMM device used a parallel mechanism. The position of the probe is calculated by solving the forward kinematics.

The equations of forward kinematics include some kinematic parameters, such as the length of connecting rods, and it is necessary to decide these kinematic parameters for calculating the position of probe ball accurately. In case of small parallel mechanisms, other larger measuring machines can measure these kinematic parameters, but it is difficult to measure the parameters of huge mechanism using another measuring machines. Therefore, we use artifacts to identify the kinematic parameters.

Keywords: Parallel mechanism, Coordinate measuring machine, Parameter identifying, Calibration

**IMEKO XV World Congress, PROCEEDINGS
June, 13 – 18, 1999 Osaka, Japan
Nota: DOF – Degrees of freedom**

D-B.13

ACTIVE ERROR COMPENSATION FOR PRECISE MACHINES

R. Bansevicius 1, V. Giniotis 2 and J. Knight 3
1 Kaunas University of Technology, Kestucio 37, 3004 Kaunas, Lithuania

2 Vilnius Gediminas Technical University, 2038 Vilnius, Lithuania
3 De Montfort University, The Gateway Leicester, UK

Abstract The paper deals with the active error compensation effected by using links or components made from piezoactive (piezoelectric or magnetostrictive) materials. It is shown that by implanting of active links into the technological chain of the measuring equipment both static and dynamic errors can be sufficiently reduced. Some considerations according to new approach to error compensation circuits and actuators are presented. Compensation covers not only generally accepted measurement systems, but also opens new ways of increasing the accuracy of such typical components of technological machines as beddings, slideways, fixing and datum keeping surfaces. Two- and three-dimensional correction methods and means are presented.

Keywords Error compensation, Piezoactive links, Active kinematic pair, Infinite stiffness, Active supports

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**

D-B.14

COORDINATE MEASURING MACHINE USING PARALLEL MECHANISM

T. Oiwa

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Shizuoka University, 432-8561 Hamamatsu, Japan

Abstract. This study proposes a new coordinate measuring machine (CMM) based on a spatial 3DOF parallel mechanism. The use of this mechanism will potentially improve the stiffness, accuracy and efficiency. This paper describes the fundamentals and an experimental CMM

The influence of link layout on the measurement uncertainty, moreover, has been investigated analytically and experimentally. Obtained results show that the uncertainty has been decreased when the measuring point is in the extensional direction of the scale unit. Consequently, the Abbe's principle can be applied to proposed parallel mechanism

Keywords Coordinate Measuring Machine, Parallel Mechanism, Abbe's Principle

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**

D-B.15

CMM PROBE TESTING BY MEANS OF A LOW FORCE SENSOR

A. Wozniak and M. Dobosz

Institute of Metrology and Measuring Systems, Warsaw University of Technology
Chodkiewicza 8 St 02-525 Warsaw, Poland

Abstract: The method and the computerised set-up for the accuracy of touch trigger probe testing, outside CMM is discussed. A high resolution interference displacement transducer with a low measuring force is applied. The results of preliminary tests of TP2-5W and TP6 (Renishaw) probe in XYZ space are shown. The metrological characteristics of the probe are analysed.

Keywords: coordinate measuring machines, touch trigger probe

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**

**D-B 16 CONTACT FORCE AND POSITION SENSOR WITH QUARTZ
RESONATORS**

S. Muraoka

Osaka Institute of Technology
5-16-1, Ohmiya, Asahi-ku, Osaka 535-8585, Japan

Abstract: Because it is superior in local sensing, tactile sensing for environment recognition has been studied. In this paper, a contact force and position sensor for recognizing the environment and controlling the grasp force is proposed. The sensor incorporates four pairs of quartz resonators mounted in a robot finger and can measure two-dimensional contact force and one-dimensional contact position along the finger. The force sensor is insensitive to electrical noise since the output is a frequency which shifts in response to a change in the external force. This type of force sensor also has quick response, high sensitivity, high resolution and wide bandwidth. The performance of the sensor was examined experimentally. To demonstrate the capabilities of the sensor in recognizing an environment, two-dimensional shapes were reconstructed by tracing the surface with the sensor.

Keywords: sensor, quartz resonator, contact force and position

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**

**D-B 17 PARALLEL MECHANICAL SYSTEM FOR 3-D MEASURE OF SMOOTH
SURFACES**

K. Mianowski

Institute of Aeronautics and Applied Mechanics
Warsaw University of Technology, Nowowiejska str. 24, 00-665 Warsaw, Poland

Abstract: A new parallel manipulator POLMAN-3 for the use of the measurement applications is presented in the paper. It is parallel mechanical arrangement with three degrees of freedom equipped with typical slide gauges and computer for acquisition of the data. Manipulator is consist of three properly situated serial-parallel chains connected in parallel way to mobile platform, which has the form of half-spatial cross. It is equipped with spherical joints and is attached to actuated mechanisms with using six identical rods similarly to the DELTA robot [1].

Because of good isotropy [2] of the mechanical part, and homogenous space structure, mechanism has very good kinematic manipulability, and so the generated errors are similar in each direction in 3-D space and similar to errors of slide gauges. All gauges are mounted in the base of the system. Manipulator can be use for the measure of smooth surfaces after technological operations. Because of special geometry some properties of its are similar to the cartesian manipulator. Adopted kinematic systems allows for easy solution of both inverse and direct kinematic tasks [3]. Mechanical construction of the system are modular and very light, each elements are low cost in fabrication.

Keywords: Parallel manipulator, 3-D measuring device, direct kinematics

IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna

D-D ESTÁNDARES, TRAZABILIDAD, NORMALIZACIÓN, UNIVERSALIDAD, PROCESOS DE CALIBRACION 3D

D-D.1 Comparison of different artefacts for interim coordinarte measuring machine checking: a report from the Swiss Standards Committee

W. Knapp, Engineering Office La Sauge, 1534 Sassel VD, Switzerland

U. Tschuid: Societé Genevoise d' instrluments de Phyiisque, 19 ue Pré-de-laFontaine, Pr(-do- 1217 Meyrin 1, Swtzerland

A. Bucher, Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich), Department of Machine Tool Construction and Production Engineering (IWF), 8092 Zurich, Switzerland

Abstract. International and national standards organisations as well as several institutes and companies have developed different methods for use as acceptance 'tests of coordinate measuring machines (CMMs) and for the periodic interim checking of their accuracy. Most of these methods are completely or partly based on the measurement of artefacts, such as gauge blocks or ring gauges. It is difficult for the user of CMMs to compare the various procedures and to decide which is best for his particular needs.

The proposed artefacts are quite different with regard to

- * *The capability to detect errors of geometry and of the measuring system of the CMM*
- * *The capability to detect errors of the probing system*
- * *The method and ease of calibration, the accuracy, and the measuring uncertainty of the artefact*
- * *Available dimensions and graduations*
- * *Handling and practical aspects (such as detector of dust and cleaning possibilities),*
 - * *Availability and price*
 - * *Setup time and time for checking*

Influence of changes of environment conditions, especially temperature variations

A comparison of advantages and disadvantages of most common artefacts, presented in a table for each criterion gives an overview

PRECISION ENGINEERING, OCTOBER 1991 VOL 13, N 4.

D-D 2

Evaluation of a Coordinate Measuring Machine by Using a Three-dimensional Tracking Laser Interferometer

Osamu NAKAMURA, Mitsuo Goto, Kouji TOYODA, Nozomi TAKAI, Toshiro KUROSAWA and Tohru NAMATA

A new method for evaluating the coordinate error of commercial CMMs by using a newly developed three-dimensional tracking laser interferometer is proposed. The length between a moving Cats'-eye retroreflector set to the probing head of a CMM and the rotation center of the 3 D tracking interferometer is measured and used for estimating the coordinate error at each sampled point based on nonlinear least squares. The measurement accuracy with the proposed method including the optical path accuracy of the Cats'-eye retroreflector and the structural accuracy of the tracking mechanism is evaluated both theoretically and experimentally.

Key words: coordinate measurement, CMM, laser interferometer, laser tracking, coordinate calibration, nonlinear least squares

[JSPE-58-1992 11-1899]

D-D 3

Self-calibration method and software error correction for three-dimensional coordinate measuring machines using artefact measurements

J P Kruth, P Vanherck, L De Jonge

Katholieke Universiteit Leuven, Departement of Mechanical Engineering, Celestijnenlaan 300B, B-3001 Leuven, Belgium

Abstract. The proposed self-calibration method uses an artefact, a ball plate, for error identification. Unlike other methods this ball plate need not be calibrated, i.e. the distances between the different balls on the plate need not be known accurately. After measurement of the ball plate in different positions within the measuring volume, the systematic geometrical errors, like scale errors, axes' pitch, yaw and non-orthogonality, of the geometric error model of the measuring machine can be calculated. This geometrical error model is used afterwards by the software error correction to correct on-line every single measurement carried by the measuring machine. This results in a higher accuracy of the measurement. As an example, the self-calibration method has been carried out on a CNC 3-D coordinate measuring machine and the resulting software error correction has been evaluated using step-gauge measurements. The results of the evaluation show that the systematic geometrical errors are greatly reduced.

Keywords: Three-dimensional coordinate measuring machines, Calibration; Software error correction; Error identification; Geometrical errors, Artefact measurements

ELSEVIER – Measurement 14 (1994) 157 – 167.

D-D.4 **An alternative method for calibrating and mapping errors in CMM**

J.V. SANCHEZ, G.B. Ruiz, R.S. NAVA and S.O. PADILLA

University of Mexico, Centro de Instrumentos, Del. Coyoacan, D F Mexico

Abstract The present work is focused in the difficult to calibrate, to interpolate and to represent final systematic errors in machines of three axes, as product of elementary errors of scale, orthogonality, straightens, pitch, yaw and roll. Simple methods to calibrate, to model, and to solve resultant equations are proposed. The proposed calibration method is based in the invariability of length of a ball bar, for any location and orientation, similarly to ANSI B 89.1 standard, or CMMA recommendation. Since the composition of final errors is only an A_x , A_y , A_z vector for each x , y , z , position, it is proposed the employing of simple adjustable models that correlate them, avoiding functions for cinematic propagation. Finally, the solved model may be used to map first order errors, to correct primitive data, or to correct mechanical properties as straightness on guide ways, or squareness. The proposed method has been tested in defective virtual CAD machines with both, linear three dimensions' errors and non linear errors in two dimensions

Keywords: 3D calibration, modeling CMM'S

IMEKO XIII World congress 5-9 Sept. 1994. Torino, Italy

D-D 5 **CMM verification: a survey**

Paulo Cauchick-Miguell^{a,b}, Tim King^a, Jim Davis^c

^aMechatronics Group, School of manufacturing & Mechanical Eng., The University of Birmingham, Edghaston, Birmingham B15 2TT, U.K.

^bCentro de Tecnologia - UNIMEP, Santa Babara d'Oeste, Brazil

^cCommercial Development Unit, Coventry University, Priory Street, Coventry CV1 5FB, U.K

Abstract. This paper surveys various testing methods, conditions and specifications for checking Co-ordinate Measuring Machines (CMMs) Firstly, it describes and compares test specifications of the most important standards Secondly, the paper provides a review and a classification of various testing methods based on mechanical artifacts, optical techniques, and opto-mechanical devices. Finally, artifacts used for probing performance verification are outlined and potential research areas are identified

Keywords: CMM performance verification; Mechanical artefacts, Laser interferometer

ELSEVIER PII: S0263-2241(96)00001-28
Measurement Vol. 17, No. 1, pp. 1-16, 1996

D-D 6 **A 3-D noncontact trigger probe for coordinate measuring machines**

Q Yang, C. Butler

Department of Manufacturing and Engineering Systems, Brunel University, Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, U.K.

Abstract. This paper presents a novel non-contact fibre optic probe for 3-D feature measurement on coordinate measuring machines (CMMs). With an optical fibre array to locate part edges and surfaces, the probe can not only measure 3-D features, but also determine the probing direction and speed. Furthermore, it can also compensate for variations in surface reflectance

Keywords: Probe, Non-contact probe; Coordinate measuring machine; Optical fibre sensor, Edge detection.

ELSEVIER PII: S0263-2241 (96)00004-8
Measurement Vol. 17, No. 1, pp. 39 - 44, 1.1996

D-D.7 **GEOMETRIC CALIBRATION OF CMM BY MEANS OF
3-DIMENSIONAL COORDINATE COMPARISON**

M. Abbe 1 and M. Sawabe 2

1Metrology Laboratory in Europe, Mitutoyo Nederland B V.
Storkstr. 40, 3905 KX, Veenendaal, The Netherlands

2Mitutoyo Corporation. 1-20-1, Sakato, Takatsu, Kawasaki, 213-0012, Japan

Abstract: This paper presents a new calibration method particularly for up to a middle size CMM. The method is able to provide the 21 geometric errors only by performing the coordinate comparison

An automated calibration system for the production stage of CMMs is realised. Emphasis is placed on description of i) the coordinate comparison procedure which quantifies three orthogonal translation errors of the object CMM, ii) the reference coordinate frame maintained by the reference CMM, iii) the obtained 21 parametric error components as the calibration result, iv) the verification result

Keywords: CMM, Calibration, Error compensation

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 - 10, 1998 Vienna, Austria

D-D 8 **A DATABASE SYSTEM FOR UNCERTAINTY ESTIMATION IN
COORDINATE METROLOGY**

H N. Hansen

Department of Manufacturing Engineering, Building 425, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark.

Abstract This paper deals with an estimation of the uncertainty of coordinate measuring machine (CMM) measurements based upon prior knowledge

An expert system has been developed giving an inexperienced user of CMMs a first, qualified estimate as to the obtainable uncertainty for a given measurement

task. The system consists of a database holding information on uncertainties of different measuring tasks obtained on a variety of CMMs.

To obtain an estimation of the uncertainty of a specific measurement task on a specific CMM both the CMM and the task have to be characterised by the user. A search is then performed in the database allowing for a calculation of correlation between the described problem and the records in the database. The system has in its first generations only been tested on dimensional measurements and good results were obtained compared to the two recommended methods for uncertainty assessment.

Keywords. Coordinate measuring machine, uncertainty, calibration

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-D 9

**MEASUREMENT UNCERTAINTY ON COORDINATE
MEASURING MACHINES**

W. Knapp

Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)

Department for machine tools and production (IWF) CH-8092 Zurich, Switzerland

Abstract: A coordinate measuring machine consists of some sub-systems, which contribute to the measurement uncertainty. Therefore those sub-systems need repetitive checks. Additional, important contributors to the measurement uncertainty are the workpiece to be measured and the environment, where the measurement takes place. Standards for acceptance tests for coordinate measuring machines can give a rough idea of the measurement uncertainty. For a more complete picture, the influences of the workpiece, the environment, and the operator have to be considered. The paper gives a summary of the current international standards to this topic and practical examples of additional influences on the measurement uncertainty.

Keywords coordinate measuring machines, measurement uncertainty

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-D 10

**STANDARDS AND CALIBRATION METHODS OF
MICRODIMENSIONAL MEASURING INSTRUMENTS**

V.D. Lizunov and L.Y. Abramova

Department for Geometrical Parameter Measurement Siberian State Scientific
Research Institute of Metrology Novosibirsk, 630004, Russian Federation

Abstract: The measurement accuracy of elements in up-to-date miniature articles is due to be in the range between 0,1 – 0,01 mm. A common approach to the methods of measurement, testing and measurement quality evaluation is proposed. It allows to produce the reference means of measurement as well as working measures for the certification of special small length measures. The special

standards and references devices for metrological inspection of the microdimensions (0.1 – 100 mm) were developed and produced: object-micrometer, measures of length, width, line, as well as cylindrical measures and coordinate ones.

Keywords: metrological inspection, microdimensions, working and reference measures

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-D.11 Evaluation of Coordinate Measuring Machines Performance using design of experiments

A. Piratelli-Filho 1, B. D. Giacomo 2

1 University of Brasilia, Faculty of Technology, Dept. Mechanical Engineering, Brazil, pirateli@unb.br. 2 University of São Paulo, Engineering School of São Carlos, Dept. Mechanical Engineering, Brazil. bgiacomo@sc.usp.br

Abstract. Performance evaluation of co-ordinate measuring machines has been during the past few years performed using special gauges like ball bar and step gauges. It involves the positioning of gauges in some particular places in the working volume of the machine and the determination of the measuring errors. Using this practice, the worst condition of a measurement can be determined and extrapolated to the entire machine working volume. In this paper the performance evaluation of co-ordinate measuring machines is proposed using design of experiments. The proposed method allows one to determine the CMM performance much faster and reliable than other techniques by using the estimation of measurement uncertainty related to experimental variables

Keywords: Coordinate measuring machines, Measurement uncertainty, Design of experiments.

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

**D-D.12 A COMPUTATIONAL METHOD IN THE CONSTRUCTION OF A
PROBABILITY REGION OF CONFIDENCE**

G. Iuculano 1, A. Zanobini 1 and G. Pellegrini 2

1 Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Facoltà di Ingegneria and
2 Dipartimento di Matematica Applicata, Facoltà di Ingegneria
Università di Firenze, Via di S. Marta 3 50139 Firenze, Italy

Abstract. The construction of a region of confidence or "confidence belt", that is the expression of an expanded uncertainty with a given coverage probability, for measurements performed on the same measurand by different processes, is a critical task in the perspective to establish a measurement traceability on a global basis. An alternative procedure to the analytical one suggested in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, strictly related to the validity of the

Central Limit Theorem, is desirable, in order to cover a larger range of situations not included in the normal distribution cases. In this work statistical approach is proposed based on the use of Monte Carlo approximation technique and on the bootstrap resampling iteration. An experimental model is examined to check the validity of the proposed method

Keywords Confidence Belt, Monte Carlo-Bootstrap Approximation

IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna

D-D.13 RELIABILITY OF PARAMETRIC ERROR ON CALIBRATION OF CMM

M. Abbe 1, K. Takamasu 2 and S. Ozono 2

1 Mitutoyo Corporation, 1-20-1, Sakato, Takatsu, Kawasaki, 213-0012, Japan

2 The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-8656, Japan

Abstract. This paper presents a method which is able to describe the reliability of the parametric error as the calibration result of a CMM. The reliability range may provide uncertainty indication of the calibration. Emphasis is placed on description of expansion of the propagation of error on the linear system expressing the parametric errors of a CMM, and confirmation of the method through the simulation on the calibration performed only by linear displacement measurements

Keywords. CMM, Calibration, Parametric Error, Reliability

IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna

D-D.14 SKIN-MODEL FOR PRODUCT CHARACTERIZATION IN CO-ORDINATE MEASUREMENT TECHNIQUE

M.N. Durakbasa 1, P.H. Osanna 1, A. Afjehi-Sadat and A. Nomak 2

1 Department for Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology
Vienna University of Technology, Karlsplatz 13/3113 A-1040 Wien, Austria

2 Department for Material Science and Manufacturing Technology
Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

Abstract Every manufacturer is looking forward to satisfy all of criteria that its product must have. Means, tools and methods are used to ensure the consistency of product characteristics. One of its important characteristic or feature is geometrical specification or it is better to say Geometrical Product Specifications (GPS) are a means to transform function dependent demands into produced work pieces. This paper introduces the application of analysis of workpiece geometry measurement results regarding the recently developed so-called Skin-Model. This model enables the complete implementation of Geometrical Product Specification and Verification into Co-ordinate Measuring Techniques and vice versa. Selected series of work pieces from industrial manufacturers were measured in the

precision measuring laboratory Based on the measurement results gained it was possible to carry out extensive evaluations by using statistical methods e.g. correlation analysis As result can be drawn about the correlation between different geometrical deviations and the manufacturing conditions for the achieving lower costs and higher quality in production.

Keywords: workpiece geometry, skin-model, GPS, CMT, statistical analysis

IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna

D-D.15

A POSSIBLE IMPROVEMENT TO THE ISO-GUM

G. Fanti

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, University of Padova, Italy

Abstract: The ISO-GUM (Guide for Uncertainty Measurement) is a milestone in the history of uncertainty analysis, but practical procedures have still not been completely defined. In order to clarify some operative aspects, this paper proposes a practical improvement to the GUM, presenting a step-by-step procedure that illustrates how to evaluate uncertainty, developing analysis in parallel with the measurement process of the parameter. Following the ISO-GUM baseline, the proposed procedure is subdivided into: a) modelling stage: before designing a measurement chain suitable for a certain parameter, the modelling of the physical system under analysis and of the measurement system used to acquire that parameter is examined; b) instrument design stage: the metrological characteristics of each component of the measurement chain are analysed, also considering the traceability of reference samples; c) advanced stage: all previously detected components are combined with those from test operating conditions, e.g., effects of time, interfering and modifying disturbances, d) correction stage: the systematic effects are accounted for, e) indirect measurement stage: uncertainty propagated to the result of an indirect measurement is obtained by means of sensitivity indexes.

Keywords: uncertainty, measurement, procedure

IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna

D-E. MODOS DE USO DE INSTRUMENTOS MULTIEJE PARA MEJORA DE EXACTITUD Y TEMAS COMPLEMENTARIOS.

D-E.1

A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools

E. Trapet and F. Wäldele

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Postfach 3345, D-3300 Braunschweig, Germany

A procedure has been developed at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) which allows the parametric errors of coordinate measuring machines and machine tools to be measured using two-dimensional or three-dimensional reference **objects**. This procedure is faster and, in general, at least as accurate as conventional **methods** which measure each of the 21 error parameters separately. A pre-calibrated **two-dimensional** object measured in four defined positions in the working space is favoured.

Keywords: Parametric errors, coordinate measuring machines, machine tools, reference objects

ELSEVIER - Measurement, Jan – Mar 1991, Vol 9, N 1.

D-E.2

Real-time contactless measurement of robot pose in six degrees of freedom

Johann P.Prenninger*, Karl M. Filz, Markus Vince, Helmut Gander
*Institute of Flexible Automation (INFA), University of Technology
Vienna, Gufihamstr. 25-29/361, A-1040 Vienna, Austria*

Abstract. For dynamically measuring position in three degrees of freedom laser tracking systems are well known. Up to now no possibility to measure also orientation using the same laser beam has been known. We present a technique to incorporate orientation measurement into a laser tracking system that requires only minor changes in the existing hardware. The method is based on the analysis of an image of the reflected laser beam intensity distribution. In this image the edges of a slightly modified retroreflector represent a function of the orientation of the end-effector holding the retroreflector. It is shown that from this image the orientation can be determined uniquely and in real time.

A laser tracking system including position and orientation measurement constitutes an instrument to accurately determine robot performance as well as to acquire hints on how to improve robot models and control algorithms.

Keywords. Robot, Measurement system, orientation; Laser tracking, Six degrees of freedom

Measurement 14 (1995), 255-264

D-E.3

The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements

F M M. Chan, T G King, K J Stout
The University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK

Abstract. This paper investigates the influence of the sampling strategy for circular section measurements when using coordinate measuring machines. The intention is to determine the relationship between the number of measured points and the computed results which give a true representation of the geometric circular feature. In order to identify the optimum number of points for measurement of a

precision part, an analysis has been carried out using a calibrated ring gauge. The influence of the sampling strategy is predominantly considered. The influence of form errors (in the out-of-roundness of a measured component) and probe lobing errors are also examined briefly (© 1997 Elsevier Science Ltd All rights reserved).

Keywords: Sampling strategy; CMM; Number of points, Probe error; Lobing, Form error, Measuring uncertainty

ELSEVIER - Measurement Vol. 19, No. 2, (1996) pp 73 – 81

D-E.4 COMPLEX ACCURACY ASSESSMENT OF MULTICOORDINATE MACHINES

V. Gimotts 1, R. Bansevicius 2, J.A.G. Knight 3

1 Vilnius Gedimino Technical University, Vilnius, Lithuania,

2 Kaunas Technological University, Kaunas, Lithuania and

3 De Montfort University, The Gateway, Leicester LE1 9BH, UK

Abstract: An information concerning the accuracy parameters of coordinate position of the parts of multicoordinate machines, robots and coordinate measuring machines (CMM) is quite complicated for selection and assessment. The great bulk of information in the measuring volume and lack of spatial reference measure are the main technical and metrological tasks to overcome. Some technical means for accuracy elements measurement are discussed and some new methods and means for complex accuracy assessment are proposed. The method of L-P sequences for the determination of points, equally distributed in the working volume is used. The purpose is to minimise of number of points to be measured during the coordinate error. In addition, the information received must not be less than in assessment of machine's geometric elements accuracy, performed according to conventional methods and means. The error correction system is proposed.

Keywords: measurement, accuracy, coordinates

Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

D-E 5 COMPONENT OF FIXED ERROR BY MEASURING IN POLAR COORDINATES

A. Gorog and K. Velisek

Department of machining and assembling Faculty of Material Sciences and Technology SK - 917 24 Trnava, Slovak republic

Abstract: Total measurement error is generated by random errors and fixed errors. One of these errors is also fixed error of method. This error is originated by imperfection of used methods of measurement. The article is concerned to determination of this error (its maximum and minimum value) by measuring of shaped parts by microscope. Size of error depends on ball ending diameter of

optical lever contact, and it also depends on angle between contour of part and the line between the centre of part and the contact. We express the influence of this angle by coefficient, and at the same time we introduce its graphic dependence on angle mentioned.

Keywords polar coordinates, fixed error.

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-E.6 **METHOD TO MANUFACTURE ZC1 WORM WITH HIGH PRECISION
BY COORDINATE MEASUREMENTS**

D. Qm, W. Shi, C. Tian and Q. Zhang

State Key Laboratory of Mechanical Transmission Chongqing University,
400044, PR of China

Abstract: The measurement of ZC1-worm flank deviation was achieved by coordinate measurement, and the errors of adjusting parameters of machine tool during worm machining were diagnosed from measuring results of flank deviation in this paper. Correction machining of worm was made through compensating adjusting parameters of machine tool, and the measurement experiment after correction machining indicated that the machining accuracy of worm was increased distinctly.

Keywords. Coordinate measurement, error correction, worm drive.

**Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria**

D-E.7 **TRAINING CONCEPT FOR COORDINATE MEASUREMENT**

A. Weckenmann, R. Rothmeier and M. Knauer

Chair Quality Management and Manufacturing Metrology
University Erlangen-Nuremberg, D-91054 Erlangen, Germany

Abstract Coordinate measurement must be executed considering objective comprehensive criteria, in order to ensure the comparability of the results of measurement. A profound education of the personnel responsible for the measurement as well as standardised procedures are necessary prerequisites. The aim is to supply an established device neutral training concept for coordinate metrology as well as procedural statements for the support of the analysis, planning and execution of measurements and analyses of the data. Thus the comparability and the correctness of measurement results will be increased.

Keywords Coordinate measurement, training concept, preventive quality management, metrology, coordinate measuring machines.

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**