

Índice general

1. Generalidades sobre Robots Industriales	1
1.1. Introducción	1
1.2. Tipos de robots industriales	3
1.3. Grados de libertad en un manipulador	4
1.4. Organización global del robot	6
1.5. Otros conceptos en robótica	7
2. Coordenadas espaciales y transformaciones	9
2.1. Introducción	9
2.2. Coordenadas homogéneas	9
2.3. Transformaciones de coordenadas en el espacio de trabajo	11
2.4. Transformaciones de coordenadas rotulares	13

Capítulo 1

Generalidades sobre Robots Industriales

1.1. Introducción

El robot, según la definición de Robotics Institute of America, “es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover material, piezas o partes, herramientas o dispositivos especializados mediante movimientos programados variables para la realización de una variedad de tareas”.

De acuerdo con esta definición el robot industrial está compuesto por un manipulador mecánico y una unidad para su control, como se ilustra en la figura 1.1.

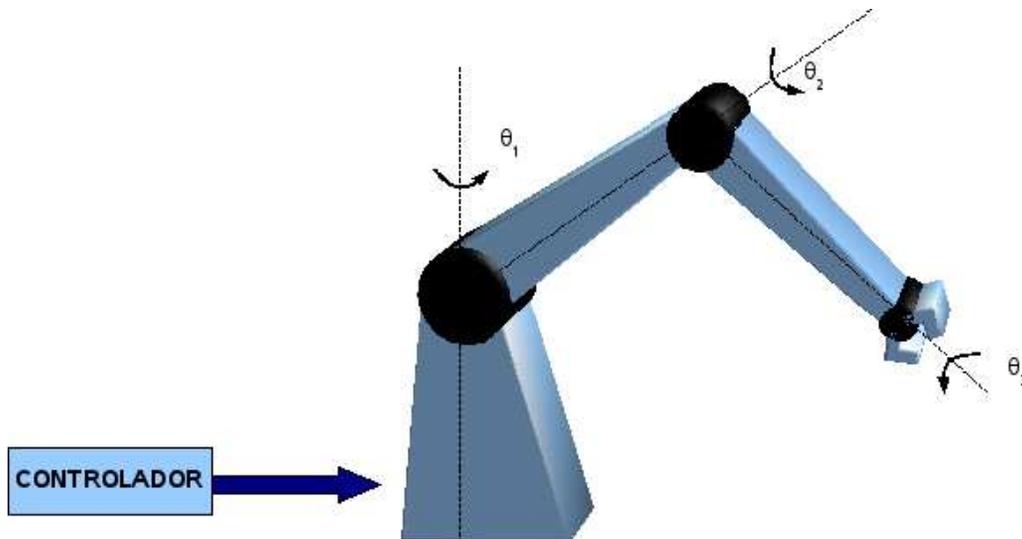


Figura 1.1: Robot Industrial.

El manipulador es, considerado mecánicamente, como una cadena cinemática abier-

ta construida por segmentos articulados que pueden girar en torno, o deslizarse respecto, a ejes o direcciones llamadas rótulas, en general, como se ilustra en la figura 1.1.

En la figura 1.1 se ha dibujado un manipulador con un torso, que puede girar con respecto a la vertical en un ángulo θ_1 un brazo superior que puede girar un ángulo θ_2 respecto a un eje, que pase por el “hombro” y finalmente un brazo inferior (antebrazo) que puede girar en un ángulo θ_3 respecto a un eje que pase por el “codo”. Los movimientos rotatorios iniciados son llamados “grados de libertad” de posición pues bastan para posicionar la “mano” en cualquier punto del espacio alcanzable o de trabajo del manipulador.

En este trabajo se considerará sinonimos los términos unión, rótula, articulación, junta o grado de libertad (“joint”) y asimismo los vocablos segmento, enlace o eslabón (“link”).

En vez de rótulas giratorias los manipuladores pueden tener una o más uniones deslizantes o prismáticas. Un manipulador con tres grados de libertad de posicionamiento es llamado no redundante y será el único tipo considerado en este curso. Hay también manipuladores redundantes y son aquellos que tienen más de tres grados de libertad de posicionamiento, lo que es necesario o útil cuando el espacio de trabajo del manipulador contiene obstaculos al mismo movimiento de éste.

El brazo del manipulador termina en una mano, garra o efector final (“end-effector”), destinada a asir y mmover una herramienta o material (por ejemplo un soldador o una tuerca) En general la muñeca (de la mano) debe tener tres grados de libertad o de gira respecto a un sistema de coordenadas x,y z ubicados en ella. Las rotaciones en torno a los ejes x, y, z son llamados giro o rodadura (“roll”), cabeceo (“pitch”) y guiñada (“yaw”). En la muñeca humana el giro está entre los límites de -180° y 90° , el cabeceo entre -90° y 50° y la guiñada entre -45° y 15° (todos aproximadamente).

En tanto que la mano humana tiene cinco dedos, los manipuladores rara vez tienen más de tres dedos. Los dedos tienen a su vez grados de libertad apropiados para las operaciones a realizar por el robot.

Usualmente, los segmentos de los manipuladores son rígidos, pero hay también avances en diseños con segmentos flexibles. En general, los robots cuentan con un solo brazo, pero hay tipos de ellos con dos brazos. En estos, así como cuando hay dos o más manipuladores simples en un espacio común de trabajo, se presenta el problema de la coordinación de tareas, operaciones y movimientos sin colisiones o trabazones.

Las articulaciones de los manipuladores son movidas por motores (que, generalmente, son eléctricos) montados en ellas apropiadamente y comandados, por operario o programa, desde el sistema de control, vía servomecanismos con realimentación de posición y de velocidad. En el caso más simple los dedos de la garra son cerrados o abiertos sin realimentación de posición o de fuerza. Sin embargo, en tipos avanzados de robots hay sentido de tacto, posición o fuerza. También hay gran progreso en robots con visión artificial.

La gran mayoría de los robots son diseñados para operación fija, aunque hay creciente desarrollo en robots ambulatorios.

Asimismo, aunque la mayoría de los manipuladores son de índole antropomorfa, en que tienden a asemejarse al brazo humano, hay muchas otras formas de estructura, motivadas por razones técnicas y económicas.

Cabe agregar que la Japan Industrial Robot Association define varios tipos de robots, tales como: manipulador; robot secuenciador; robot replicador; robot inteligente; robot repetidor. Algunos de estos tipos no serían considerados robots de acuerdo a la definición dada al comienzo de este capítulo.

Además de los robots y manipuladores robóticos, tienen gran utilidad y aplicaciones los telemanipuladores y los teleoperadores; en particular hay gran esfuerzo en su desarrollo para uso en el ámbito submarino y en ambientes contaminados o tóxicos.

1.2. Tipos de robots industriales

Los primeros robots industriales fueron introducidos en los años 1960 en líneas de armado de automóviles; tales como los denominados con siglas PUMA (Unimation), T³ (Cincinnati Milacron) y TRb-6 (Asea).

Los robots pueden ser clasificados desde varios puntos de vista, tales como los de: comportamiento; estructura; trayectorias. El primer punto de vista es aplicable luego de haber estudiado temas de cinemática, cinética y otros conceptos. Se considera aquí sólo los dos primeros puntos de vista.

A. Clasificación en base a estructura y movimiento.

Para esta clasificación se considera los tres grados de libertad (dof) de posición, para ubicar la mano en un punto del espacio de trabajo (conjunto de puntos alcan-

zables). La mano tiene además sus tres dof citados antes (giro, cabeceo y guiñada).

Las formas básicas de robots son de los tipos descritos a continuación.

- a) Tipo revoluto. Remeda el brazo humano y tiene rotaciones de torso, hombro y codo.
- b) Tipo polar (esférico). Tiene rotación de cintura en la base, giro en torno a la vertical y extensión prismática (del brazo).
- c) Tipo cilíndrico. Posee giro de torso, alargamiento prismático vertical y extensión prismática horizontal del brazo.
- d) Tipo cartesiano (rectangular), deslizante. Tiene movimientos prismáticos perpendiculares entre sí.
- e) Tipo cartesiano (rectangular), grúa. Posee movimientos perpendiculares entre sí pero tiene una grúa para los deslizamientos.
- f) Tipo SCARA. Tiene rotaciones respecto a ejes verticales en hombro y codo y levantamiento en el extremo.

B. Clasificación en base a trayectorias.

Hay control de trayectorias punto a punto y continuas.

- a) Control punto a punto. Se programa el robot de modo que se detenga en cada punto y en éste planea su próximo movimiento en forma predeterminada. Entre puntos no es controlado pero se mueve de acuerdo con la estructura del manipulador. Ofrece gran exactitud y repetibilidad.
- b) Control del robot de modo que siga una trayectoria arbitraria de forma exacta. El movimiento es más suave a lo camino pero hay problemas de cómputo de velocidad en tiempo real, por lo que tiene menor rendimiento que el de control paso a paso.

1.3. Grados de libertad en un manipulador

Se indicó antes que el manipulador robótico (RM) es importante tanto en sí mismo como parte de un robot industrial (IR) y que puede ser considerado como una cadena cinemática, formada por segmentos articulados, abierta terminada en la mano. Un RM revoluto de seis grados de libertad es mostrado esquemáticamente en la figura 1.2.

En la figura 1.2, los segmentos son a , b y c y las rótulas son 1, 2 y 3 para posicionamiento y 4, 5 y 6 para orientación de la mano. La rotación de un segmento respecto a su eje es indicada por un rombo, en tanto que la rotación de un segmento

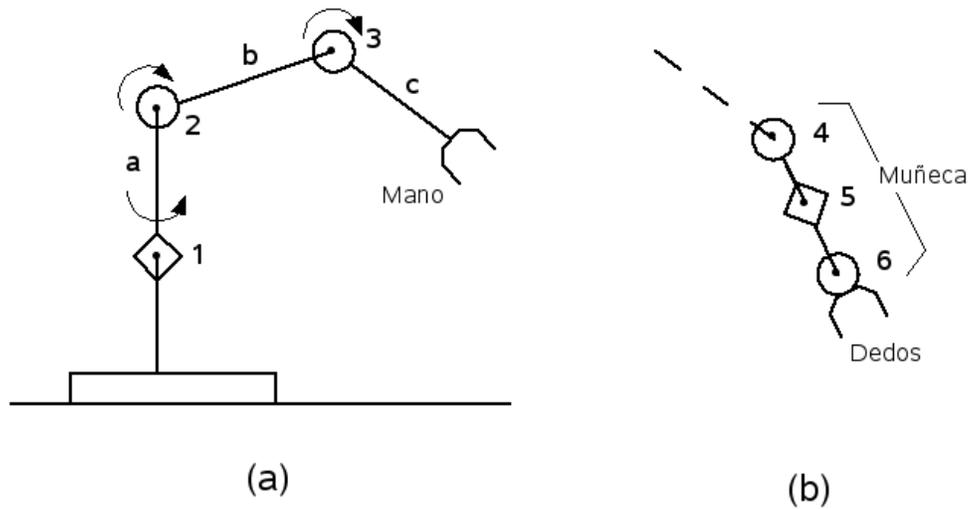


Figura 1.2: Grados de libertad (dof) 1 a 6. (a)Dof de posición. (b)Dof de orientación

respecto a su vecino es representada por un círculo. Cada rótula tiene un solo grado de movilidad que en RM no redundantes es sinónimo de un solo grado de libertad (dof).

En articulaciones prismáticas no hay rotación entre segmentos sino deslizamiento del uno respecto al otro.

Las rótulas son accionadas por motores eléctricos, neumáticos o hidráulicos y los lazos de control, o servomecanismos, pero ellos serán tratados en un capítulo posterior.

Un dof representa un movimiento independiente y generalmente son necesarios los 6 dof indicados en la figura 1.2, como, por ejemplo, en tareas de armado o ensamblado. Un IR para pintura o soldadura podría requerir 5 dof, en tanto que 3 dof pueden ser suficientes para transferir piezas entre dos puntos.

Para el caso de un cuerpo en el espacio tridimensional se tiene que 6 dof determinan unívocamente su posición y orientación y ellos son traslaciones a lo largo de los ejes x , y , z y rotaciones en torno a estos, respectivamente. En espacio de dos dimensiones (un plano) bastan dos traslaciones y una rotación.

Por cinemática (en RM) se entiende el estudio de movimientos lineales o angulares sin considerar las fuerzas o momentos, respectivamente, asociados con ellos. Por movimiento se subentiende cambios de posición, velocidad y aceleración, y de derivadas temporales más altas.

La cinática (en RM) envuelve consideraciones de fuerza, momentos, energías, masa, e inercia, equilibrio, estabilidad, y otros conceptos.

Por dinámica (en RM) se entiende la combinación de cinemática y cinética.

1.4. Organización global del robot

En la figura 1.1 se bosquejó un manipulador y su sistema controlador. En esta sección se explicará con más detalles la organización global del sistema de control. Los servomecanismos y lazos de control de las rótulas serán tratados en un capítulo posterior.

La organización global de un IR (robot industrial) es presentada en figura 1.3.

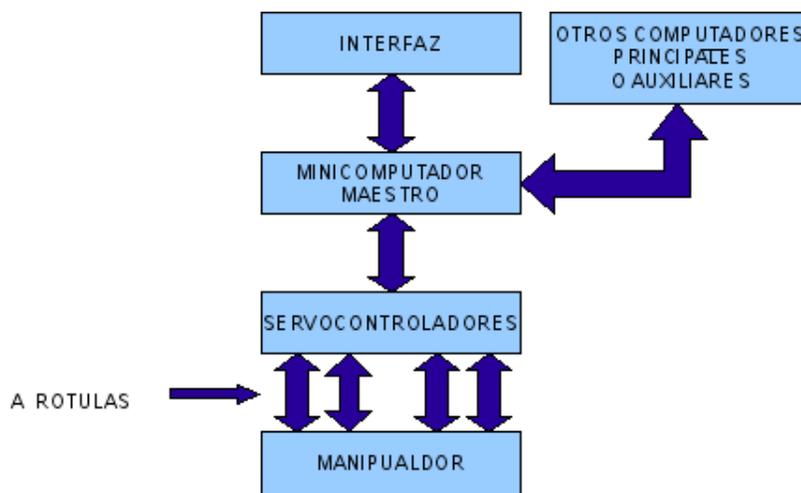


Figura 1.3: Organización de un Robot Industrial (IR).

La interfaz del usuario consta de teclado, conmutadores (joysticks), pantalla y un controlador manual (teachpendant). El (micro)computador maestro supervisa el control y operación globales del robot, de acuerdo con programas y datos internos y con instrucciones recibidas desde la interfaz y algún otro computador de mayor jerarquía y emite comandos a los servocontroladores. Puede usar además microcomputadores auxiliares como, por ejemplo, para cómputos paralelos o intermedios. Dispone de memorias RAM, ROM y de burbujas para mantener o modificar datos e instrucciones.

Los servocontroladores son, en general, microprocesadores que aceptan instrucciones digitales y emiten (mediante conversores digital/análogos) comandos hacia servoac-

cionadores, uno por rótula. Estos, a su vez, comandan los servomotores montados en las rótulas, emitiéndoles señales de activación o de freno. Desde las rótulas hay realimentaciones de potenciómetros y tacómetros o codificadores ópticos, según sea el caso. En general se tiene un microprocesador servocontrolador por rótula.

En el accionamiento del manipulador surgen dos problemas básicos. El problema directo consiste en determinar la posición (y orientación) de la mano dados los ángulos de las rótulas, o dados los voltajes aplicados a los servomotores rotulares. El problema inverso consiste en determinar los ángulos de las rótulas (o los voltajes a aplicar a los servomotores rotulares) necesarios para dar una posición (y orientación) deseada de la mano. En caso de articulaciones prismáticas hay que considerar, obviamente, deslizamientos lineales en vez de ángulos.

1.5. Otros conceptos en robótica

En esta Sección se comenta brevemente algunos conceptos importantes en la selección u operación de robots industriales (IR).

A. Exactitud.

Se refiere a la habilidad del IR para mover su mano, con velocidad especificada, hasta una posición comandada dentro de su espacio de trabajo, portando quizás alguna herramienta. Exactitud es la distancia, o diferencia, entre la posición lograda y la comandada, e idealmente debiera ser nula. Es mejor en sistemas digitales que análogos.

B. Repetibilidad.

Es la dispersión, o rango, entre las posiciones alcanzadas en varios intentos para ubicar la mano en una posición comandada. Idealmente se debiera lograr la misma posición en los varios intentos, pero, obviamente, ella debiera ser la deseada o exacta.

C. Velocidad y aceleración.

Para lograr tiempos mínimos de trabajo o ciclos de fabricación (o máxima productividad o eficiencia) las aceleraciones y velocidades de desplazamiento de la mano (y las rótulas) del IR deberían ser altas. Pero ello complica y encarece el diseño del manipulador y la operación. Por ejemplo, una alta velocidad en la trayectoria requiere estructuras más livianas (onerosas) o cortas (poco alcance) o motores más potentes (mayor costo y peso) y dificulta el alcanzar la posición deseada con velocidad y aceleración nulas (frenos más caros).

D. Seguridad.

Los robots industriales tienen partes móviles de gran peso y velocidad y se debe establecer medidas apropiadas de seguridad para los operarios y otras personas y equipos.

E. Sensado e inteligencia.

Estos conceptos serán discutidos en un Capítulo posterior.

F. Robots en manufactura integrada.

Aunque un robot es interesante y útil en sí mismo o solo, su mayor utilización se encuentra formando parte de sistemas de fabricación computarizada. Los sistemas de manufactura flexible (FMS) usan uno o más IR para realizar tareas de fabricación y armado de bienes discretos. Los robots, además de tareas de traslado de piezas o herramientas, usan éstas para fabricar y ensamblar componentes o unidades completas, sirviendo como máquinas programables para una variedad de tareas u operaciones. Estos sistemas FMS generalmente forman parte de sistemas de manufactura integrada (CIM), de creciente desarrollo.

Estos esquemas de manufactura se han visto dificultados por falta de estandarización entre robots de diversos fabricantes. Hay en pleno desarrollo protocolos para interconexión de máquinas, tales como el Protocolo de Automatización Manufacturera (MAP), complementados por otros, como el Protocolo Técnico de Oficina (TOP), para automatizar todos los aspectos del diseño y operación de sistemas fabriles.

Capítulo 2

Coordenadas espaciales y transformaciones

2.1. Introducción

Se mencionó en el capítulo anterior que en los problemas directo e inverso se debe relacionar la posición, y orientación, de la mane con los ángulos o desplazamientos de las rótulas. Más aún interesa relacionar la posición y orientación de la mano con los voltajes o señales de comando aplicados, o que se deba aplicar, a los servomotores. Estos problemas envuelven definiciones de sistemas de coordenadas espaciales y transformaciones de coordenadas entre ellos.

Se considera en general en lo que sigue, por simplicidad, sólo los tres grados de libertad de posición de un manipulador revoluto (rótulas giratorias) y con servomotores rotulares eléctricos. Los tres dof son de giro de torso o cintura, de hombro y de codo. En un caso real hay que agregar los tres dof de orientación de la mano y los movimientos de los dedos (a lo menos de apretar y soltar piezas) .

Se debe definir, en consecuencia, varios sistemas de coordenadas. El sistema de coordenadas absoluto es definido en la base del RM (manipulador) supuesta fija. Hay que definir además sistemas de coordenadas en las rótulas y en la muñeca. En relación a este último se define los movimientos de la mano.

En los problemas directo e inverso hay que ir transformando coordenadas rótula a rótula desde la base (rótula o segmento 0) hasta la mano (rótula o segmento $n + 1$), o viceversa.

2.2. Coordenadas homogéneas

Es costumbre usar en robótica sistemas de coordenadas homogéneas y estas pueden ser introducidas empleando el esquema mostrado en la figura 2.1.

En la figura 2.1 se ha definido un sistema (absoluto) de coordenadas ortogonales (x, y, z) en la base fija 0 y otro sistema ortogonal (x', y', z') en la mano M. A lo largo de los ejes (x', y', z') hay respectivos vectores unitarios $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ ortogonales entre sí. La orientación del sistema (x', y', z') respecto al (x, y, z) puede ser descrita por la matriz de rotación

$$\mathbf{R} = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3] = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde e_{kx} denota coordenada x del vector k ($k = 1, 2, 3$).

Nótese que \mathbf{R} es una matriz 3×3 invertible (o no singular).

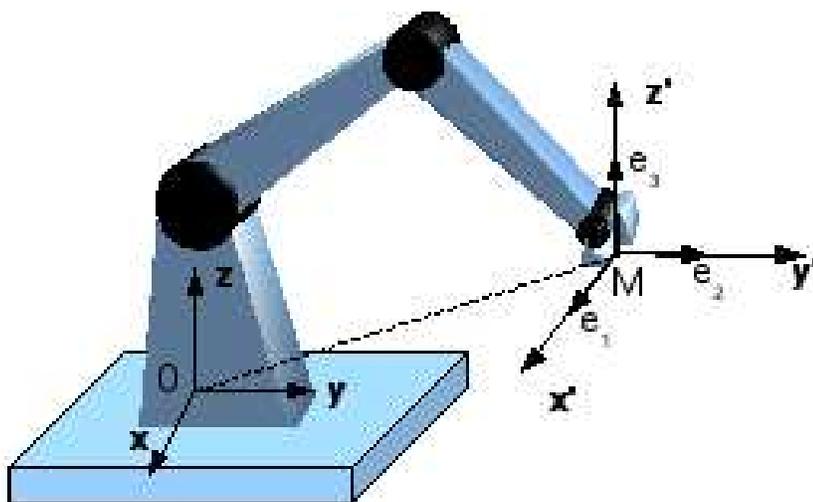


Figura 2.1: Sistemas de coordenadas.

Sea ahora un punto P cuya posición respecto al sistema centrado en M es dada por el vector \mathbf{q}' . La posición de P respecto al sistema centrado en O es dada por

$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{q}' + \mathbf{r} \quad (2.2)$$

donde \mathbf{r} es el vector \overline{OM} desde O hasta M .

La ecuación (2.2) puede ser escrita como una sola multiplicación matricial

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{r} \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (2.3)$$

donde

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q'_x \\ q'_y \\ q'_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Esta ecuación no se altera si se agrega una cuarta fila [0001] a la matriz, escribiéndola entonces como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{q}' \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} q'_x \\ q'_y \\ q'_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

donde \mathbf{T} es la matriz de transformación homogénea

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} & \mathbf{R} & \mathbf{r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} & r_x \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} & r_y \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Esta forma 4×4 es invertible y, por ende, es muy útil en lo que sigue.

Nótese que P puede ser un punto variable que describa vértices, lados o formas de algún cuerpo o pieza manipulada por la mano.

2.3. Transformaciones de coordenadas en el espacio de trabajo

Las transformaciones de coordenadas homogéneas aparecen en los problemas directo e inverso, como se indicó antes, y ello será considerado más adelante.

Las operaciones y tareas de armado o ensamblado de piezas por un robot pueden ser interpretadas como una sucesión de transformaciones de coordenadas homogéneas. En efecto, los objetivos del movimiento usualmente son dados en base a ubicaciones espaciales y las características de las piezas a manipular son definidas en relación a características de otras piezas o elementos.

En la figura 2.2 se bosqueja una tarea de ensamblado a, b, c. En la figura se ha definido varios sistemas de coordenadas, centrados en O, A, B y C, como $(x_k, y_k, z_k; k = 0, 1, 2, 3)$, aunque sólo se dibuja algunos de los ejes coordenados, por claridad.

Sea el problema de mover la mano (o garra con herramienta) del manipulador al punto p , en la pieza c . Si se conoce todas las dimensiones de las piezas a, b, c y sus ubicaciones y orientaciones en el espacio, se puede determinar la posición del punto p en el sistema de coordenadas (absolutas o fijas) centrado en O empleando coordenadas homogéneas.

En este problema se conoce, entonces, las coordenadas de p en el sistema 3 centrado en C , $r^{(3)} = (x^{(3)}, y^{(3)}, z^{(3)})$, y se desea determinar su posición $r^{(0)} = (x^{(0)}, y^{(0)}, z^{(0)})$ relativa al sistema O centrado en O .

La posición y orientación del sistema de coordenadas 1 respecto al O es dada por

$$\mathbf{T}_{01} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{01} & \mathbf{r}_{01} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

donde \mathbf{T} y \mathbf{R} son matrices y \mathbf{r} vector definidos en la sección 2.2.

Ecuaciones similares rigen para expresar los sistemas 2 respecto a 1 y 3 respecto a 2. Empleando sucesivamente la ecuación (2.7) se llega a que la matriz que expresa la posición y orientación del sistema 3 respecto al O es

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{01} \cdot \mathbf{T}_{12} \cdot \mathbf{T}_{23} \quad (2.8)$$

El vector que da la posición y orientación de P respecto a O es dado por

$$\mathbf{r}^{(0)} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{r}^{(3)} \quad (2.9)$$

donde $\mathbf{r}^{(0)}$ y $\mathbf{r}^{(3)}$ han sido definidos más arriba.

En forma expandida se tendría

$$\begin{bmatrix} x^{(0)} \\ y^{(0)} \\ z^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} x^{(3)} \\ y^{(3)} \\ z^{(3)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Si se desea obtener $r^{(3)}$ a partir de $r^{(0)}$ se tiene, evidentemente

$$\mathbf{r}^{(3)} = \mathbf{T}_{03}^{-1} \cdot \mathbf{r}^{(0)} = \mathbf{T}_{23}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{12}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{01}^{-1} \cdot \mathbf{r}^{(0)} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{r}^{(3)} = \mathbf{T}_{30} \cdot \mathbf{r}^{(0)} = \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{21} \cdot \mathbf{T}_{10} \cdot \mathbf{r}^{(0)} \quad (2.12)$$

Estas relaciones pueden ser generalizadas en la forma obvia.

2.4. Transformaciones de coordenadas rotulares

En el caso del manipulador mismo, para ir desde la base hacia la mano, o viceversa, se ha de ir multiplicando las matrices de transformación homogéneas, o sus inversas, de rótula en rótula. Pero antes se ha de definir en forma metódica y apropiada los sistemas de coordenadas rotulares, para lo cual hay varios métodos, siendo la notación Denavit-Hartenberg la más usada. En esta convención se asigna a cada rótula un sistema de coordenadas tal que para hacer coincidir los sistemas k y $k + 1$ se requiera una sucesión definida de a lo más dos rotaciones y dos traslaciones. Estas, a su vez, se especifican en base a dos parámetros de seg.