



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“EQUIPO DIDÁCTICO DE APOYO PARA
LA IMPARTICIÓN DE ASIGNATURAS EN
EL ÁREA DE ROBÓTICA”

TESINA

Para obtener el título de,

Ingeniero Mecatrónico

Presenta

Tenoch Gonzalez Rojas



DIRECTOR:

Dr. MARCELO LÓPEZ PARRA

México D.F.

Julio de 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dedicatoria

A mis padres



Contenido

Dedicatoria.....	2
Introducción	4
Capítulo 1 Industria de la robótica.....	6
Antecedentes de la industria.....	6
Industria actual.....	8
La búsqueda de nuevas aplicaciones.....	11
Integración a la industria.....	14
Capítulo 2 Presentación del sistema.....	18
Descripción del SR.....	21
Capítulo 3 Aplicación del SR en la asignatura de robótica.....	35
Componentes.....	35
Configuración de brazos.....	38
Posición orientación y referencias.....	41
Articulaciones.....	52
La convención Denavit-Hartenberg.....	54
Ecuaciones de cerradura en orientación y posición.....	57
Cinemática Inversa.....	60
Capítulo 4 Conclusiones.....	64
Trabajo Futuro.....	65
Bibliografía.....	66
Mesografía.....	66

Introducción

La llegada de la robótica a la sociedad es una revolución que viene gestándose desde tiempo atrás. El robot fuera de la gran planta manufacturera, es la culminación de un sueño que acompaña a la humanidad desde los inicios de la civilización. Más allá de la máquina de calcular, el sueño de la robótica no es solamente propio de científicos y grandes entidades que manejan enormes cantidades de información; la robótica como idea es común a la mayoría de los seres humanos, de ahí que la salida del robot de la fábrica y su entrada a la sociedad se perfila como uno de los principales acontecimientos del siglo XXI.

Las bases para la formación de esta industria se han venido dando principalmente en la industria manufacturera, sin embargo el entusiasmo se centra cada vez más en llevar la operación de la robótica fuera del ambiente semicontrolado de la fábrica y llevarlo a operar en el mundo real, tal reto no es fácil pero es algo que sucederá en corto plazo.

Las entidades líderes en tecnología libran una batalla por alcanzar la supremacía tecnológica que les permita colocar en el mercado los primeros robots verdaderamente funcionales, que cumplan con las expectativas que de ellos tiene la sociedad. Estamos siendo testigos del nacimiento de una nueva industria que podría revolucionar al mundo de la manera que en su tiempo lo hizo el automóvil.

Siendo testigos de esta nueva realidad debemos asegurarnos de tener la capacidad de aprovechar las oportunidades que esta nueva industria ofrecerá en su proceso de formación y consolidación; por lo cual debemos preocuparnos por tener los recursos humanos con los suficientes conocimientos tecnológicos para escalar en las cadenas de producción mundial, es decir, avanzar de la posición actual de manufactura simple a las más especializadas en el conocimiento tecnológico como son el diseño de productos originales y servicios para el mercado mundial.

Ante este escenario la Universidad Nacional Autónoma de México tiene la gran responsabilidad de formar los recursos humanos necesarios para que nuestro país sea capaz de alcanzar el reto tecnológico y lograr posicionarse en el escenario internacional como productor de tecnología propia.

Sin embargo la formación de profesionales de la robótica no es tarea fácil, ya que la robótica misma no es fácil, en ella concurren numerosas áreas del conocimiento humano como la mecánica, la electrónica, la teoría del control, las ciencias de la computación, la biología, etc. Dichas áreas concurren en la robótica de una manera sinérgica donde las fronteras tradicionales de estos conocimientos se pierden o se vuelven difusas esto es especialmente cierto en el momento de poner en práctica esos conocimientos. Esta característica

multidisciplinaria de la robótica exige que los conocimientos más básicos y fundamentales deban de ser especialmente sólidos y concretos, de no serlo el alumno puede frustrarse al avanzar en su formación y descubrir resultados contrarios a su entendimiento o al exponerse frágil al universo de conocimientos que maneja la robótica.

Así tenemos un escenario en el que por una parte se tienen las oportunidades que ofrece la gestación de una industria de vanguardia tecnológica y por otra parte tenemos también que formar a los profesionales que ayudaran en la construcción de esta industria, formación que como se menciono no es sencilla. Es por esto que durante el proceso de enseñanza-aprendizaje continuamente se busca apoyarse de medios que puedan impulsar esta formación.

El presente trabajo busca contribuir en la formación de profesionales presentando un sistema que puede apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje de la robótica tomando como referencia la asignatura de robótica impartida en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El sistema pretende apoyar en los primeros temas de la mencionada asignatura que son temas básicos para cualquier curso que inicia la enseñanza de la robótica. Estos temas son considerados por el autor como conocimientos fundamentales de la robótica en ellos se busca estudiar la posición y el movimiento de robots manipuladores en el espacio de tres dimensiones.

Capítulo 1 Industria de la robótica

Antecedentes de la industria.

La palabra robot tiene un origen eslavo, la palabra “robota”, en ruso, significa trabajo o labor, su significado actual fue introducido por el dramaturgo checoslovaco Karel Capek (1890-1938) a principios del siglo XX . En una obra intitulada “robots universales de Rosum”, Capek presentó una especie de seres automatizados cuyo fin era el de sustituir el trabajo humano, estos tenían apariencia humana y eran capaces de tener sentimientos “humanos”.¹

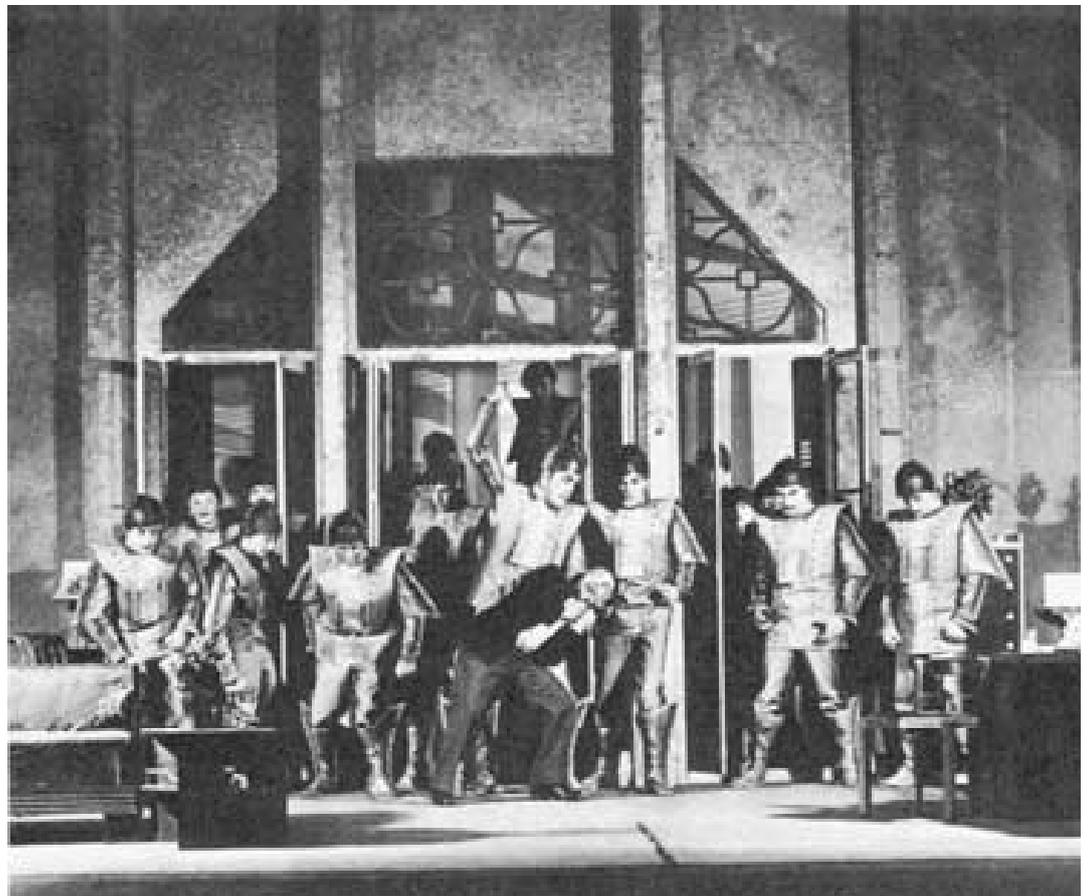


Imagen 1. Los robots de la obra de Capek atacan a sus maestros humanos.

Es interesante resaltar que el término robot nació ligado a la idea del trabajo y la automatización de la producción. Esta última idea, incluyendo la sustitución de los trabajadores humanos, estaba fuertemente presente en la sociedad de la época como algo factible, ya

¹ Sandier, Ben-Zion. *ROBOTICS Designing the Mechanisms for Automated Machinery*. Academic Press, E.U., 1999. p. 1.

en 1915 Leonardo Torres Quevedo declaró a la revista "Scientific American":

"los antiguos autómatas imitaban la apariencia y movimientos de los seres vivos lo cual no tiene mucho interés práctico; lo que yo busco es una clase de aparatos que, sin necesidad de reproducir los gestos mas visibles del hombre, intentan obtener los mismos resultados que una persona".²

Esta declaración por el hecho de que se realizó en un medio de divulgación científica muestra que la creación de maquinas que sustituyeran al hombre en el trabajo ya no se veía como una fantasía o sueño, si no como una meta factible que debería cumplirse en el futuro próximo, sin embargo no fue hasta la década de los 60´s que empezó a funcionar el primer robot industrial.

Fue a mediados del siglo XX que en Estados Unidos se creó la primera empresa de robots llamada Unimation Inc. Esta empresa fue formada por George Devol y Joseph F. Engelberger quienes en una plática informal observaron las siguientes áreas de oportunidad:

- 50% de las personas que trabajan en una fabrica, se pasan la mayoría del tiempo platicando y distraídos en asuntos diferentes al trabajo.
- ¿Por qué las maquinas se crean para realizar una sola tarea específica?
- ¿Por qué no ver la manufactura desde otro punto de vista? es decir, diseñando maquinas que puedan colocar y tomar cualquier cosa sin tener un operador humano.

Así en 1961 se puso en operaciones el primer robot industrial el UNIMATE en una planta de *General Motors* donde tenía la tarea de remover piezas recién fundidas de un molde y acomodarlas.

La llegada del UNIMATE permitió abrir el mercado para el desarrollo de la industria de la robótica lo que contribuyó al mismo tiempo a que se destinara mas presupuestos a la investigación y el desarrollo, sin embargo una serie de factores permitieron que el crecimiento de la robótica como industria se diversificara fuera de Estados Unidos, así el crecimiento se dió también en Asia, con Japón como principal exponente, y en Europa.

² Ollero, Anibal. *Robótica Manipuladores y robots móviles*. AlfaOmega, México, 2007. p. 2.

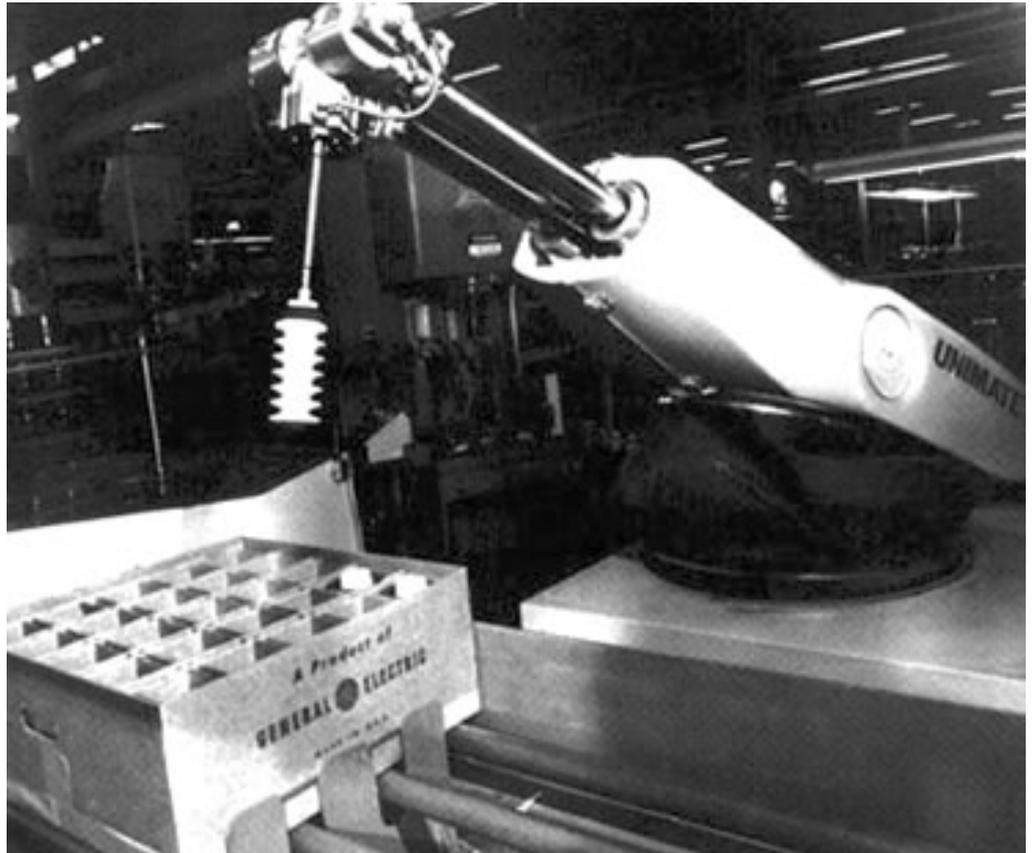


Imagen 2. UNIMATE trabajando.

Industria actual.

En el año 2006 la industria de la robótica tuvo un valor de aproximadamente 11 Billones (o más) de dólares al año³ y experimenta un crecimiento vertiginoso, tan sólo en Estado Unidos sus ventas crecieron 24%⁴ en el 2007.

Según estimados de la comisión de economía de las naciones unidas para Europa (UNECE por sus siglas en ingles) y de la Federación Internacional de Robótica (IFR por sus siglas en ingles) el *stock* mundial de robots industriales operando a finales del 2003 se encontraba entre un mínimo de 800,000 unidades y un máximo de 1,090,000 unidades.⁵

³ The Seattle Times. Benajamin J. Romano. Microsoft voltage to charge up robotics industry. 12/18/2006

⁴ Robotics online - Robot Industry Statistics. 4th Quarter 2007 - North American Robot Orders Jump 24% in 2007.
<http://www.roboticonline.com/public/articles/articlesdetails.cfm?id=3375>

⁵ UNECE. Press Release ECE/STAT/04/P01 . Genova 2004. p. 4

Respecto a las principales empresas fabricantes de robots que ofrecen aplicaciones industriales la IFR proporciona la siguiente información resumida en la tabla 1.

Tabla 1 Principales Empresas y su oferta de robots.⁶

LOGO	Nombre	Oficinas Centrales	Oficinas	Aplicaciones	Industrias cubiertas
	ABB Automation Technologies robotics	Sweden	Norteamérica, Sudamérica, Europa, Asia Sudáfrica.	Soldadura de punto, soldadura de arco, manejo de materiales, posicionamiento de materiales, deburring, pulido, pegado, picking, empaquetado, palletizing.	Automotriz, Tier 1, fundición, fabricación de metales, industria del consumo y plásticos.
	Adept Technology	Estados Unidos de Norteamérica	E.U., Canadá, Francia, Alemania, Italia, Singapur, Corea del Sur, Reino Unido	Ensamble mecánico, ensamble electrónico, manejo de materiales, empaquetado, clean room, posicionamiento de materiales.	Automotriz, Alimentos, Disk Drive / Clean Room, electrónica de consume, bienes de consumo, aplicaciones industriales, dispositivos médicos, farmacéutica, semiconductores
	COMAU S.p.A.	Italia	Francia, Alemania, Reino Unido, Rusia, E.U., Brasil, China, India, Australia, Sudáfrica	Soldadura de punto, soldadura de arco, soldadura laser, corte laser, ensamble y manejo de materiales, Automatización de la fundición, posicionamiento de materiales, Maquinado, palletizing.	Automotriz, grande y mediana industria manufacturera.
	DAIHEN Corp.	Japón	Europa	Soldadura de Punto, soldadura de arco, soldadura laser, soldadura hibrida, manejo de materiales.	Automotriz, Maquinas Eléctricas, Maquinas y Equipo.
	DENSO WAVE Incorporated	Japón	E.U., Europa, Corea, Singapur, Taiwán, Tailandia, Australia	No menciona.	Automotriz, Medico – Farmacéutica, Productos de Consumo, Electrónicos, Aeroespacial, Alimentos y Bebidas, Fundición, Telecomunicaciones, etc.

⁶ Industrial Robots and Related Equipment Suppliers. IFR. 4/10/2007.

LOGO	Nombre	Oficinas Centrales	Oficinas	Aplicaciones	Industrias cubiertas
	FANUC Ltd.	Japón	Norteamérica, Sudamérica, Europa, Asia Sudáfrica.	Robots industriales versátiles, sistemas robóticos inteligentes,	Automotriz, Aeroespacial y Defensa, Componentes, Bienes de consumo, Centros de distribución, Electrónicos y Clean Rooms, Metales, Alimentos y Bebidas, Vidrio, Dispositivos Médicos, Vehículos todo terreno, Papel e Impresiones, Farmacéutica, Plásticos y Madera
	KAWASAKI Heavy Industries Ltd.	Japón	Norteamérica, Europa, Asia.	Soldadura de arco, soldadura de punto, pintura, aplicación de adhesivos, posicionamiento de materiales, manejo de materiales, ensamble, deburring, pulido, palletizing, etc.	Todo tipo de industrias.
	KUKA Robot Group	Alemania	Norteamérica, Sudamérica, Europa, Asia Sudáfrica.	Soldadura de arco, Ensamble, doblado, clean rooms, corte, deburring, dispensado, pegado, unido, posicionamiento de materiales, maquinado, manejo de materiales, toma de medidas, empaquetado, palletizing, pulido, soldadura de punto, etc.	Automotriz, Aeroespacial, Química, Bienes de consumo, Eléctrica, Electrónica, Entretenimiento, Metales, Alimentos y Bebidas, Fundición, Vidrio, Logística, Maquinado, Medica, Papel, Farmacéutica, Plásticos, Textil, Madera, Etc.
	NACHI – FUJIKOSHI Corp.	Japón	Japón, Norteamérica, Europa, Australia, China	Soldadura de arco, deburring, maquinado, corte laser, posicionamiento de materiales, manejo de materiales, pintura, palletizing, corte plasma, sellado, sistemas de visión, etc.	Automotriz y relacionadas, Maquinas herramienta, Maquinas Industriales, Electrónica, Alimentos, Etc.
	STÄUBLI Robotics	Francia	Europa, Corea del Sur, Japón, China, Taiwán, Brasil, México, E.U.	Posicionamiento de materiales, ensamble, pulido, deburring, manejo de materiales, corte, pintura, toma de medidas	Automotriz y relacionadas, Mecánica, Electrónica, Plásticos, Medica, Farmacéutica, Alimentos, Bienes de consumo.

LOGO	Nombre	Oficinas Centrales	Oficinas	Aplicaciones	Industrias cubiertas
	VALK Welding	Holanda	Europa, Sudáfrica.	Soldadura, manejo de materiales, corte, pintura.	Trabajo con metales, Construcción de maquinas, Procesamiento de plasticos.
	VITRONIC	Alemania	Europa, E.U., Australia	Robot Vision, Inspección de calidad.	Automotriz y relacionadas, Fotovoltaica, Tecnología medica e industria farmacéutica, Cosmética, Empaquetado, Alimentos, Electrónica, Plásticos, Metales, Papel, etc.
	YASKAWA Electric Corporation Robotics Automation Division	Japón	América, Europa, Asia	Soldadura de arco , soldadura de punto, ensamble, manejo de materiales, sellado, pintura, palletizing	Automotriz, Semiconductores, Maquinas herramienta, Electrónica, Alimentos y Bebidas, Química, Energía.

* Algunas de las listadas son corporaciones con diferentes entidades legales alrededor del mundo por ello en algunos casos se muestra mas de un logo.

Con base a los datos presentados en la tabla 1 podemos resaltar lo siguiente:

La industria de la robótica trabaja actualmente proveyendo soluciones a otras industrias sobre todo de manufactura, aunque también de Alimentos y Química.

Esta situación es consecuencia de los orígenes de la industria de la robótica dentro de la industria automotriz, su éxito dentro de esta industria permitió que la industria se moviera a cubrir las demás industrias del sector manufacturero, primeramente, y no manufacturero como la de Alimentos.

La búsqueda de nuevas aplicaciones.

iRobot es una empresa fundada por egresados del (MIT) dedicada a la fabricación de robots móviles para uso casero y robots de exploración para uso militar entre otros, se dice que cuando, estudiando la maestría, una de la fundadoras le contaba a su madre de las maravillas que la robótica había logrado en el espacio, ella le

respondía “todo eso es maravilloso, pero me gustaría oír de un robot que me ayudara a limpiar la alfombra” esta plática llevó a la fundación de *iRobot* que empezó ofreciendo una especie de robot aspiradora para limpiar la alfombra.

Este ejemplo de *iRobot* sirve para resaltar lo siguiente: quién no ha pensado alguna vez en desprenderse de las tareas rutinarias y aburridas de la vida diaria y pasar ese tiempo en actividades más placenteras. Si se le pudiera poner un precio a desprenderse de actividades como barrer, limpiar vidrios, lavar los platos, trapear, aspirar, traer y recoger cosas, cortar el pasto, lavar y acomodar la ropa, preparar la ropa del día siguiente, etc. sin delegar estas tareas a otra persona ni comprometer su seguridad ¿cuál precio sería?

Si pudiéramos ahorrarnos el tiempo que pasamos en estas actividades, podríamos dedicarlo a otras más enriquecedoras como aprender y tocar la guitarra, realizar ejercicio, leer o escribir un libro, pintar, meditar, pasar más tiempo de calidad con nuestros seres queridos. Simplemente elevar nuestra calidad de vida.

Es válido pensar que si la robótica retira al obrero de tareas peligrosas y repetitivas realizándolas siempre con el mismo “entusiasmo” también debería poder retirarnos a todos nosotros de nuestras propias tareas rutinarias, como las mencionadas, o incluso de labores peligrosas como el manejo de explosivos, la minería, etc.

El desarrollo de este tipo de aplicaciones son las que ahora están teniendo auge en la mayoría de los centros de investigación y desarrollo tecnológico del mundo, si bien el desarrollo de este tipo de aplicaciones se ha realizado desde tiempo atrás el costo beneficio había permitido únicamente la producción de los robots industriales.

Sin embargo, hoy en día, el desarrollo, producción y venta de robots de servicio inteligentes empieza a ser económicamente viable a medida que los insumos bajan de precio y una gran demanda empieza a surgir.

A la fecha son pocos los robots de servicio que se encuentran en el mercado, algunos de ellos para ayuda en tareas simples en la casa (como Roomba de *iRobot*) ó de entretenimiento (como Aibo de Sony), para el 2006 se esperaba que los robots para tareas caseras simples llegaran a 800,000 unidades⁷ para este 2008 solamente *iRobot* proclama haber colocado 2.5 millones de unidades de sus robots de servicio casero en el mercado y cerca de 1200 unidades de exploración militar.⁸

⁷ World technology: Robots start to move. Economist Intelligence Unit – Industry Briefing. 27/junio/2006

⁸ About *iRobot*. *iRobot* corporation. <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=74>



Imagen 3. Roomba de *iRobot*.

En cuanto a las proyecciones a futuro *ABI research*, empresa dedicada a la investigación de nuevos mercados para la industria manufacturera, predice que el mercado de los robot de servicios tendrá un valor en el 2015 de 15 billones de dólares, así mismo menciona que probablemente las personas estén dispuestas a pagar ⁹ por un robot de servicios multitarea lo mismo que por un auto nuevo.



Imagen 4. PackBot de *iRobot*.

⁹ Personal Robotics The Market for Task, Security, Entertainment, and Educational Robots and Major Components. ABI Research. Primer cuarto del 2008. http://www.abiresearch.com/products/market_research/Personal_Robotics

Si bien las predicciones económicas para la industria son alentadoras existen aún retos tecnológicos, como lo ha sido en la gestación de toda gran industria, dichos retos, sin embargo, son tomados como oportunidades por las entidades que buscan involucrarse en la industria aportando sus soluciones.

Un caso notable de una entidad privada buscando involucrarse directamente en la industria es el de *Microsoft* quien ha inaugurado un centro de investigación y desarrollo en robótica. Esta compañía identifico un área de oportunidad en la falta de estándares en el software que se usa actualmente para la robótica, respondiendo a esto *Microsoft* busca aportar las soluciones de software necesarias para el desarrollo de la robótica y su entrada ha sido bien recibida por fabricantes, incluso algunos pesos pesados como *KUKA* están en colaboración en este proyecto. *Microsoft* ha puesto a disposición del público el software así como una variedad de recursos para dominar su uso, con esta acción busca establecer su software como estándar de la industria.

Así como *Microsoft* muchas otras entidades buscan posicionarse en esta industria, mediante la Investigación y el desarrollo (I+D) que les permita asumirse como agentes dinámicos de la industria, ellos serán quienes guíen el curso de la industria y los que obtengan las mayores ganancias de ella.

A medida que la industria de la robótica continua su camino diferentes entidades se irán incorporando, pero, no todas lo harán de la misma manera ni en igual posición respecto a las demás, algunas asumirán papeles sumisos y pasivos mientras que habrá otras que tengan papeles líderes y de franco control de la industria.

Revisar como interactúan las diferentes entidades en las redes de producción mundial nos permite enfocar nuestro esfuerzo hacia el camino correcto, es por ello que a continuación se revisara brevemente este tema.



Integración a la industria.

Uno de los aspectos a destacar en la economía mundial es la forma en que se han ido organizando las actividades humanas bajo el fenómeno de la globalización, entre ellas destaca la integración de estructuras a nivel de la producción y la circulación financiera, actividades que han alcanzado un mayor grado de interconexión global. La integración de estas estructuras ha dado lugar a la formación de redes y encadenamientos productivos globales donde se unifican e integran diversos segmentos de múltiples economías nacionales que operan de manera coordinada, siguiendo estrategias competitivas fijadas por los centros de poder mundial. Dicha integración nacional o subnacional conduce a la necesaria diferenciación de los papeles desempeñados

por los agentes partícipes, que puede ser hegemónica o subordinada de acuerdo con la capacidad para organizar las redes o encadenamientos productivos e imprimirles dinamismo tecnológico.

La dinámica de las redes y encadenamientos globales está dominada actualmente por las nuevas industrias, productos y procesos constitutivos del sector electrónico informático (SEI) en torno a las cuales se definen las corrientes fundamentales de comercio e inversión internacionales y se estructura la competencia global entre países, regiones y subregiones. La inserción de las economías en desarrollo al ciclo industrial SEI plantea un conjunto de nuevos problemas que tiene que ver con la reestructuración de dichas economías (una vez agotados sus fundamentos anteriores), las capacidades tecnológicas acumuladas, su ubicación geográfica espacial y las habilidades públicas para coordinar estrategias de desarrollo y emprender procesos de aprendizaje tecnológico.

La integración de las redes mundiales ofrece oportunidades excepcionales a los países en desarrollo, ya que los flujos de inversión extranjera directa pueden contribuir a elevar el valor agregado nacional, el empleo y los salarios. Sin embargo, la retención de tales inversiones y la elevación del contenido productivo y tecnológico de las operaciones en las que participan las empresas extranjeras imponen exigencias muy elevadas para los gobiernos y los agentes productivos del país huésped. Generalmente la tendencia a que los salarios aumenten constituye un catalizador para que las inversiones extranjeras se desplacen a países que ofrezcan condiciones salariales más atractivas. Para eludir la volatilidad, algunos gobiernos han auspiciado o tolerado la constitución de economías de bajos salarios que permiten cierto crecimiento de las operaciones de ensamble simple. Otros países han seguido una estrategia orientada al escalamiento o *upgrading*, que implica desarrollar las capacidades para atraer recursos externos y generar un creciente involucramiento centrado en el aprendizaje tecnológico. La experiencia en la aplicación de estas dos estrategias se puede apreciar en las regiones de Asia nororiental y América latina.

La región de Asia nororiental siguió, por diferentes factores principalmente geopolíticos, una estrategia de homogenización social que posibilitó rápidos progresos en calificación y formación de la fuerza laboral, en la universalización de la educación en general y en la construcción de la infraestructura, estos progresos detonaron el incremento de la productividad en las industrias de exportación, de modo que el incremento posterior de los salarios no minó el vínculo con las empresas extranjeras.

Si en los años sesenta las empresas transnacionales que se establecieron en Corea del Sur y los demás países de Asia nororiental estaban interesadas exclusivamente en la utilización de mano de obra barata, de los años setenta en adelante fueron delegando un mayor número de responsabilidades en empresas nacionales con las que mantenían relaciones de subcontratación. La relación de

subcontratación evolucionó considerablemente gracias a la interacción dinámica entre empresas domésticas y transnacionales dando lugar a un considerable traspaso de conocimiento tecnológico y organizativo que posibilitó a su vez el pasaje de la subcontratación a la llamada manufactura de equipo original y la manufactura y el diseño propio.

En América Latina en el contexto de la apertura comercial de fines de los ochenta en adelante las plantas industriales experimentaron procesos de desintegración vertical y recurrieron regularmente a proveedores externos para obtener diversos servicios productivos, lo que redujo al mismo tiempo su compromiso con actividades domésticas de diseño e I+D.

México ha tendido a definir su inserción mundial y su especialización en función de los requerimientos productivos del enorme espacio Norteamericano, aportando reservas de mano de obra barata, no calificada y calificada, para reforzar la competencia de estados unidos frente a sus competidores. Sin embargo este efecto de atracción ejercido por la economía estadounidense se extiende a otros países cercanos, como los del Caribe y Centroamérica. Estos países cuentan con reservas de mano de obra aún más barata y le disputan a nuestro país parte de las inversiones en diversos sectores fijando topes mínimos de costos salariales.

No sólo Estados Unidos ha desplazado algunas de sus industrias de ensamble a México, también países asiáticos, aprovechando su cercanía con Estados Unidos y los tratados de libre comercio de México, han establecido aquí plantas manufactureras. Esta situación favorece parcialmente a México ya que se establece en el país un centro especializado en la manufactura, pero dentro de un régimen de integración subordinada y pasiva que implica aprendizaje tecnológico limitado, escaso arrastre a las empresas domésticas e intensidad laboral particularmente alta.

Sin embargo nuestro país tiene un enorme potencial para impulsar una integración activa centrada en productos del nuevo ciclo industrial, con la condición de que los agentes productivos y el estado coordinen su respuesta. La coordinación de la respuesta implica incrementar cualitativamente la capacidad social de acumulación en una dirección que favorezca el aprendizaje y el conocimiento, y que por lo tanto ponga énfasis en la educación y capacitación masiva, la ampliación de la infraestructura física y la formación de redes empresariales conectadas a centros de I+D especializadas en el abastecimiento de insumos avanzados y el desarrollo de la subcontratación.¹⁰

El análisis preciso de la estrategia que México debiera seguir para aprovechar las oportunidades que brindará el surgimiento de la robótica de servicio y la diversificación de la robótica industrial esta fuera del alcance del presente trabajo, sin embargo es importante

¹⁰ Dabat, Alejandro et al. Globalización y cambio tecnológico. UNAM et al. Mexico. 2004. p. 42-43,60-67

resaltar que el desarrollo tecnológico de esta industria no se encuentra completo, por lo que brinda oportunidades especiales para la inserción basada en el conocimiento tecnológico además de la mano de obra, es por esto que independientemente de la estrategia se deberá hacer énfasis en la educación especialmente en el aprendizaje tecnológico y el desarrollo de centros de I+D.

Parte de este énfasis es la necesidad de contar con profesionales de la ingeniería capaces no solamente de operar las nuevas tecnologías y herramientas que maneja la industria si no también de proponer y realizar cambios en su operación así como desarrollar nuevas y mejores.

La formación de profesionales de esta naturaleza ha sido siempre uno de los propósitos de la institución de educación superior líder en México la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), precisamente en la búsqueda constante de estar siempre inscritos en el avance humanístico, científico y tecnológico se creó en 2002 la carrera de Ingeniería Mecatrónica en la Facultad de Ingeniería.

Capítulo 2 Presentación del sistema

Como se menciona en la descripción de la carrera¹¹ el objetivo de la carrera de ingeniería mecatrónica es formar profesionales capaces de proporcionar a la sociedad bienes y herramientas que le permitan aprovechar los recursos naturales y energéticos, de manera adecuada para satisfacer las necesidades materiales y sociales en beneficio de la humanidad, mediante la aplicación de conocimientos de la física, matemáticas, química y técnicas de ingeniería para contribuir al desarrollo tecnológico, lo cual está considerado como prioritario para el presente y futuro de México.

El acelerado desarrollo tecnológico ha provocado que los bienes y herramientas se hayan convertido en los más sofisticados dispositivos, ya que hasta los aparatos de uso cotidiano más simples utilizan mecanismos precisos, controlados por sistemas electrónicos y por sistemas de información computarizados. Los ejemplos van desde las cámaras fotográficas y aparatos electrodomésticos hasta vehículos aeroespaciales. Todos estos han incidido de manera importante en aspectos sociales y económicos de las actividades humanas.

Así, el ámbito de acción del ingeniero mecatrónico comprende tanto los aspectos relacionados con la mecánica de precisión como los sistemas de control electrónicos y las tecnologías de información computarizadas.

Entre las principales actividades que realiza se encuentran:

- Diseñar, fabricar, implantar y controlar equipos y sistemas de producción en la micro, pequeña y gran industria.
- Diseñar e implantar sistemas de automatización y robotización de procesos y líneas de producción en la industria en general.
- Diseñar equipo de bioingeniería utilizando mecánica de precisión y electrónica de control.
- Diseño y mejora de productos mecatrónicos.
- Desarrollo de investigación en las áreas de la mecatrónica.
- Modernización del sector productivo y de servicios.

Este profesional desarrolla su tarea principalmente en el sector productivo y de desarrollo tecnológico, y en menor medida en el sector de servicios.

Su quehacer es muy amplio, lo que le permite interactuar con profesionales de diversas áreas, como ingenieros mecánicos,

¹¹ Ingeniería Mecatronica – Descripción de la carrera. Facultad de Ingeniería - UNAM
<http://www.ingenieria.unam.mx/carreras/mecatronica1-1.html>

industriales, electrónicos, en computación, químicos, petroleros, entre otros.

Dentro de la curricula de la carrera existe la asignatura robótica que se imparte en el 9º semestre. Como se menciono anteriormente, esta asignatura es la que se ha tomado en cuenta para el desarrollo del presente trabajo, en el programa de esta asignatura el objetivo del curso a la letra dice: "El alumno explicará teórica y prácticamente el diseño, control, selección y aplicación de robots industriales".

A juicio del autor el objetivo del curso implica que el alumno tendrá la capacidad de utilizar sus conocimientos teóricos en la solución de problemas prácticos. Si bien lograr esto es parte del objetivo mismo de la formación del ingeniero es también una tarea difícil ya que, como se menciona en la conferencia nacional de ingeniería "La eficiencia terminal en los programas de ingeniería" de la ANFEI realizada en el 2003, si el alumno falla en este proceso de vinculación de la teoría con la práctica debido a que el alumno no cuente con conocimientos firmes y claros se puede generar frustración que incluso pueden llegar a la deserción escolar¹².

Es decir para que el alumno tenga éxito en su formación, y las instituciones formadoras tengan el éxito que el país requiere, en el proceso de enseñanza aprendizaje se debe hacer énfasis en los conceptos clave o fundamentales no permitiendo desviaciones o malas interpretaciones que a largo plazo provoquen falsas concepciones de la realidad.

Para el caso de la asignatura mencionada el presente trabajo busca apoyar en los primeros contenidos del temario de la asignatura de robótica que se enlista a continuación:

- 1 Introducción
- 2 Análisis de movimiento y accionadores
- 3 Cinemática espacial
- 4 Cinemática inversa
- 5 Dinámica de manipuladores
- 6 Sistemas de control y sensores
- 7 Lenguajes de programación y sistemas

Aunque todos estos temas son susceptibles de ser apoyados por el sistema que se describe más adelante, en el presente trabajo se tratan los primeros temas que tienen que ver con el movimiento y estructura de los robots.

En la experiencia del autor una de las dificultades con la que se encuentran los alumnos en el estudio teórico de estos temas es la de comprender de manera correcta el movimiento y posición de los robots

¹² Ingenierías ANFEI XXX Conferencia nacional de ingeniería: la eficiencia terminal en los programas de ingeniería. Octubre-Diciembre Vol. VI, No. 21, pp. 64-67, 2003.

en el espacio de tres dimensiones a partir de los ejemplos desarrollados en libros o en la misma clase, sucede en ocasiones que el alumno al mismo tiempo que sigue el desarrollo matemático de los temas mencionados, intenta reconstruir el desarrollo de manera física visualizándolo en su mente.

Esta visualización no siempre es correcta pero el alumno puede no darse cuenta de ello y entenderla como verdadera, creando un falso conocimiento, si así sucede, todos los demás desarrollos correctos o incorrectos crearan confusión en el alumno hasta que eventualmente su primer entendimiento sea rechazado por el correcto o se dé el resultado indeseable de la frustración en el alumno. Prevenir la formación de falsos conocimientos y apoyar la formación de conocimientos claros y firmes es parte del proceso de enseñanza aprendizaje.

En el presente trabajo se propone el uso de un equipo o recurso didáctico para apoyar el proceso de enseñanza aprendizaje.

“Se entiende por recurso didáctico, todos aquellos medios de información concreta que facilitan el aprendizaje.”¹³ Son también considerados “dentro de un contexto educativo global y sistémico, y estimulan la función de los sentidos para acceder más fácilmente a la información, adquisición de habilidades y destrezas”.¹⁴ Estos “materiales didácticos, ayudas, o auxiliares de instrucción, permiten a los participantes ponerse en contacto con la realidad misma o les proporciona la sensación inmediata o indirecta de la realidad.”¹⁵

Así, los recursos didácticos son todos aquellos objetos o materiales usados para auxiliar al proceso de enseñanza-aprendizaje y cuya influencia recae en la manera en cómo se utilizan para impartir los contenidos de las sesiones. El apoyo que se obtiene al emplearlos comprende: facilitar la comprensión de los conceptos, concretar lo expuesto verbalmente, exponer los contenidos teóricos y ejemplificar situaciones abstractas.

Las ventajas de una adecuada utilización de los recursos didácticos son:

Permite la presentación de un tema, de manera más clara y objetiva. Concreta las ideas, ya que una imagen puede delimitar y clarificar la idea del que está hablando.

Estimula el interés y la motivación del grupo, ya que constituye una novedad, despierta la curiosidad y, es consecuencia, el interés por aprender.

Facilita la comunicación.

¹³ Pinto Villatoro, Roberto. *Saber enseñar. Manual de entrenamiento para instructores de empresas*. Continental, México, 1992. p. 109.

¹⁴ Ogalde Careaga, Isabel. et, al. *Los materiales didácticos. Medios y recursos de apoyo a la docencia*. Trillas, México, 1992. p. 19.

¹⁵ Pinto Villatoro, Roberto. *Op, cit.*109-110.

Resume ideas o conceptos.¹⁶

El uso de los recursos didácticos enriquece y facilita el proceso de enseñanza-aprendizaje, mas no deben ser considerados como el elemento principal de dicho proceso, pues solo "tienen una función de intermediarios o mediadores entre el maestro y los alumnos."¹⁷

Al recurso didáctico propuesto se le nombrara Sistema Robótico (SR) este SR fue desarrollado por el autor con la colaboración de Ángel Luis Rodríguez Morales en la parte electrónica (mas específicamente en el desarrollo del subsistema llamado *Driver* o amplificador de potencia), el SR fue desarrollado en la Unidad de Desarrollo Tecnológico Querétaro (UDETEQ) de la Facultad de Ingeniería (FI).

El objetivo del SR es entonces ser un recurso didáctico que apoye la enseñanza de la robótica.

Descripción del SR.

Previo a la descripción del SR conviene presentar una definición de lo que es un robot, dado que en el temario de la asignatura de robótica impartida por la facultad de ingeniería se trabaja mayormente con robots manipuladores se presenta la siguiente definición por así convenir al subsecuente desarrollo, aún así es pertinente mencionar que no existe una definición universalmente aceptada sobre lo que debe considerarse un robot y un gran número de definiciones han sido propuestas sin embargo, a pesar del debate existente, para el caso podemos tomar la definición del "Robot Institute of America" que define "un robot es un manipulador multifuncional programable diseñado para mover material, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para realizar una variedad de tareas".¹⁸

¹⁶ Ídem.

¹⁷ Ogalde Careaga, Isabel. et, al. *Op cit.* p. 20.

¹⁸ Sandier, Ben-Zion. *Opcion cit.* p. 5

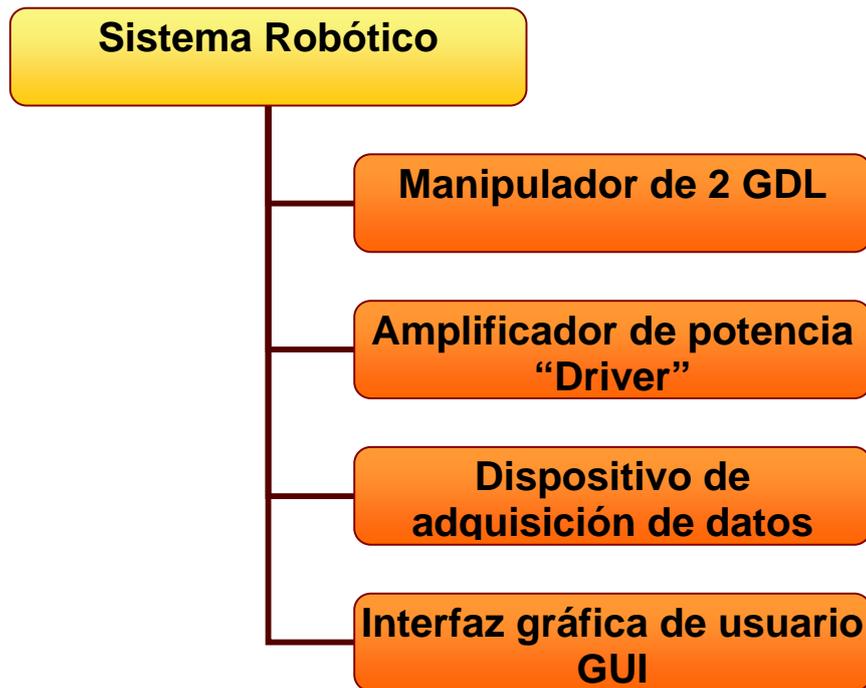


Imagen 5. Esquema del SR

El SR se describe a continuación:

El SR está compuesto de cuatro subsistemas susceptibles de ser analizados de manera independiente (Ver Imagen 5). Estos subsistemas son:

1. *Manipulador de dos grados de libertad.*

Es un manipulador planar de juntas de revolución (identificado en la imagen 6 con el número 1).

2. *Amplificador de potencia.*

También conocido como "driver" se encarga de tomar las señales de control de baja potencia y entregarlas al manipulador con la potencia necesaria para actuar los motores (identificado en la imagen 6 con el número 2).

3. *Dispositivo de adquisición de datos.*

Cumple dos funciones básicas: la conversión de señales de analógicas a digitales o de digitales a analógicas y la comunicación de la PC con el mundo exterior y los sensores del manipulador (identificado en la imagen 6 con el número 3).

4. *Interfaz gráfica de usuario.*

Es la primera vía de comunicación del sistema con el usuario, aquí el usuario puede programar las tareas del sistema y revisar en tiempo real su evolución (identificado en la imagen 6 con el número 4).

Estos subsistemas se pueden apreciar gráficamente en la imagen 6 donde se pueden identificar por el número que se les asigno.

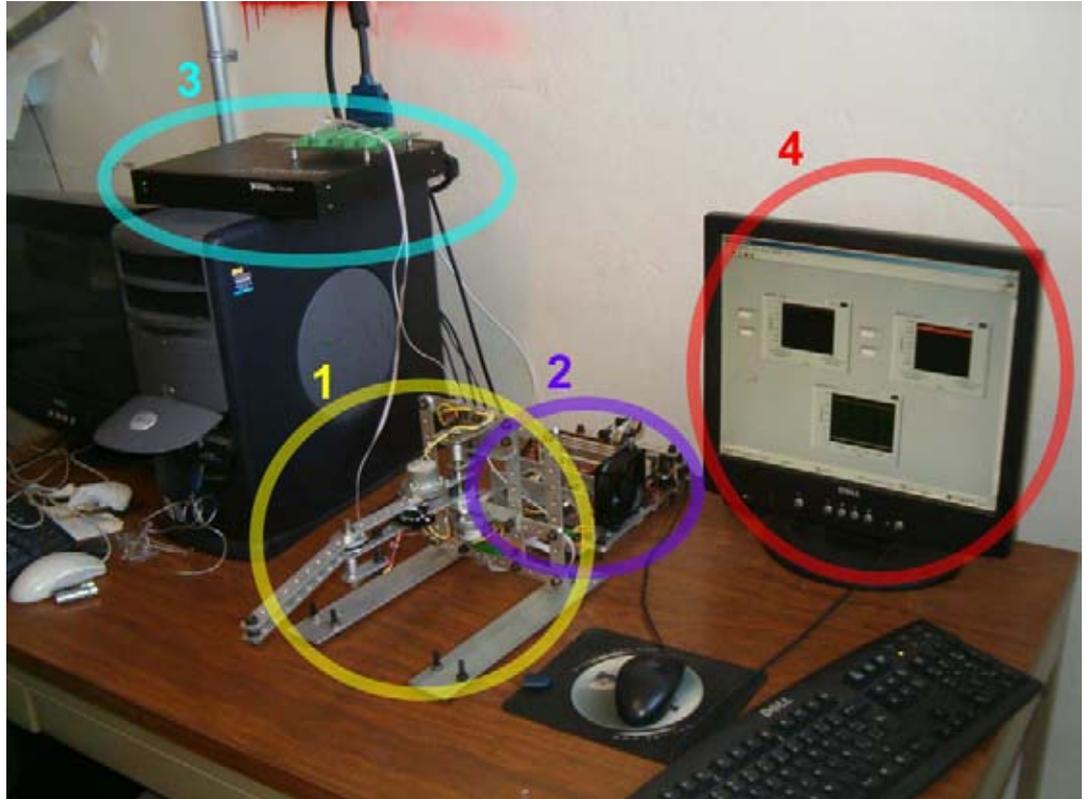


Imagen 6. El SR y cada uno de sus subsistemas, 1. Manipulador de dos grados de libertad, 2. Amplificador de potencia, 3. Dispositivo de adquisición de datos, 4. Interfaz gráfica de usuario.

1. Robot Manipulador de 2 GDL.

La principal razón para incluir en el diseño un robot manipulador planar de 2 GDL con juntas de revolución, es la gran cantidad de información disponible acerca del diseño y control de este tipo de manipuladores además de ser un ejemplo clásico en los cursos de robótica a nivel licenciatura y maestría. Es importante mencionar que la cinemática y la dinámica de este robot están contenidas prácticamente en todos los libros de introducción a la robótica actuales, por lo que en general es el primer ejemplo de robot formal que se conoce en la formación del ingeniero. Esto lo hace ideal para un proyecto de enseñanza como el SR.

El manipulador se ha diseñado para ser un equipo de experimentación y descubrimiento para el alumno. Basado en un diseño modular las piezas que conforman los eslabones son fácilmente intercambiables, abriendo la posibilidad de variar la dinámica del robot y la configuración cinemática. El manipulador tiene la capacidad de adaptarse a necesidades específicas del estudiante y al objeto de estudio, por ejemplo, al variar la longitud de los eslabones o aumentar

la masa es posible probar de manera experimental la robustez de un algoritmo de control.

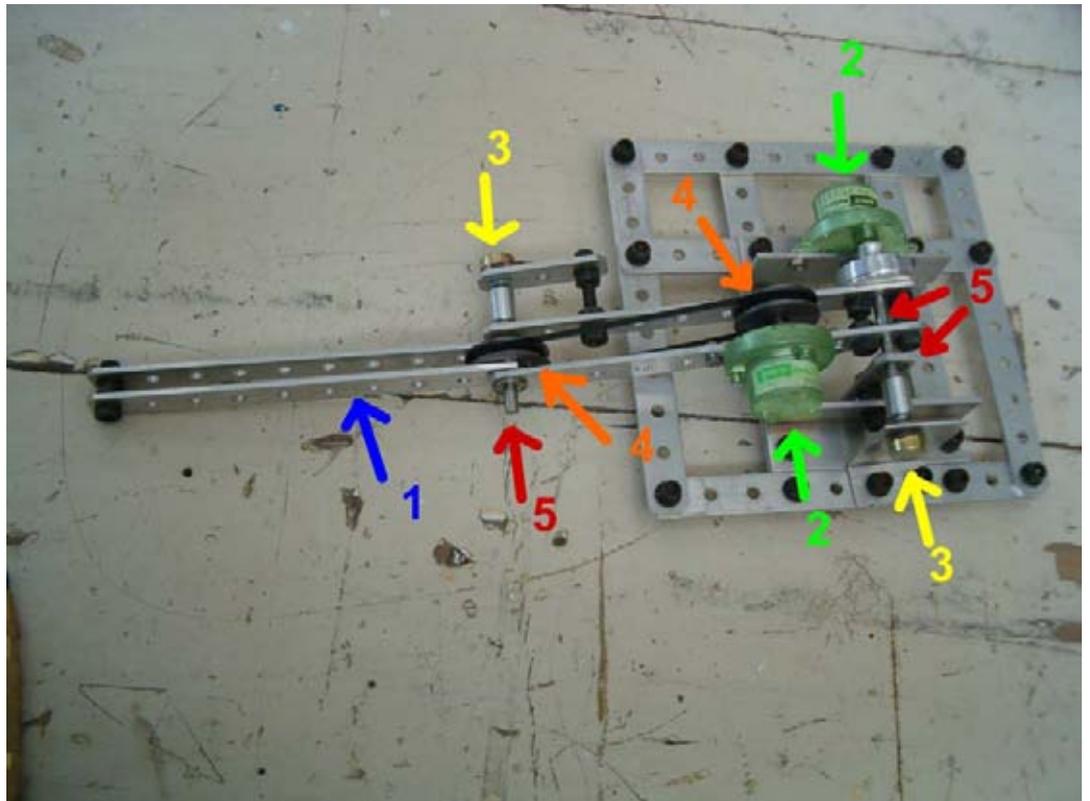


Imagen 7. Manipulador 2 GDL, 1. Perfiles de aluminio, 2. Motores de DC de 12[V], 3. Potenciómetros de 10 [kΩ], 4. Poleas dentadas y banda dentada 5. Rodamientos y ejes.

Los elementos que conforman el manipulador son (ver imagen 7):

1. Perfiles de aluminio.

Los perfiles son de diferentes tamaños con barrenos de $\frac{1}{4}$ de pulgada cada 2 cm. forman los eslabones y la estructura del robot (por cuestión de orden se ha identificado sólo uno en la imagen 7 con el número 1 sin embargo es fácil distinguirlos del resto de elementos).

2. Motores de DC de 12 [V].

Los motores incluyen reducción de 400: 1 y proporcionan un torque de 0.4 [N.m] (identificados en la imagen 7 con el número 2).

3. Potenciómetros de 10 [kΩ].

Convierten la posición angular en un voltaje, operan en un rango de 0 a 5 [V], estos potenciómetros son los sensores de posición del robot cabe mencionar que aunque existen mejores opciones para este tipo de sensores no fue económicamente viable utilizar otro tipo de sensor (se identifican en la imagen 7 con el número 3).

4. Poleas dentadas y banda dentada.

Las poleas se usan para transmitir el movimiento al segundo eslabón manteniendo la masa en la base del robot (identificados en la imagen 7 con el número 4).

5. Rodamientos y Ejes.

Existen dos rodamientos de bolas de $\frac{1}{4}$ De diámetro interior y $\frac{3}{4}$ de diámetro exterior, los ejes son de $\frac{1}{4}$ de diámetro (identificados en la imagen 7 con el número 5).

Estos elementos son identificables en la imagen 7 que muestra al manipulador de 2 GDL separado del sistema. Existen algunos otros elementos que conforman el manipulador como tornillos, tuercas, etc.

Algunas otras especificaciones del manipulador son:

- Longitud del eslabón 1..... 170 mm
- Longitud del eslabón 2.....190 mm
- Rango de movimiento del eslabón 1.....[0 – 180°]
- Rango de movimiento del eslabón 2.....[0 – 180°]

Análisis cinemático del manipulador.

Para comenzar el análisis del manipulador de 2 GDL se obtendrá el modelo de cinemática directa.



Imagen 8. El manipulador se muestra de forma esquemática simple, las marcas de referencia en los ejes indican que son mutuamente paralelos.

Se asignan los sistemas de referencia de acuerdo con la convención Denavit-Hartenberg como se muestra en la Imagen 9.

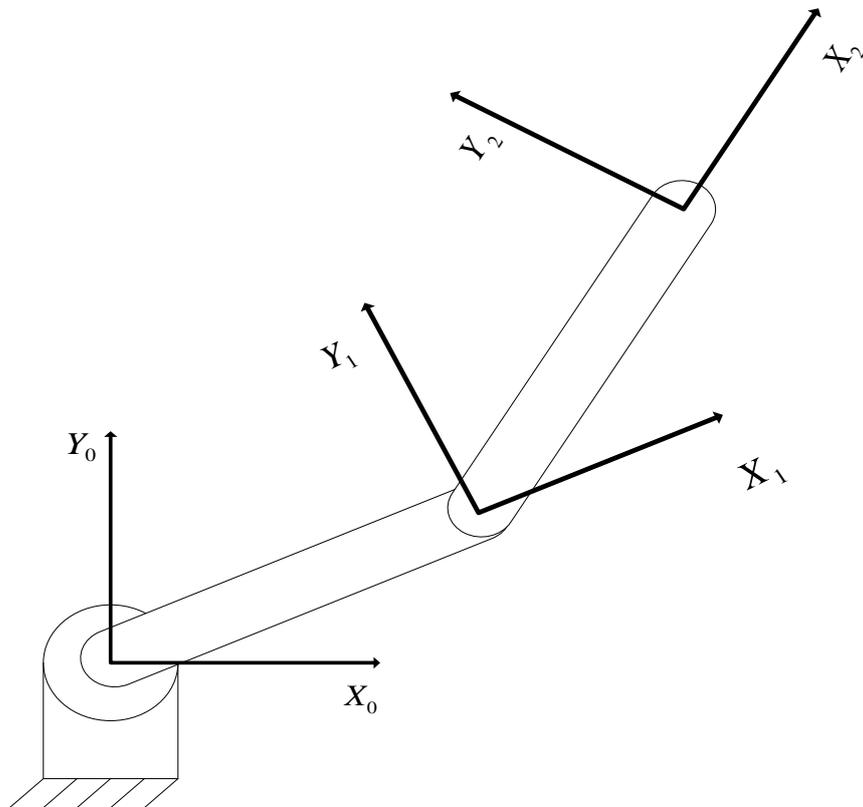


Imagen 9. Sistemas de referencia en el manipulador.

En el manipulador los ejes de las articulaciones están orientados en forma perpendicular al plano del brazo. Como el brazo se encuentra en un plano con todos los ejes Z paralelos, todas las d_i son cero.

Teniendo en cuenta la imagen 9 es fácil completar la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg siguiente:

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	L_1	0	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2

Con esta table obtenemos el modelo de cinemática directa del manipulador realizando las siguientes operaciones:

$${}^0_2T = A_1(\theta_1) * A_2(\theta_2)$$

Cada A_i es una transformación homogénea. A continuación se calculan ambas:

$$A_1 = Rot_{z_1} \theta_1 \bullet Trans_{z_1} d_1 \bullet Trans_{x_1} a_1 \bullet Rot_{x_1} \alpha_1$$

$$Rot_{z_1} \theta_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen} \theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans_{z_1} d_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans_{x_1} a_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{x_1} \alpha_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\text{sen} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \text{sen} \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo con los valores de la tabla se tiene que:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\operatorname{sen} \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \operatorname{sen} \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \operatorname{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De manera similar obtenemos:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\operatorname{sen} \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \operatorname{sen} \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \operatorname{sen} \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y finalmente obtenemos:

$${}^0_2T = A_1(\theta_1) * A_2(\theta_2) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 & -\cos \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 - \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - a_2 \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 + a_1 \cos \theta_1 \\ \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 & -\operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 & 0 & a_2 \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2 + a_2 \cos \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 + a_1 \operatorname{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Este resultado se puede reducir aplicando entidades trigonométricas y factorizando, quedando de la siguiente manera:

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\ \operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2 \operatorname{sen}(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \operatorname{sen} \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta manera conocemos la posición y orientación de {2} relativa a la base {0}

Por otra parte para la cinemática inversa se puede resolver por geometría.

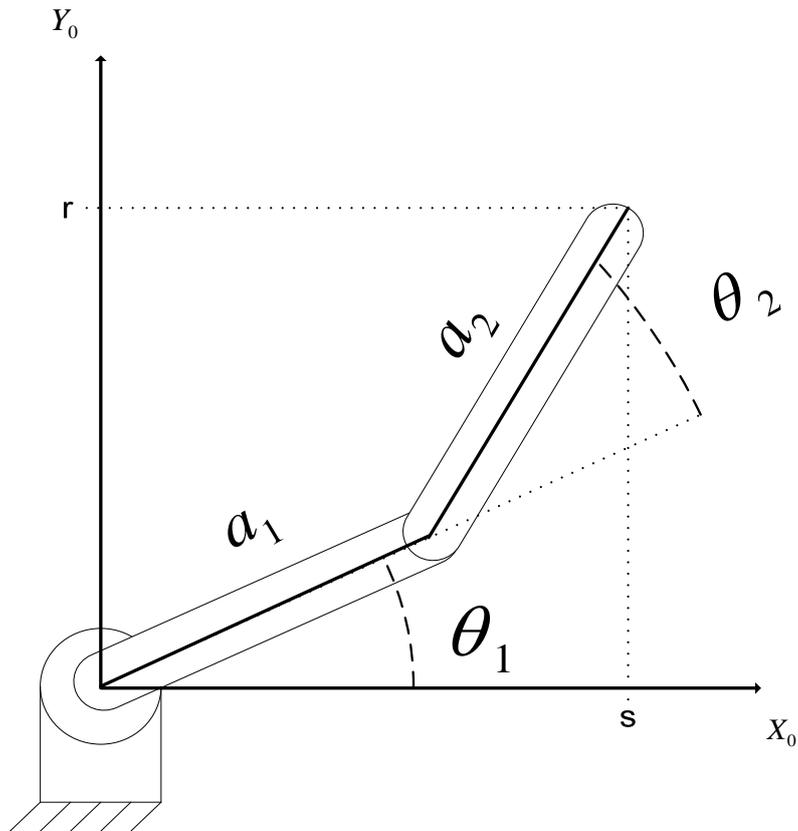


Imagen 10. Angulos y longitudes en el manipulador.

Por inspección sabemos que el ángulo que forman los dos eslabones, que en la imagen 10 podemos identificar por los parámetros a_1 y a_2 , es $\pi - \theta_2$; esto también puede ser calculado por ley de cosenos como se muestra a continuación:

$$r^2 + s^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\pi - \theta_2)$$

Se puede resolver el coseno de la suma de 2 ángulos como sigue:

$$\cos(\pi - \theta_2) = \cos(\pi) \cos(-\theta_2) - \text{sen}(\pi) \text{sen}(-\theta_2)$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = \cos(\pi) \cos(\theta_2) - 0 \bullet \text{sen}(-\theta_2)$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = -1 \bullet \cos(\theta_2) - 0$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = -\cos(\theta_2)$$

Sustituyendo en la ecuación queda:

$$r^2 + s^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \theta_2$$

Procedemos a despejar el coseno

$$\cos \theta_2 = \frac{r^2 + s^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} = D$$

La "D" es para facilitar la escritura. Ahora podemos calcular el seno de theta 2

$$\text{sen} \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} = \pm \sqrt{1 - D^2}$$

Por lo tanto theta 2 es igual a:

$$\theta_2 = \text{Arc tan}\left(\frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D}\right)$$

Y theta 1 es igual a:

$$\theta_1 = \text{Arc tan}\left(\frac{s}{r}\right) - \text{Arc tan}\left(\frac{a_2 \text{sen} \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2}\right)$$

De esta manera obtenemos 2 valores para cada theta.

Asi tenemos el modelo cinemático directo y el inverso del manipulador.

2. Amplificador de Potencia.

También conocido como driver, su funcionamiento se puede ver como una caja negra (Imagen 11) donde entra una señal analógica de baja potencia aproximadamente 5 [mW] y sale una señal de potencia de aproximadamente 40 [W] capaz de actuar los motores.

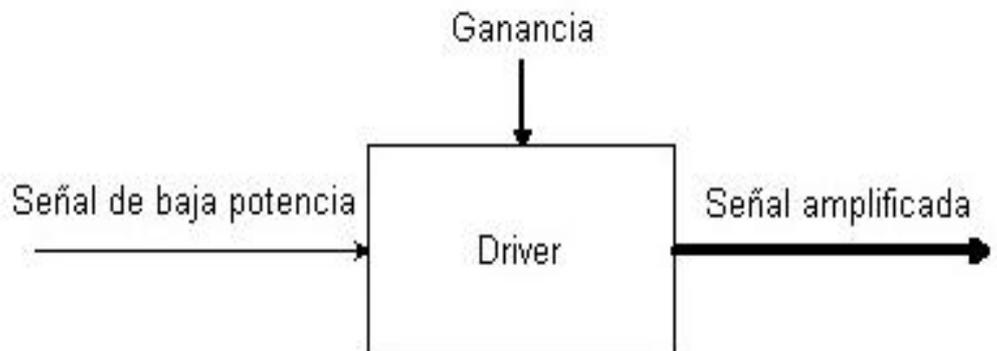


Imagen 11. Esquema del *driver*

El *driver* consta de dos canales de amplificación, esto es, puede amplificar dos señales diferentes y cada señal puede ser amplificada de manera independiente desde 1 hasta 6 veces, sin embargo existe saturación a los ± 20 [V]. Este tipo de driver se conoce como *driver* amplificador controlado por voltaje.

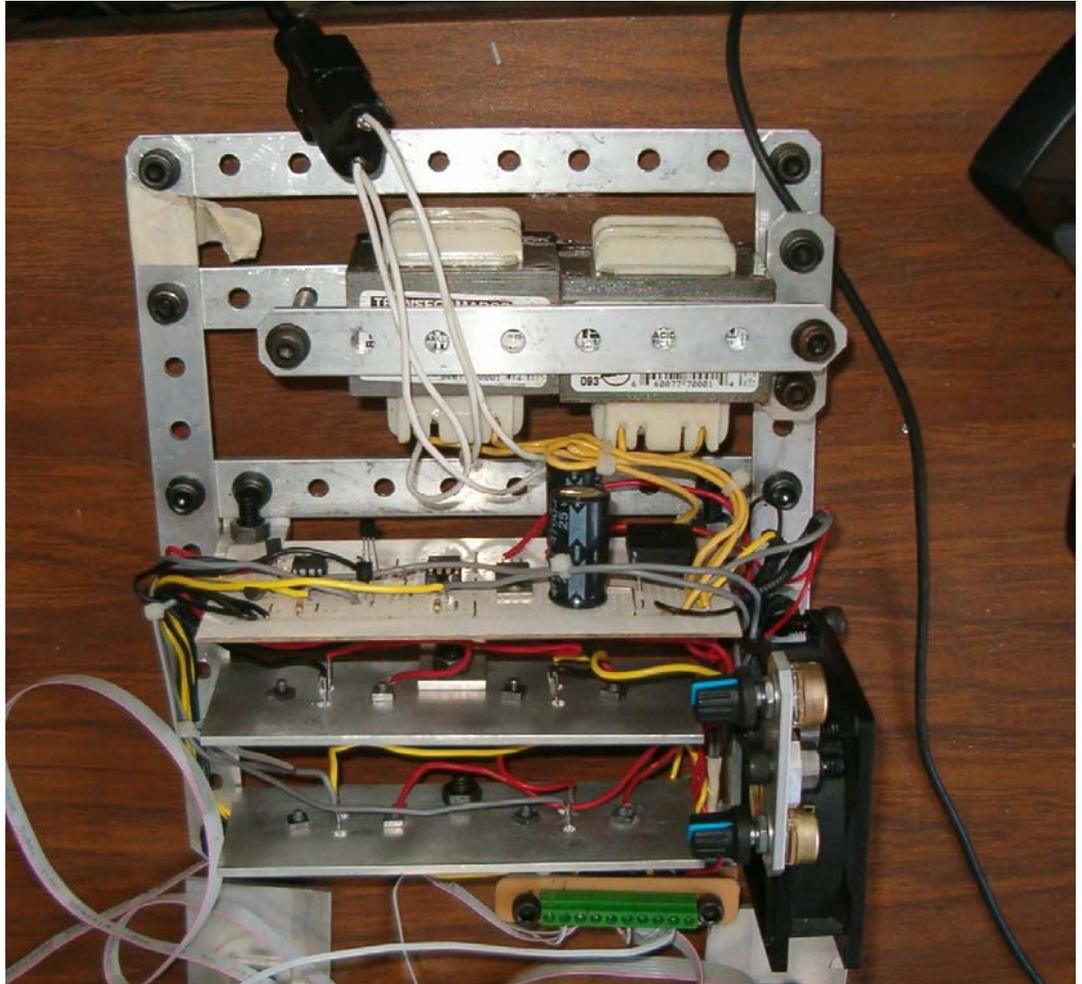


Imagen 12. *Driver*.

3. Dispositivo de adquisición de datos.

El dispositivo de adquisición de datos es un NI DAQPad – 6020E (*Full-Size Box*) que tiene las siguientes especificaciones:

Entradas analógicas.

Número de canales: 16

Tipo de conversión A/D:

Aproximaciones sucesivas

Resolución: 12 bits

Muestreo máximo: 100kS/s

Entradas / Salidas digitales.

Número de canales: 8

Compatibilidad: 5 [V] TTL

Salidas analógicas.

Número de canales: 2

Resolución: 12 bits

Rango no referenciado: +- 10 [V]

De este DAQPad – 6020E se utilizaron los 2 canales de salida analógica y 2 canales de entrada analógica para los sensores de posición, es decir los potenciómetros.



Imagen 13. DAQPad-6020E.

4. Interfaz gráfica de usuario.

También conocida como GUI por sus siglas en inglés (*Graphical User Interface*) es el subsistema a través del cual el alumno o usuario interactúa con el sistema, prueba leyes de control y observa la respuesta del manipulador a sus entradas en un ambiente gráfico y amigable desde la PC. La GUI está diseñada sobre la plataforma de *National Instruments: LabView 7.1*

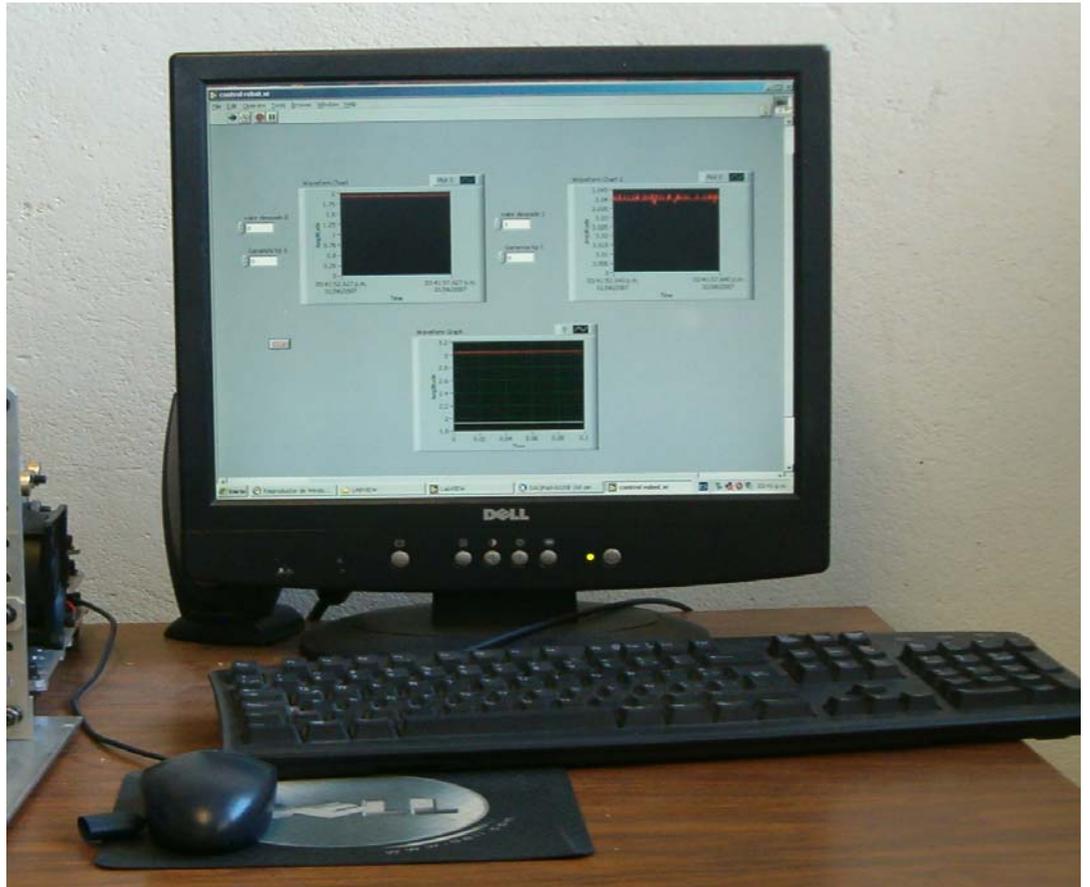


Imagen 14. GUI.

Estas son algunas de las ventajas que ofrece el SR:

- Diseño que facilita apreciar físicamente los componentes del sistema, es decir los subsistemas. Por lo tanto es posible estudiar el sistema como un todo o los subsistemas por separado abriendo la posibilidad de que el SR pueda ser utilizado en otras asignaturas como recurso didáctico.
- Capacidad para modificar algunos de los parámetros físicos que normalmente están fijos para otros sistemas similares, esto facilita la extensión del trabajo experimental y la prueba de hipótesis, algunos de estos parámetros es la longitud de los eslabones y su masa.
- Facilita la observación de gráficas y datos en tiempo real del sistema en una PC.
- Permite modificar algunos parámetros de control del sistema en tiempo real, de hecho el usuario puede de una manera grafica implementar su propio control y modificarlo en tiempo real.
- Consta de una interfaz gráfica de usuario, en la cual el estudiante puede programar de manera visual cualquier algoritmo de control de la misma manera como dibuja un diagrama de bloques, sin necesidad de conocer previamente ningún lenguaje de programación.

Se denomina transparente al sistema ya que, a excepción de la adquisición de datos, todos los sistemas son observables físicamente de principio a fin siendo capaz el estudiante de identificar los resultados y consecuencias de las acciones tomadas desde la PC hasta el manipulador físico. Esta "transparencia" tiene ventajas en la enseñanza ya que permite que el estudiante identifique las acciones que se llevan a cabo en un sistema robótico y donde son llevadas a cabo estas acciones.

Capítulo 3 Aplicación del SR en la asignatura de robótica

Como se menciona anteriormente el objetivo del SR es ser un recurso didáctico que apoye el proceso de enseñanza-aprendizaje de la robótica y para tomar una referencia de la enseñanza de la robótica se ha tomado la asignatura de robótica impartida por la Facultad de Ingeniería. En la presentación del SR se han descrito sus especificaciones y mencionado algunas de sus ventajas en el presente capítulo se busca mostrar como esas especificaciones y ventajas le permiten ser usado como recurso didáctico para apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje de algunos temas de la asignatura de robótica.

Es importante mencionar que este capítulo no pretende ser una "guía del maestro" ó indicar la manera en que un maestro debe o no debe dar su clase. Su objetivo está más orientado a presentar el uso del SR como recurso didáctico y ayudar a que el maestro pueda adaptarlo a su estilo propio de dar la clase, como se menciona anteriormente el recurso didáctico no sustituye ni guía la clase es sólo un medio que facilita el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Los contenidos que se tratan pertenecen a los cuatro primeros temas de la asignatura de robótica que a continuación se listan:

1. Introducción
2. Análisis de movimiento y accionadores
3. Cinemática espacial
4. Cinemática Inversa

A continuación se hará una breve presentación teórica de los subtemas que componen los temas listados y se describirá la manera en que el SR puede apoyar el curso en estos subtemas.

Componentes.

Este contenido se puede usar para presentar el SR como el equipo didáctico que se usará en la enseñanza de algunos contenidos de la asignatura o curso que se imparte, para esta presentación se pueden mencionar algunas de las especificaciones que se encuentran en el capítulo anterior, es pertinente mencionar que como se estableció anteriormente el SR y todo recurso didáctico es un medio entre el maestro y los alumnos no es el centro del aprendizaje, por ello la presentación del SR no debiera ser el tema de la clase.

Descripción teórica.

En la imagen 15 se muestra el esquema básico de un robot. En ella se identifican un sistema mecánico, actuadores, sensores, y el sistema de control como componentes básicos de un robot.

Sistema Mecánico.

En el sistema mecánico puede distinguirse entre el órgano terminal, el brazo articulado, y un vehículo. En la mayor parte de los robots industriales no existe tal vehículo, estando fija la base del brazo.

El órgano terminal es el elemento que se coloca en el extremo del último enlace del manipulador y que suministra la capacidad de agarre del objeto que se pretende manipular, o la colocación de una herramienta adecuada para la tarea (pintura, soldadura, etc.).¹⁹

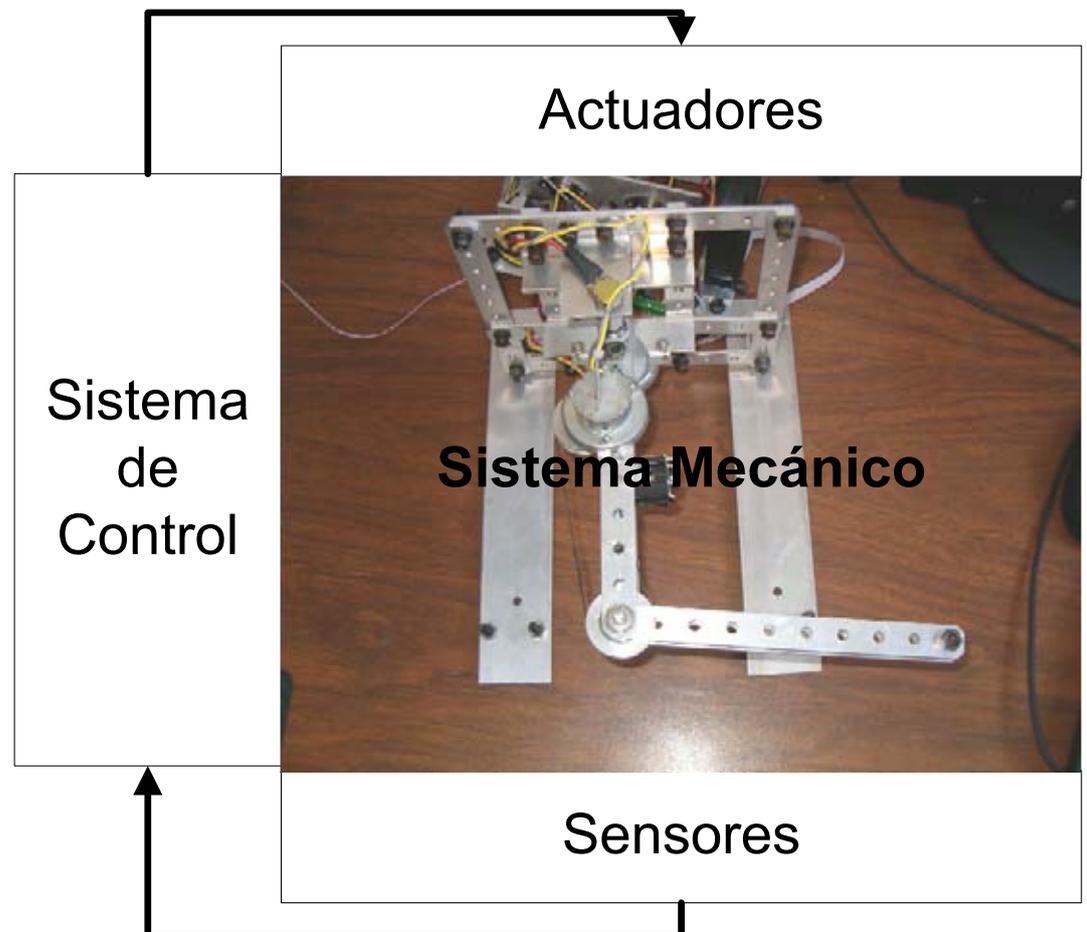


Imagen 15. Esquema básico de componentes de un robot.

¹⁹ Ollero, Anibal. *Op, cit* p. 3,24.

El brazo articulado es el elemento mecánico que posiciona en el espacio al órgano terminal, los elementos rígidos del brazo (eslabones) están relacionados entre si mediante articulaciones que permiten un determinado número de grados de libertad.

En este punto conviene indicar que las ecuaciones que describen el movimiento del brazo articulado son ecuaciones no lineales y acopladas, para las que, en un caso general, resulta difícil obtener soluciones analíticas.

Actuadores.

Los actuadores general las fuerzas o pares necesarios para animar la estructura mecánica.

Sensores.

Los sensores internos miden el estado de la estructura mecánica y, en particular, giros o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares. Estos sensores permiten cerrar bucles de control de las articulaciones de la estructura mecánica.

Los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot. La información que suministran es utilizada por el sistema de percepción para aprender la realidad del entorno.

Sistema de control.

Los sistemas de control de robots pueden considerarse funcionalmente descompuestos en según una estructura jerárquica. En el nivel inferior se realizan las tareas de servo control y supervisión de las articulaciones.

El segundo nivel de control se ocupa de la generación de trayectorias, entendiéndose por tal la evolución del órgano terminal cuando se desplaza de una posición a otra. El generador de trayectorias debe suministrar a los servomecanismos las referencias apropiadas para conseguir la evolución deseada del órgano terminal a partir de la especificación del movimiento deseado en el espacio de la tarea.²⁰

Demostración con el SR.

El SR puede ser usado para ilustrar los componentes de un robot y también para ilustrar más su función.

Aunque pudiera parecer trivial ejemplificar los componentes de un robot en el SR este puede servir para mostrar algunas cuestiones que surgen cuando se piensa en el diseño de un robot en concreto, es decir cuando se pasa a la práctica. Por ejemplo presentando cada componente del SR el maestro puede aprovechar para resaltar sus

²⁰ Ollero, Anibal. *Op, cit* p. 3-6.

bondades y también sus contras ayudando con esto a formar un principio de criterio de selección de componentes en el alumno, ya que si el componente se mantiene idealizado en la exposición teórica, es probable que no se le encuentren dificultades prácticas debido a su idealización, sin embargo al momento de aterrizarlas el componente en el SR se puede mostrar que se tienen que tomar decisiones en el diseño o en la selección del robot y estas decisiones repercutirán en su desempeño.

Aunque el alumno probablemente se dé cuenta más adelante de este criterio de selección de componentes si no se mostrara con el SR, mostrándolo ayuda a acelerar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Los componentes del SR se encuentran descritos en el capítulo anterior, por lo que solo se mencionaran a continuación.

Sistema mecánico: es un brazo articulado de dos grados de libertad.

Actuadores: son dos motores de DC.

Sensores: son dos potenciómetros utilizados para retroalimentar la posición de los eslabones del brazo.

Sistema de control: formado por la GUI, un sistema de adquisición de datos y un *Driver*.

Configuración de brazos.

Descripción teórica.

La estructura típica de un manipulador consiste en un brazo compuesto por elementos con articulaciones entre ellos. En el último enlace se coloca un órgano terminal o efector final tal como una pinza o un dispositivo especial para realizar operaciones.

En general se consideran las estructuras más utilizadas como brazo de un robot manipulador. Estas estructuras tienen diferentes propiedades en cuanto a espacio de trabajo y accesibilidad a posiciones determinadas. En la imagen 16 se muestran cuatro configuraciones básicas.

El espacio de trabajo es el conjunto de puntos en los que puede situarse el efector final del manipulador. Corresponde al volumen encerrado por las superficies que determinan los puntos a los que accede el manipulador con su estructura totalmente extendida y totalmente plegada.

Por otra parte, todos los puntos del espacio de trabajo no tienen la misma accesibilidad.

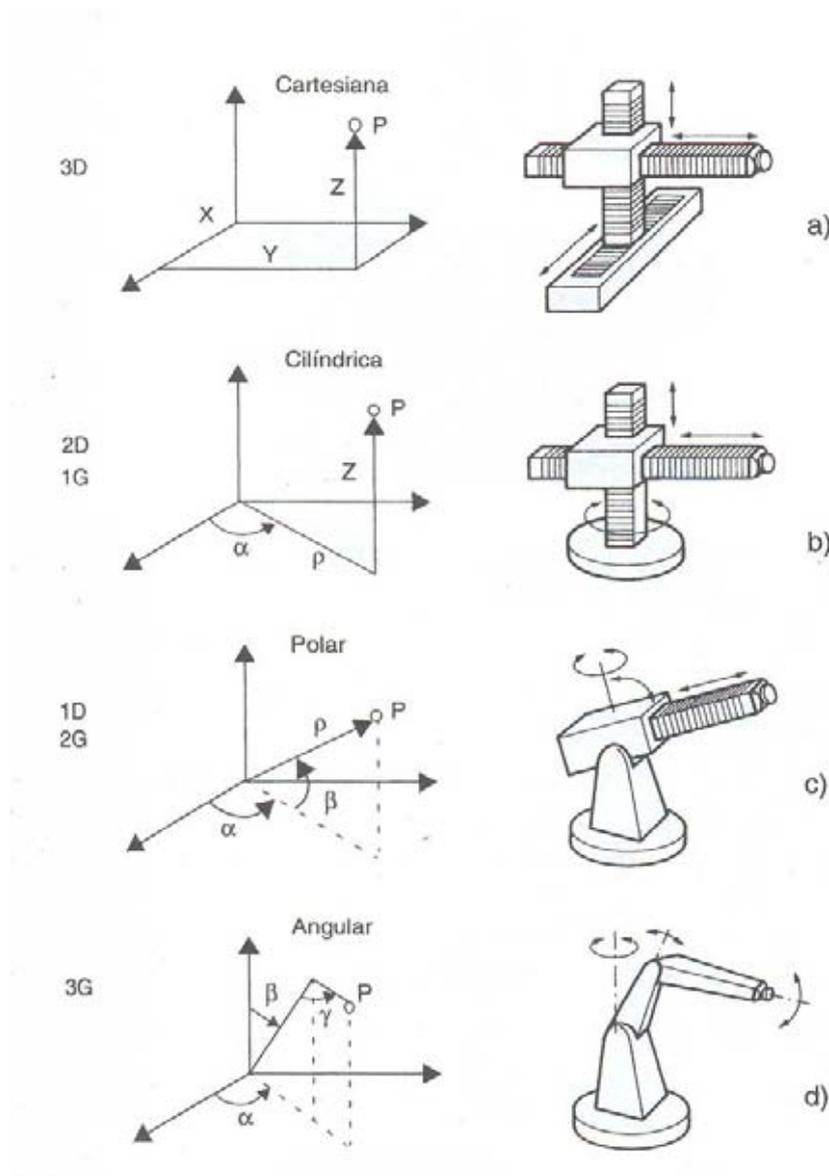


Imagen 16. Configuraciones de manipuladores²¹.

Configuración cartesiana.

Se ilustra en la imagen 16.a. La configuración tiene tres articulaciones prismáticas (3D o estructura PPP). Esta configuración es bastante usual en estructuras industriales, tales como pórticos, empleadas para el transporte de cargas voluminosas.

²¹ Ollero, Anibal. *Op, cit* p. 19.

Configuración cilíndrica.

Esta configuración tiene dos articulaciones prismáticas y una de rotación (2D, 1G). La primera articulación es normalmente de rotación (estructura RPP), como se muestra en la imagen 16.b. La posición se especifica de forma natural en coordenadas cilíndricas. Obsérvese que esta configuración puede ser de interés en una célula flexible, con el robot situado en el centro de la célula sirviendo a diversas máquinas dispuestas a su alrededor.

Configuración polar o esférica.

Esta configuración se caracteriza por dos articulaciones de rotación y una prismática (2G, 1D o estructura RRP). En este caso, las variables articulares expresan la posición del extremo del tercer enlace en coordenadas polares, tal como se muestra en la imagen 16.c.

Configuración angular.

Esta configuración es una estructura con tres articulaciones de rotación (3G o RRR) tal como se muestra en la imagen 16.d. La posición del extremo final se especifica de forma natural en coordenadas angulares. La estructura tiene un mejor acceso a espacios cerrados. Es muy empleada en robots manipuladores industriales, especialmente en tareas de manipulación que tengan una cierta complejidad.

Configuración Scara.

Esta configuración está especialmente diseñada para realizar tareas de montaje en un plano. Está constituida por dos articulaciones de rotación con respecto a dos ejes paralelos, y una de desplazamiento en sentido perpendicular al plano.

Demostración con el SR.

El Maestro puede presentar el SR como un manipulador de Tipo RR es decir con dos articulaciones de rotación y también como parte de un manipulador Angular o un Scara.

Con ayuda del SR es posible ilustrar la idea del volumen de trabajo de los manipuladores como se ilustra en la imagen 17.

Ilustrando el tema de configuraciones y el espacio de trabajo de estas el SR puede mostrar que operaciones de manipulación puede realizar con mayor ventaja en base a su configuración y también cuales no puede realizar, en este último caso cuando se tiene una operación que debido a su configuración no puede realizar o no es eficiente realizándola, el SR aún puede ilustrar el grado de libertad que le haría falta para realizarla o puede servir para comparar con otras configuraciones y ayudar a la clase a concluir cual sería la más adecuada para alguna operación de manipulación.

Al hacer evidente las bondades y las deficiencias de la configuración del SR se ayuda a que los alumnos tengan una comprensión espacial de las configuraciones y les sea más fácil discriminar entre las diferentes configuraciones al momento de elegir una para una tarea determinada.

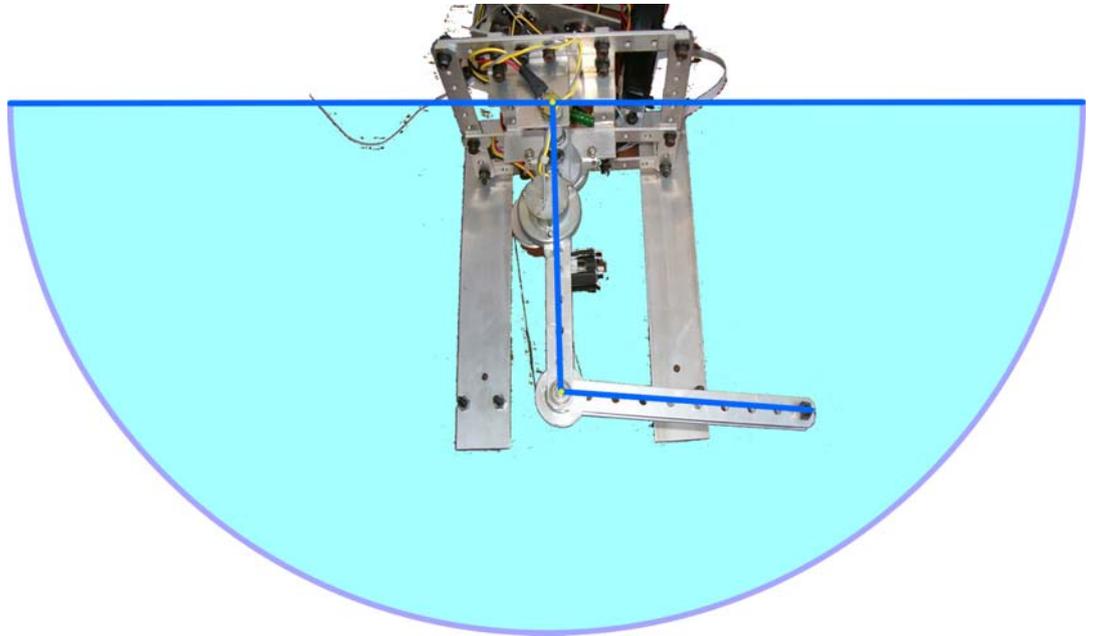


Imagen 17. Espacio de trabajo del SR.

Posición orientación y referencias.

Descripción teórica.

Por definición, la manipulación robótica implica que se desplazarán piezas y herramientas en el espacio mediante algún tipo de mecanismo. Esto naturalmente conduce a una necesidad de representar posiciones y orientaciones de piezas, herramientas y del mecanismo en sí. Para manipular cantidades mecánicas que representen posición y orientación, debemos definir sistemas de coordenadas y desarrollar convenciones para la representación.

Una descripción se utiliza para especificar los atributos de varios objetos con los que trata un sistema de manipulación. Estos objetos son piezas, herramientas y el manipulador en sí. En lo siguiente se habla sobre la descripción de posiciones, orientaciones y de una entidad que contiene ambas descripciones: la trama

Descripción de una posición.

Una vez que se establece un sistema de coordenadas, podemos ubicar cualquier punto en el universo con un vector de posición de orden 3×1 . Como es común que se definan muchos sistemas de coordenadas, además del universal, los vectores deben de etiquetarse con información que identifique en cuál sistema están definidos.²² Es común encontrar que los vectores se escriben con un subíndice a la izquierda que indica el sistema de coordenadas al que hacen referencia; por ejemplo, ${}^A P$. Esto significa que los componentes de ${}^A P$ tienen valores numéricos que indican distancias sobre los ejes de $\{A\}$. Cada una de estas distancias sobre un eje puede definirse como el resultado de proyectar el vector sobre el eje correspondiente.

La imagen 18 representa el dibujo de un sistema de coordenadas llamado $\{A\}$, con tres vectores unitarios mutuamente ortogonales con puntas sólidas. Un punto ${}^A P$ se representa como un vector y puede definirse de manera equivalente como una posición en el espacio, o simplemente como un conjunto ordenado de tres números. Dados los subíndices x, y , y z , los elementos individuales de un vector son:

$$A_p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

En resumen, describiremos la posición de un punto en el espacio con vector de posición.

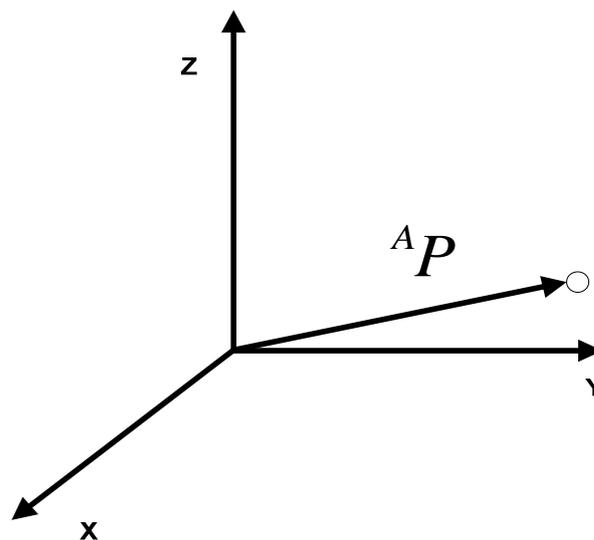


Imagen 18. Vector relativo a al sistema de coordenadas $\{A\}$.

²² Craig, John J. *Robótica*. Pearson Education, tercera edición México, 2006. p. 19-20.

Descripción de una orientación.

A menudo necesitamos representar no solamente un punto en el espacio, sino también describir la orientación de un cuerpo en el espacio. Por ejemplo, si el vector ${}^A P$ de la imagen 19 ubica el punto directamente entre las puntas de los dedos de la mano de un robot, la ubicación completa de la mano no se especifica sino hasta que se proporciona también su orientación. Suponiendo que el robot tiene un número suficiente de articulaciones, la mano podría orientarse arbitrariamente y al mismo tiempo podría mantenerse el punto entre las puntas de los dedos en la misma posición en el espacio. Para describir la orientación de un cuerpo, adjuntaremos un sistema de coordenadas al cuerpo y luego daremos una descripción de este sistema de coordenadas relativo al sistema de referencia. En la imagen 19 se ha adjuntado el sistema de coordenadas $\{B\}$ al cuerpo de una manera conocida. Ahora basta con una descripción de $\{B\}$ relativo a $\{A\}$ para dar la orientación del cuerpo.

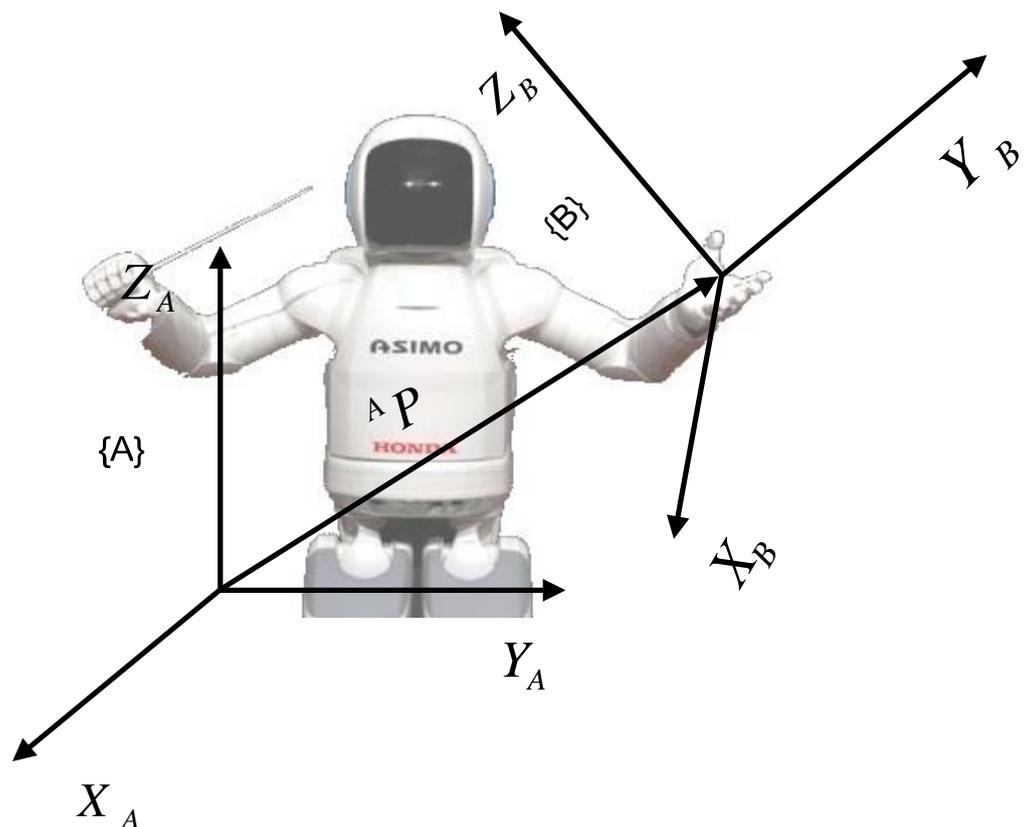


Imagen 19. Ubicación de un objeto en posición y orientación.

Por ende, las posiciones de los puntos se describen con vectores, y las orientaciones de los cuerpos con un sistema de coordenadas adjunto. Una manera de describir el sistema de coordenadas $\{B\}$ adjunto al

cuerpo es escribiendo los vectores y las orientaciones unitarios de sus tres ejes principales en términos del sistema de coordenadas {A}.

Para denotar los vectores unitarios proporcionaremos las direcciones principales del sistema de coordenadas {B} como X_B, Y_B, Z_B . Al escribirse en términos del sistema de coordenadas {A}, se llaman ${}^A X_B, {}^A Y_B, {}^A Z_B$. Conviene acomodar estos tres vectores unitarios como columnas en una matriz de 3 x 3, en el orden ${}^A X_B, {}^A Y_B, {}^A Z_B$ a esta matriz se le llama matriz de rotación y, dado que esta matriz de rotación específica describe a {B} en forma relativa a {A}, se la representa con la notación ${}^A_B R$.

$${}^A_B R = [{}^A X_B \ {}^A Y_B \ {}^A Z_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

En resumen, puede utilizarse un conjunto de tres vectores para especificar una orientación. A fin de ser más claro se construye una matriz de 3 x 3 que contiene estos tres vectores como columnas. En consecuencia siempre que se represente la posición de un punto con un vector, la orientación de un cuerpo se representará con una matriz.

Teniendo en cuenta que los componentes de cualquier vector son simplemente las proyecciones de ese vector en las direcciones unitarias de su trama de referencia cada componente de ${}^A_B R$ en (2) puede escribirse como el producto punto de un par de vectores unitarios:

$${}^A_B R = [{}^A X_B \ {}^A Y_B \ {}^A Z_B] = \begin{bmatrix} X_B \bullet X_A & Y_B \bullet X_A & Z_B \bullet X_A \\ X_B \bullet Y_A & Y_B \bullet Y_A & Z_B \bullet Y_A \\ X_B \bullet Z_A & Y_B \bullet Z_A & Z_B \bullet Z_A \end{bmatrix} \quad (3)$$

Como el producto punto de dos vectores unitarios es el coseno del ángulo entre ellos, queda claro por qué a los componentes de las matrices de rotación se les llama comúnmente cosenos de dirección.

Podemos observar en (3) que las filas de la matriz son los vectores unitarios de {A} expresados en {B}; es decir,

$${}^A_B R = [{}^A X_B \ {}^A Y_B \ {}^A Z_B] = \begin{bmatrix} {}^B X_A^T \\ {}^B Y_A^T \\ {}^B Z_A^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

Así ${}^B_A R$ la descripción de {A} relativa a {B}, se da mediante la transpuesta de (3) esto es,

$${}^A_B R = {}^B_A R^T \quad (5)$$

Mediante álgebra lineal sabemos que el inverso de una matriz con columnas ortonormales es igual a su transpuesta.

$${}^A_B R = {}^B_A R^{-1} = {}^B_A R^T \quad (6)$$

Descripción de una trama.

La situación de un par de posición y orientación surge tan a menudo en robótica que definimos una entidad llamada trama, la cual es un conjunto de cuatro vectores que proporcionan información sobre la posición y la orientación. Por ejemplo en la imagen 19 un vector ubica la posición de la punta de los dedos y tres más describen su orientación. De manera equivalente, la descripción de una trama puede definirse como un vector de posición y una matriz de rotación. Observe que una trama es un sistema de coordenadas en donde además de la orientación damos un vector de posición que ubica su origen de manera relativa a alguna otra trama fija. Por ejemplo la trama {B} se describe mediante ${}^A_B R$ y ${}^A P_{Borg}$, en donde ${}^A P_{Borg}$ es el vector que ubica el origen de la trama {B}.

$$\{B\} = \{ {}^A_B R, {}^A P_{Borg} \} \quad (7)$$

En resumen, una trama puede utilizarse como una descripción de un sistema de coordenadas relativo a otro. Una trama abarca dos ideas al representar tanto la posición como la orientación, por lo que puede definirse como una generalización de esas dos ideas. Las posiciones podrían representarse mediante una trama cuya parte correspondiente a la matriz de rotación es la matriz identidad y cuya parte correspondiente al vector de posición ubica el punto que se está describiendo. De igual forma, una orientación podría representarse mediante una trama cuya parte correspondiente al vector de posición sea el vector cero.

Asignaciones que involucran tramas arbitrarias.

Muy a menudo, nos encontramos con una situación en la que conocemos la descripción de un vector respecto a cierta trama {B}, y es conveniente conocer su descripción con respecto a otra trama {A}. Ahora consideraremos el caso general de la asignación. Aquí el origen de la trama (B) no es coincidente con el de la trama {A}, sino que tiene un desplazamiento vectorial arbitrario. El vector que define el origen de {B} se llama ${}^A P_{BORG}$. Además, {B} se gira con respecto a {A}, según lo describe ${}^A_B R$. Dado ${}^B P$, deseamos calcular ${}^A P$, como en la imagen 20.

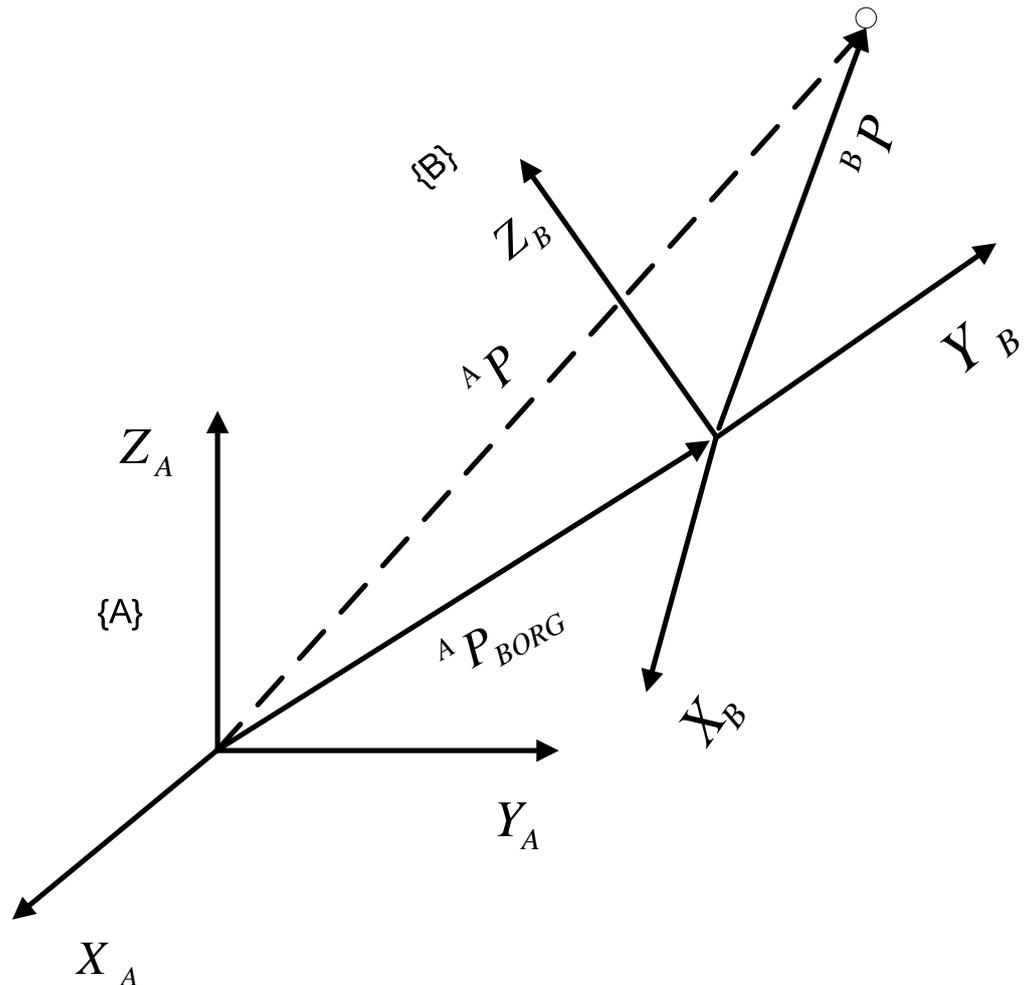


Imagen 20. Transformada general de un vector del sistema {B} al sistema {A}.

Primero debemos cambiar ${}^B P$ a su descripción relativa a una trama intermedia que tiene la misma orientación que {A}, pero cuyo origen es coincidente con el origen de {B}. Esto se hace multiplicándolo previamente por ${}^A R_B$. Después consideramos la traslación entre orígenes mediante una simple suma vectorial y obtenemos:

$${}^A P = {}^A R_B {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (8)$$

La ecuación (8) describe una asignación de transformación general de un vector a partir de su descripción en una trama a una descripción en una segunda trama. Observe que las "B" se cancelan, dejando todas las cantidades como vectores escritos en términos de "A", los cuales pueden ya sumarse sin problema.

La forma de (8) no es tan atractiva como la forma conceptual

$${}^A P = {}_B^A T {}^B P \quad (9)$$

Esto es, en una asignación de una trama a otra como un operador en forma de matriz. Esto ayuda a describir ecuaciones compactas y es conceptualmente más claro que (8). Para poder escribir las ecuaciones matemáticas dadas en (8) en la forma de operador matricial sugerida por (9), definimos un operador matricial de 4x 4 y utilizamos vectores de posición de 4x1, para que (9) tenga la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_B^A R & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

En otras palabras:

1. Se agrega un "1" como el último elemento de los vectores de 4x 1
2. Se agrega una fila "[0 0 0 1]" como la última fila de la matriz de 4x 4.

Se adoptará la convención de que un vector de posición es de 3 x 1 o 4 x 1, dependiendo de si se multiplica por una matriz de 3 x 3 o por una de 4 x 4. Puede verse de antemano que (10) implementa lo siguiente:

$$\begin{aligned} {}^A P &= {}_B^A R {}^B P + {}^A P_{BORG} \\ 1 &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$

La matriz de 4 x 4 se llama transformada homogénea. Puede tratarse solamente como una construcción utilizada para convertir la rotación y la traslación de la transformada general en una sola forma matricial.

Así como utilizamos matrices de rotación para especificar una orientación, se utilizan transformadas (usualmente en representación homogénea) para especificar una trama. Aunque se pueden ver las transformadas homogéneas en el contexto de las asignaciones,

también sirven como descripciones de tramas. La descripción de la trama (B) relativa a (A) es ${}^A T_B$.

Operadores: traslaciones, rotaciones y transformaciones.

Las mismas formas matemáticas que se utilizan para correlacionar puntos entre tramas pueden interpretarse también como operadores que trasladan puntos, giran vectores o hacen ambas cosas.

Operadores de traslación.

Una traslación desliza un punto en el espacio una distancia finita a lo largo de una dirección vectorial dada. Con esta interpretación de trasladar el punto en el espacio, solo necesita estar involucrado un sistema de coordenadas. Resulta que el proceso de trasladar el punto en el espacio se logra con las mismas matemáticas utilizadas para asignar el punto a una segunda trama.

Operadores de Rotación.

Se puede interpretar a una matriz de rotación como un operador rotacional que opera sobre un vector ${}^A P_1$ y convierte ese vector en uno nuevo ${}^A P_2$, por medio de una rotación R.

La matriz de rotación que gira vectores a través de cierta rotación R, es la misma que la matriz de rotación que describe a una trama girada por R en relación con la trama de referencia.

Operadores de transformación.

Al igual que los con los vectores y las matrices de rotación, una trama tiene otra interpretación como operador de transformación. En esta interpretación solo se involucra a un sistema de coordenadas, por lo que el símbolo T se utiliza sin subíndices ni superíndices. El operador T gira y traslada un vector

$${}^A P_2 = T {}^A P_1 \quad (12)$$

Generalmente se asume que una transformada se encuentra en la forma homogénea con partes generales correspondientes a la matriz de rotación y al vector de posición.

Demostración con el SR.

Para el caso de la ubicación de una posición en el espacio el SR puede ayudar a poner en contexto la explicación teórica, si se le pide a un robot llegue a una posición o que considere una posición, esta se le debe describir y esa descripción se hace con respecto a un sistema de referencia, como en la imagen 21.

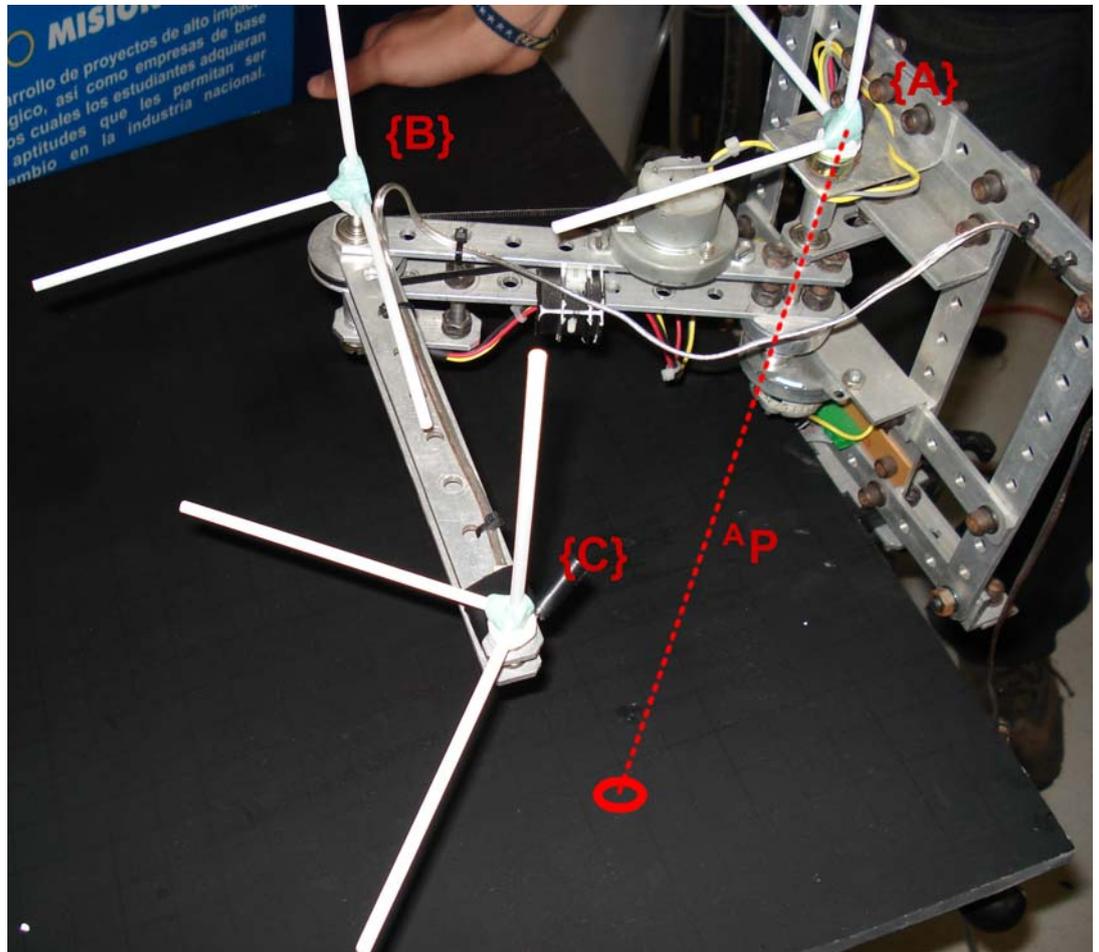


Imagen 21. Descripción de una posición con respecto a un sistema de referencia en el contexto del SR, en este caso se describe con respecto a {A} sistema donde el eje z esta indicado por el popote que va hacia arriba y por ser un sistema derecho se puede identificar los otros dos ejes.

Para el caso de la descripción de una orientación en el espacio el SR puede ayudar a poner en contexto la explicación teórica y a comprender mejor la descripción de la orientación en el espacio de tres dimensiones, por ejemplo ubicando un sistema de referencia en un punto fijo de la base de la estructura del SR y moviendo el brazo articulado a diferentes posiciones resultará obvio que la descripción no está completa sin la orientación de los eslabones y por ello la importancia de su estudio, esto se muestra en las imagenes 22 y 23.

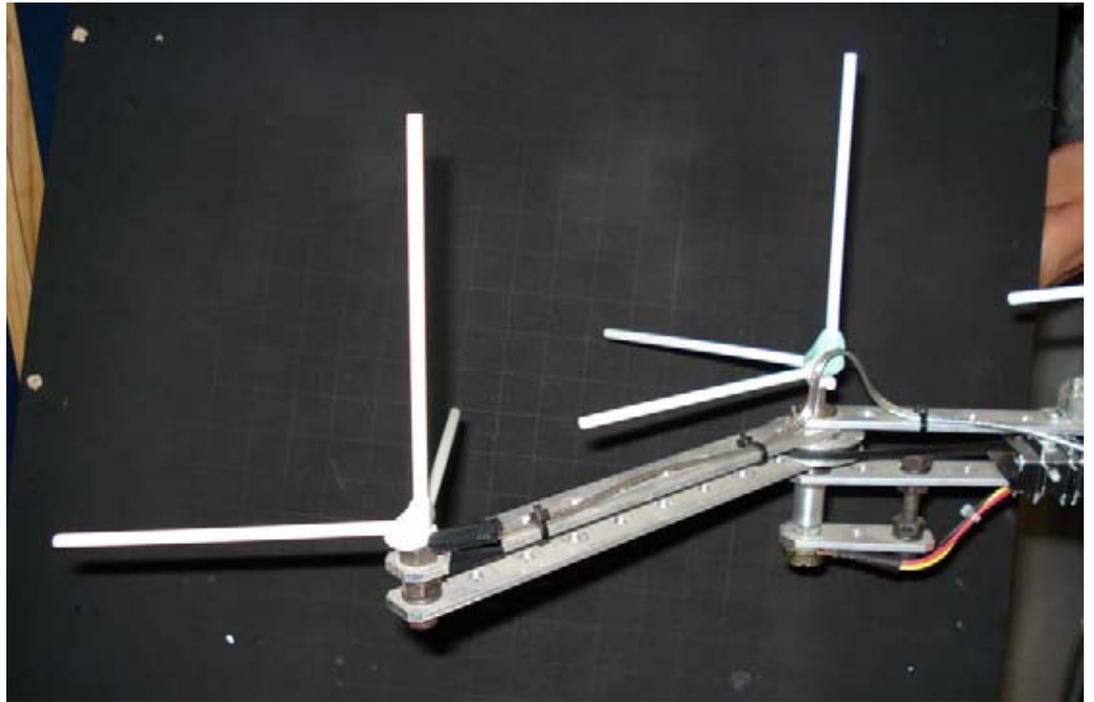


Imagen 22. Orientaciones en el SR, en los sistemas de referencia formados por popotes blancos el eje z es el que apunta hacia arriba.

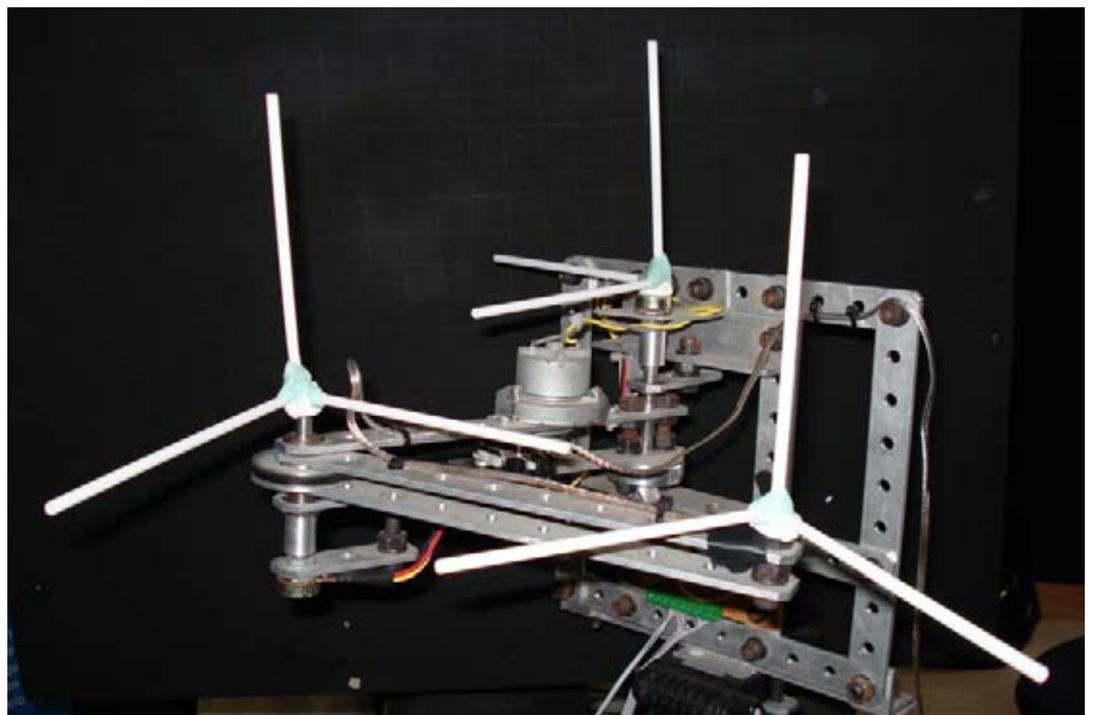


Imagen 23. Otras orientaciones en el SR, en los sistemas de referencia formados por popotes blancos el eje z es el que apunta hacia arriba.

Al terminar este tema se puede dar un ejemplo general del tema utilizando el SR a discreción del maestro podrían realizarse ejercicios para describir la orientación y posición del SR en diferentes posiciones y orientaciones, el aporte del SR al realizar estos ejercicios es que al

observar el SR el alumno puede comparar los resultados obtenidos con la orientación y posición real del SR. Así el SR apoya la creación de una conciencia de la descripción analítica de la orientación y posición en el espacio de tres dimensiones al permitir observar los resultados matemáticos en el espacio real que dichos resultados describen.

Al trabajar en este tema con el SR la puede surgir la necesidad de contar con una metodología para ubicar a los manipuladores en el espacio, así se pueden introducir a los temas consecuentes como el tema de la convención Denavit-Hartenberg.

Para ilustrar mas este contenido el maestro puede hacer uso de otro recurso didáctico bastante sencillo y este es construir sus propios "sistemas de referencia" tridimensionales como los de la imagen 24, con estos sistemas de referencia el maestro puede ilustrar de mejor manera la forma en que estos se ubican en el robot y los giros y distancias que marca la convención DH.

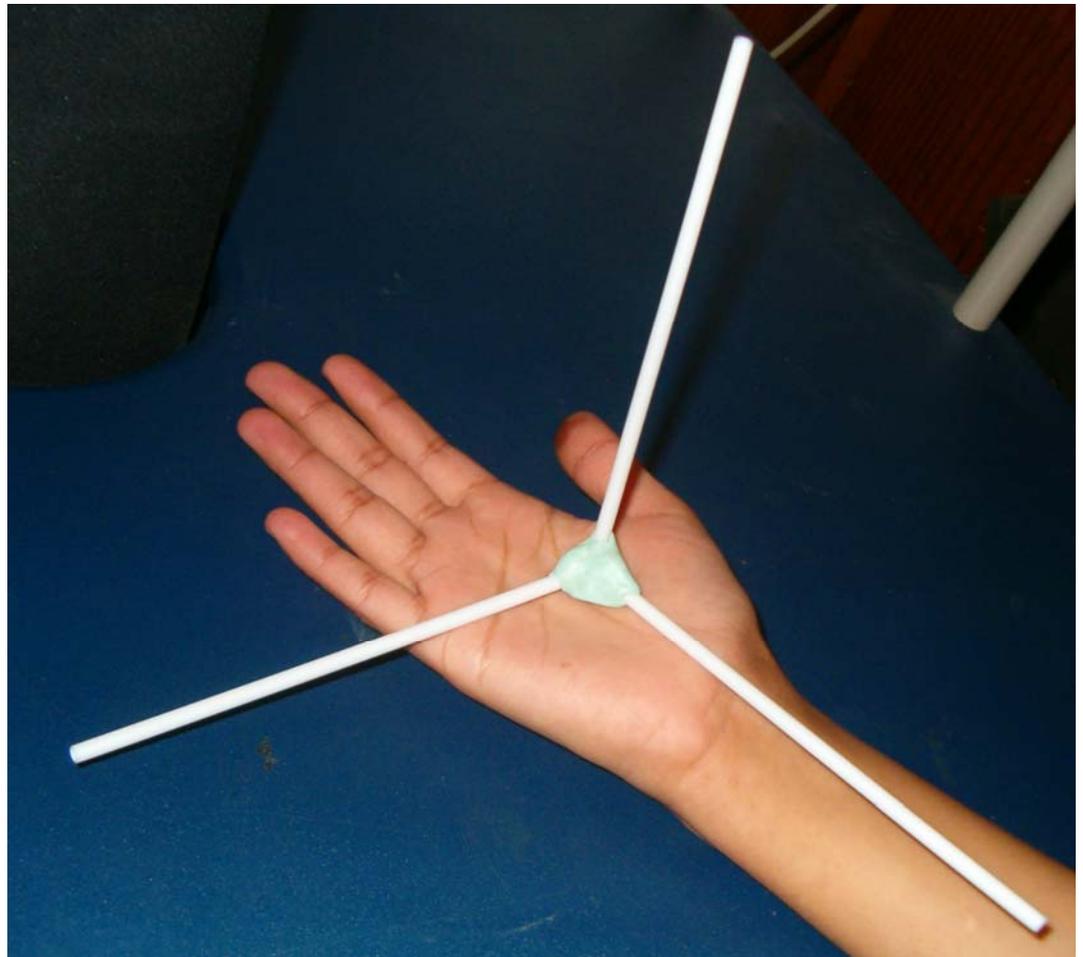


Imagen 24. Sistema de referencia hecho con popotes y plastlina epoxica.

Articulaciones.

Descripción teórica.

Los robots manipuladores son, esencialmente, brazos articulados. De forma más precisa, un manipulador industrial convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones o elementos de la cadena interrelacionados mediante articulaciones o pares cinemáticos. Las articulaciones permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones.

Existen diferentes tipos de articulaciones. Las más utilizadas en robótica son las que se indican en la imagen 25.

La Articulación de rotación suministra un grado de libertad consistente en una rotación alrededor del eje de la articulación.

En la articulación prismática el grado de libertad consiste en una translación a lo largo del eje de la articulación.

En la articulación cilíndrica existen dos grados de libertad: una rotación y una translación, como se indica en la imagen 25.

La articulación planar está caracterizada por el movimiento de desplazamiento en un plano que se muestra en la imagen 25, existiendo por tanto dos grados de libertad.

Por último la articulación esférica combina tres giros en tres direcciones perpendiculares en el espacio.

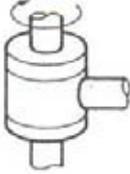
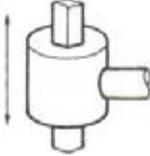
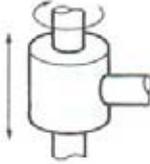
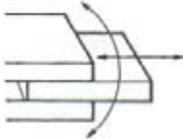
ESQUEMA	ARTICULACIÓN	GRADOS LIBERTAD
	ROTACIÓN	1
	PRISMÁTICA	1
	CILÍNDRICA	2
	PLANAR	2
	ESFÉRICA (RÓTULA)	3

Imagen 25. Diferentes tipos de articulaciones²³.

Demostración con el SR.

Después de la explicación teórica el maestro señalará las articulaciones de rotación (ver imagen 26) del manipulador y mostrará el movimiento que estas permiten, algunos elementos que se pueden resaltar de manera gráfica con el manipulador son: el grado de libertad que permite la articulación y las restricciones de movimiento que puede tener un manipulador como el manipulador del SR mostrado que no puede girar los 360° esto le servirá al maestro para posteriormente cuando se calculen soluciones de los modelos cinemáticas mostrar que puede haber soluciones teóricas que un robot en la práctica no puede alcanzar por sus limitaciones propias.

²³ Ollero, Anibal. *Op, cit* p. 17.

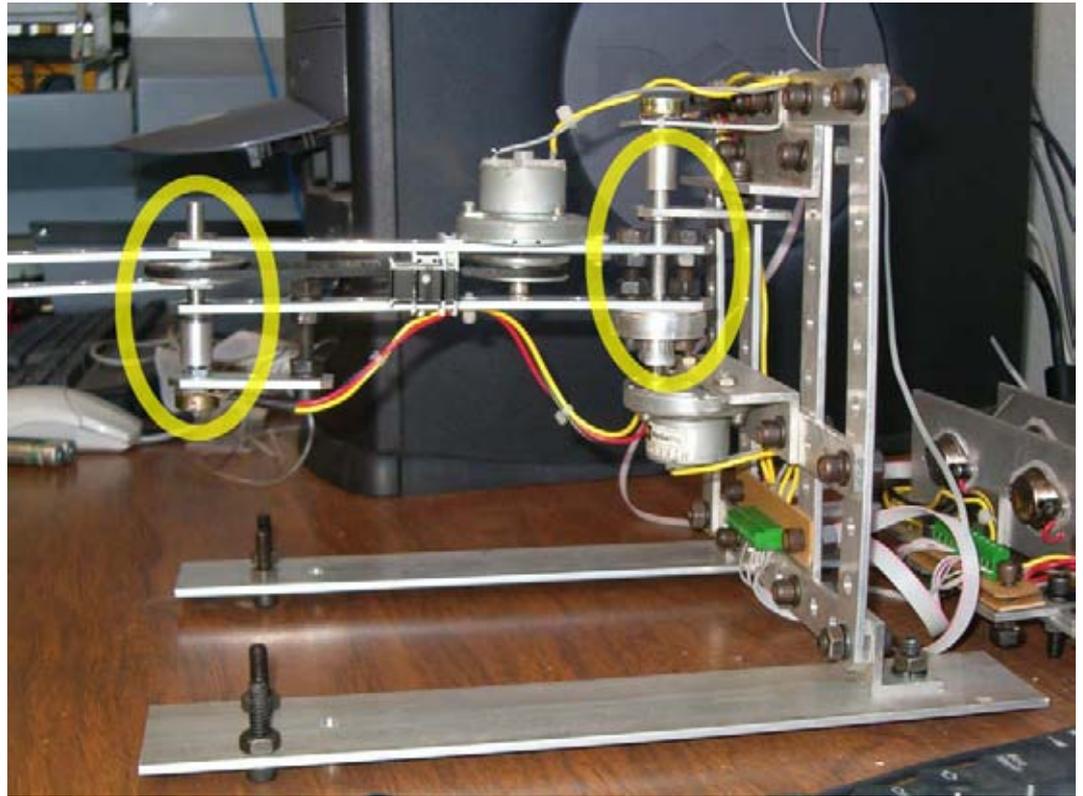


Imagen 26. Articulaciones.

La convención Denavit-Hartenberg.

Descripción teórica.

Para desarrollar el problema de la cinemática directa presentaremos una serie de pasos a seguir que permitirán un proceso sistemático para realizar el análisis, es posible realizar un análisis cinemática de cualquier manipulador sin seguir estos pasos pero en el caso de manipuladores puede tornarse complicado si no se sigue un proceso sistemático y además es una buena idea llevar esta convención para poder compartir de forma inteligible nuestro trabajo con otros ingenieros.

Cabe mencionar que la convención Denavit-Hartenberg que aquí se menciona es la clásica tal como fue presentada en 1955, ya que existe una versión modificada que fue introducida por Craig²⁴ en su libro de texto.

²⁴ Craig, John J. *Op, cit* p. 62-101.

La manera usual de posicionar los marcos de referencia es la que dicta la convención Denavit-Hartenberg (en adelante DH), bajo esta convención cada transformación homogénea A_i es un producto de cuatro transformaciones básicas:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se sabe que para obtener una transformada homogénea se necesitan 6 parámetros²⁵ sin embargo en la convención DH solo se usan 4 esto es posible gracias a la relativa libertad con la que se pueden ubicar los marcos de referencia, para hacer uso de la convención DH se deben cumplir las siguientes condiciones:

DH1:: el eje x_i es perpendicular al eje z_{i-1}

DH2:: el eje x_i intersecta al eje z_{i-1}

La interpretación física de los parámetros α_i , θ_i , d_i , a_i es la siguiente:

a_i es la distancia entre los ejes z_{i-1} y el eje z_i y es medida a lo largo del eje x_i .

α_i es el ángulo entre los ejes z_{i-1} y z_i medido en un plano normal a x_i el sentido positivo de α_i es determinado de z_{i-1} a z_i por la regla de la mano derecha.

d_i es la distancia desde el origen del marco $\{i-1\}$ hasta la intersección del eje x_i con el eje z_{i-1} medida a lo largo del eje z_{i-1}

²⁵ Craig, John J. *Op, cit* p. 62-101.

θ_i es el ángulo entre x_{i-1} y x_i medido en un plano normal a z_{i-1} .

Asignación de marcos de referencia:

Dado un manipulador es posible escoger los marco $0, \dots, n$ de una manera que las condiciones DH se cumplan, de hecho se debe observar que aun cumpliendo las condiciones DH la selección de los marcos de referencia no es única y diferentes ingenieros pueden tomar diferentes selecciones todas ellas correctas. Como primer paso seleccionaremos los ejes z_i de una manera intuitiva, mas específicamente asignamos el eje z_i como si fuera el eje de actuación de la junta $i+1$. Solo hay dos casos a considerar:

- i) Si la junta $i+1$ es de revolución, entonces z_i es el eje de revolución de la junta $i+1$
- ii) Si la junta $i+1$ es prismática, entonces z_i es el eje de translación de la junta $i+1$

Una vez establecidos los ejes z_i se establece el marco $\{0\}$ esta elección de marco $\{0\}$ es casi arbitraria, únicamente debemos cumplir con que el marco $\{0\}$ sea un marco derecho. Una vez establecido el marco $\{0\}$ empezamos un proceso iterativo donde definimos el marco $\{i\}$ usando al marco $\{i-1\}$, cumpliendo con las condiciones DH, por ultimo para la selección del marco $\{n\}$ generalmente se ubica el origen de $\{n\}$ simétricamente en el efector final acorde a la tarea que estemos planeando para el manipulador.

Demostración con el SR.

El maestro puede realizar un ejemplo de la convención DH con el manipulador, mostrando gráficamente cada uno de los parámetros DH en el manipulador, el maestro puede aprovechar este ejemplo para destacar la importancia de la ubicación de los marcos de referencia, sobre todo del marco inicial, y como varían los parámetros DH dependiendo de la ubicación elegida. Así el maestro puede mostrar que dependiendo del objeto de estudio y/o análisis, se elige la ubicación de los marcos de referencia.

En este tema y en general conviene seguir usando los "sistemas de referencia" para ayudar a ubicar los puntos donde estos sistemas se ubican con la convención DH.

Ecuaciones de cerradura en orientación y posición.

Descripción teórica.

El modelo directo de un robot busca obtener la posición y la orientación del efector final dados los valores de las variables de junta del robot.

Un robot manipulador está compuesto por una serie de lazos y juntas o eslabones y articulaciones, las juntas pueden ser simples de un grado de libertad (GDL) como la junta prismática P o la junta de revolución R , o pueden ser más complejas como una junta esférica con tres GDL. La diferencia entre estos dos tipos de juntas es que en el primer caso las juntas tienen un solo GDL, ya sea el ángulo de rotación en la junta de revolución o el desplazamiento en la junta prismática, y una junta tipo esférica tiene 3 GDL. Sin embargo a pesar de esto para el análisis cinemático se asume que las juntas tienen un solo GDL, con esto no se pierde generalidad ya que una junta con más de un GDL se puede ver como una serie de juntas de un solo GDL separadas por una distancia cero. Asumir que cada junta tiene un solo GDL brinda la ventaja de que las acciones de cada junta pueden ser descritas por un solo número real: el ángulo de rotación para la junta de revolución o el desplazamiento para la junta prismática.

Un manipulador con n juntas tendrá $n + 1$ lazos ya que cada junta conecta dos lazos, numeramos las juntas de 1 a n y los lazos de 0 a n empezando desde la base, bajo esta convención la junta i conecta el lazo $i - 1$ con el lazo i , consideramos la localización de la junta i fija al lazo $i - 1$. Cuando actúa la junta i el lazo i se mueve luego entonces el lazo 0 es fija ya que no hay junta que lo mueva.

Con la i -ésima junta asociamos una variable de junta denominada q_i , en el caso de las juntas de revolución la variable q_i es el ángulo de rotación, en el caso de la junta prismática la variable q_i es el desplazamiento.

$$q_i \begin{cases} \theta_i & \text{si la junta } i \text{ es rotatoria.} \\ d_i & \text{si la junta } i \text{ es prismática.} \end{cases}$$

Para realizar el análisis, primero fijamos un marco de referencia rígidamente a cada lazo. Fijamos el marco $\{i\}$ al lazo i , esto significa que no importa que movimientos realice el manipulador los puntos pertenecientes al lazo i permanecen constantes cuando son expresados con respecto al marco $\{i\}$, así cuando la junta i es actuada el lazo i junto con su marco $\{i\}$ experimentan el movimiento resultante. El marco $\{0\}$ que es fijo con respecto a la base es conocido como el marco de inercia.

Para conocer la posición y orientación del marco $\{i\}$ con respecto al marco $\{i-1\}$ usamos la transformada homogénea A_i , sin embargo dicha matriz no es constante ya que cambia conforme el robot se mueve, pero debido a que asumimos que cada junta tiene solo una variable de junta q_i entonces:

$$A_i = A_i(q_i)$$

Por la manera en que están fijados los marcos sabemos que cualquier punto con respecto al efector final permanece constante con respecto al marco final esto es el marco $\{n\}$, luego entonces para conocer la posición y orientación del efector final necesitamos el vector del marco de inercia $\{0\}$ al origen del marco $\{n\}$ (que nos da la posición), y la matriz de rotación que relaciona a $\{0\}$ con $\{n\}$, (que proporciona la orientación), esta información se encuentra en la transformada homogénea

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & O_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Así la posición y orientación del efector final con respecto al marco de inercia esta dado por:

$$H = T_n^0 = A_1(q_1) \cdots A_n(q_n)$$

Y cada transformada homogénea A_i esta dada por:

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & O_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Es decir conocemos la posición y orientación del efector final con respecto a la base del robot a través de conocer cada uno de las posiciones de sus lazos, los cuales conocemos por los marcos (que podemos llamar también sistemas de referencia o tramas) que cada lazo tiene fijado.

Emplear matrices de transformación, como las A_i , que relacionan sistemas de referencia es el método general de construir el modelo directo de un determinado robot, un robot articulado puede describirse definiendo cuatro magnitudes asociadas a cada articulación, esta descripción se conoce como representación de Denavit-Hartenberg.²⁶

Demostración con el SR.

Dados los siguientes parámetros Denavit-Hartenberg del SR

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	L_1	0	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2

El modelo de cinemática directa del SR queda así:

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} \cos_{12} & -\sin_{12} & 0 & L_2 \cos_{12} + L_1 \cos_1 \\ \sin_{12} & \cos_{12} & 0 & L_2 \sin_{12} + L_1 \sin_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

²⁶ Ollero, Anibal. *Op, cit* p. 66.

Donde

$$\text{Cos}_{12} = \text{Cos}_{\theta_1} \text{Cos}_{\theta_2} - \text{Sen}_{\theta_1} \text{Sen}_{\theta_2}$$

$$\text{Sen}_{12} = \text{Cos}_{\theta_1} \text{Sen}_{\theta_2} + \text{Sen}_{\theta_1} \text{Cos}_{\theta_2}$$

Siendo L_1 igual a 170 [mm] como se menciona en el capítulo 2.

El maestro puede desarrollar el modelo cinemático del SR en clase como ejemplo a la clase y posteriormente probarlo físicamente. Para realizar las comprobaciones el maestro puede evaluar al modelo con diferentes valores de las variables de articulaciones, obtener resultados y posteriormente introducir esos mismos valores a través de la GUI del SR, con esto observaran el desplazamiento del SR a la posición deseada, misma que es mostrada en la GUI pero que también puede ser medida físicamente con ayuda de un flexometro o regla para comprobar los resultados. La realización de esta demostración puede ser tan profunda como la clase la requiera ya que el maestro puede fácilmente medir los ángulos de rotación de las articulaciones con ayuda de un transportador y posteriormente la posición final mostrando a la clase que los resultados concuerdan con el modelo teórico.

Incluso en el caso de que existan pequeñas variaciones en los resultados, adjudicables al desempeño del SR, esto puede dar paso al maestro a preparar una dinámica donde los alumnos opinen con el sistema a la vista cual puede ser la razón de estos errores y llegar, con la guía del maestro, a conclusiones sobre diferentes temas como control, diseño, etc. que enriquecerán su formación. Por otra parte si el tiempo u otros factores no permiten realizar algún tipo de dinámica con la participación de los alumnos aún puede el maestro presentar una pequeña exposición para abordar estos temas en una demostración con el SR.

Cinemática Inversa.

En la mayor parte de las aplicaciones, interesa definir los movimientos del robot en el espacio cartesiano con relación a la tarea que se pretende desarrollar. Por consiguiente el control del robot hace necesario obtener los valores de las variables articulares para que la posición y orientación del robot, o en particular de su efector final, sea la deseada. Se trata del problema inverso al de la cinemática directa, dadas la posición y orientación deseadas del efector final ¿cómo

calcular el conjunto de ángulos de articulación que logren este resultado deseado?

El problema de resolver las ecuaciones cinemáticas de un manipulador es no lineal. Dado el valor numérico de 0_nT , tratamos de encontrar los valores de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$. Al igual que con cualquier conjunto no lineal de ecuaciones, debemos preocuparnos por la existencia de soluciones, por los casos con soluciones múltiples y por el método de solución.

La pregunta de si existe una solución hace que surja otra duda sobre el espacio de trabajo del manipulador. En general, el espacio de trabajo es el volumen de espacio que puede ser alcanzado por el efector final del manipulador. Para que exista una solución el punto de destino debe estar dentro del espacio de trabajo. Si la posición y orientación deseadas de la trama del efector final se encuentran en el espacio de trabajo entonces existe por lo menos una solución.

Múltiples soluciones.

Otro posible problema que nos encontramos al resolver ecuaciones cinemáticas es el de múltiples soluciones. El hecho de que un manipulador tenga múltiples soluciones puede ocasionar problemas, ya que el sistema tiene que ser capaz de elegir una. Los criterios sobre los que debe basarse una decisión varían, pero una elección muy razonable sería la solución más cercana. No obstante, la noción de "cercano" podría definirse de varias formas. Por ejemplo, los robots comunes podrían tener tres vínculos extensos seguidos de tres vínculos de orientación más pequeños cerca del efector final. En este caso podría aplicarse una ponderación en el cálculo de la de cuál solución es "más cercana", de manera que la selección favorecería las articulaciones móviles más pequeñas, en vez de mover las articulaciones grandes, cuando exista una opción. La presencia de obstáculos podría forzar la elección de una solución "más lejana" en casos en los que la solución "cercana" produjera una colisión; entonces, en general necesitamos poder calcular todas las soluciones posibles.

El número de soluciones depende del número de articulaciones en el manipulador, pero también es una función de los parámetros de vínculo ($\alpha_i, a_i, y d_i$ para un manipulador con articulación giratoria) y los rangos de movimientos permisibles de las articulaciones. Debido a los límites sobre los rangos de articulación algunas de estas soluciones podrían ser inaccesibles.

En general, entre más parámetros de vínculo distintos de cero haya, más formas habrá de llegar a un cierto destino.

Métodos de solución.

A diferencia de las ecuaciones lineales, no hay algoritmos generales que puedan emplearse para resolver un conjunto de ecuaciones no

lineales. Al considerar métodos de solución, es conveniente definir lo que constituye la "solución" de un manipulador dado.

Se considerará que un manipulador tiene solución si las variables de articulación pueden determinarse mediante un algoritmo que no permita determinar todos los conjuntos de variables de articulación asociados con una posición y orientación dadas.

El punto de esta definición es que, en el caso de múltiples soluciones, requeriremos que sea posible calcular todas las soluciones. Por lo tanto, no se considera que ciertos procesos iterativos numéricos resuelvan el manipulador en la medida en la que no se garantiza que esos métodos encuentren todas las soluciones.

Se dividen todas las estrategias de solución de manipuladores propuestas en dos clases amplias: soluciones de forma cerrada (analíticas) y soluciones numéricas. Debido a su naturaleza iterativa, las soluciones numéricas son generalmente mucho más lentas que la solución de forma cerrada correspondiente: de hecho, son tan lentas que para casi todos los fines no se está interesado en el enfoque numérico para la solución de problemas cinemáticos.

Por otra parte, en este contexto, "forma cerrada" significa un método de solución basado en expresiones analíticas o en la solución de un polinomio de grado 4 o menor, de tal forma que basta con los cálculos no iterativos para llegar a una solución. Dentro de la clase de soluciones de forma cerrada, se distinguen dos métodos para obtener la solución: algebraico y geométrico. Estas distinciones son algo confusas: cualquier método geométrico a considerar se aplica por medio de expresiones algebraicas, por lo que los dos métodos son similares. Los métodos tal vez difieren en su enfoque.

Un importante resultado reciente en cinemática es que, de acuerdo con la definición previa de solubilidad, todos los sistemas con articulaciones angulares y prismáticas que tengan un total de seis grados de libertad en una sola cadena en serie pueden resolverse. No obstante, esta solución general es numérica. Sólo en casos especiales los robots con seis grados de libertad pueden resolverse analíticamente. Estos robots para los que existe una solución analítica (o de forma cerrada) se caracterizan ya sea por tener varios ejes de articulación perpendiculares o muchas α_i iguales a 0 o ± 90 grados. Generalmente el cálculo de soluciones numéricas consume mucho tiempo cuando se le compara con la evaluación de expresiones analíticas; por lo tanto, se considera muy importante diseñar un manipulador de manera que exista una solución de forma cerrada. Los diseñadores de manipuladores descubrieron esto muy pronto, por lo que ahora casi todos los manipuladores industriales están diseñados con la suficiente simplicidad como para que pueda desarrollarse una solución de forma cerrada.²⁷

²⁷ Craig, John J. *Op, cit* p. 101-106.

Demostración con el SR.

Independientemente de la forma en que el maestro aborde el tema de la cinemática inversa, ya sea pensando en presentar soluciones numéricas, analíticas o ambas; el SR resulta útil para demostrarlas y apoyar la clase. El SR muestra sus variables de articulación en tiempo real, además de que se le pueden indicar posiciones objetivo en sus articulaciones con lo que se puede usar la comprobación de los resultados obtenidos de una forma muy parecida al tema anterior de cinemática directa.

Conclusiones

El SR fue desarrollado pensando en un sistema flexible que sirviera a los estudiantes para profundizar en su estudio sobre la robótica. Una vez construido me pareció que este sistema o uno similar podría ser de gran utilidad al momento de impartir en clase los temas introductorios de la robótica, principalmente por lo gráfico del sistema y la facilidad para programar en su entorno de desarrollo. Estas características son ideales para un estudio introductorio ya que el SR ayuda al alumno a comprender el estudio del movimiento de un robot manipulador en el espacio al manifestárselo de manera gráfica.

En cuanto a las demostraciones que se pueden hacer con él se presentan como opciones ya que como se menciono anteriormente no es el objetivo decirle al maestro como dar la clase si no darle un recurso para permitir pasar los conocimientos de una forma más suave respetando el estilo propio de cada maestro.

El SR cumple en su objetivo de ser un medio para apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje de la robótica, por medio del SR los conceptos presentados en clase se vuelven más sencillos para la asimilación de los alumnos, fomentando con ello el estudio de la robótica. El SR también facilita el ambiente del grupo, es decir fomenta una interacción más participativa de los alumnos con el maestro y con el tema de la clase de esta forma también permite mejorar la experiencia de la clase y su rendimiento.

Se sabe que para obtener resultados medibles sobre el desempeño del SR como recurso didáctico sería necesario probarlo en clase, sin embargo se considera que el esfuerzo puesto en su desarrollo esta en el camino correcto.

Por último el uso de recursos didácticos y sobre todo el apoyar al proceso de enseñanza-aprendizaje en la impartición de clase nos permite ser generosos con el conocimiento, lo que beneficia al maestro, a los alumnos y finalmente a toda la sociedad.

Trabajo Futuro

La mayor parte del trabajo futuro que se deberá hacer sobre el SR surgirá de su aplicación en clase. Sin embargo en lo inmediato existe la necesidad de agregar un grado de libertad que le permita alcanzar la configuración angular y asemejarse más a un manipulador moderno, esto permitiría enriquecer la experiencia de trabajo con el SR.

Bibliografía

- Ollero, Anibal. *Robótica Manipuladores y robots móviles*. AlfaOmega, México, 2007.
- Sandier, Ben-Zion. *ROBOTICS Designing the Mechanisms for Automated Machinery*. Academic Press, E.U., 1999.
- Pinto Villatoro, Roberto. Saber enseñar. Manual de entrenamiento para instructores de empresas. Continental, México, 1992.
- Ogalde Careaga, Isabel. et, al. Los materiales didácticos. Medios y recursos de apoyo a la docencia. Trillas, México, 1992.
- Craig, John J. *Robótica*. Pearson Education, tercera edición México, 2006.
- Dabat, Alejandro et al. Globalización y cambio tecnológico. UNAM et al. Mexico. 2004.
- The Seattle Times. Benajamin J. Romano. Microsoft voltage to charge up robotics industry. 12/18/2006
- UNECE. Press Release ECE/STAT/04/P01 . Genova 2004. p. 4
- Industrial Robots and Related Equipment Suppliers. IFR. 4/10/2007.
- World technology: Robots start to move. Economist Intelligence Unit – Industry Briefing. 27/junio/2006
- Ingenierías ANFEI XXX Conferencia nacional de ingeniería: la eficiencia terminal en los programas de ingeniería. Octubre-Diciembre Vol. VI, No. 21, 2003.

Mesografía.

- Robotics online - Robot Industry Statistics. 4th Quarter 2007 - North American Robot Orders Jump 24% in 2007.
<http://www.roboticonline.com/public/articles/articlesdetails.cfm?id=3375>
- About iRobot. iRobot corporation.
<http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=74>
- Personal Robotics The Market for Task, Security, Entertainment, and Educational Robots and Major Components. ABI Research. Primer cuarto del 2008.
http://www.abiresearch.com/products/market_research/Personal_Robotics

Ingeniería Mecatrónica – Descripción de la carrera. Facultad de
Ingeniería - UNAM
<http://www.ingenieria.unam.mx/carreras/mecatronica1-1.html>