

Modelo cinemático y análisis postural de la extremidad superior

*Upper limb kinematics model and postural analysis
Modèle cinématique et analyse posturale de l'extrémité supérieure*

Redactor:

Alfredo Álvarez Valdivia
Ingeniero industrial

CENTRO NACIONAL DE
CONDICIONES DE TRABAJO

Se presenta un modelo analítico para la extremidad superior y se muestra cómo puede aplicarse al diseño de los puestos de trabajo junto con el uso de herramientas de evaluación postural.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de evaluación de la carga postural más conocidos, como por ejemplo el método RULA, el método REBA, etc. se basan en la observación y clasificación de las posturas de los segmentos corporales realizadas por una persona especialmente entrenada en el uso de dichas herramientas. Parte de dicho entrenamiento se centra en el reconocimiento visual de los ángulos corporales para su posterior clasificación en categorías.

Por ejemplo, en el método RULA la flexión del codo se divide en tres intervalos en función del ángulo: 0° - 60° , 60° - 100° y $>100^{\circ}$. Siguiendo con el ejemplo, si bien es altamente probable que un observador clasifique un ángulo de 20° en el intervalo 0° - 60° , no se puede decir lo mismo de aquellos ángulos que constituyen los límites de los intervalos. Es decir, la observación de un ángulo de flexión del codo de 50° puede resultar en una clasificación correspondiente al intervalo 60° - 100° , ya que visualmente es muy difícil percibir la diferencia entre un ángulo de 50° y otro de 60° . Estas imprecisiones asociadas a la observación pueden dar como resultado evaluaciones posturales que no se ajustan a la situación real.

Con la finalidad de subsanar la inexactitud de estos procesos de observación, se han desarrollado técnicas y procedimientos como por ejemplo la medición de ángulos mediante la utilización de goniómetros, el uso de sistemas de grabación en tres dimensiones, etc.

La alternativa que se expone en este documento hace uso de la cinemática inversa para obtener los ángulos corporales partiendo de la postura adoptada. De esta forma se elimina el sesgo asociado a la observación. El desarrollo de un modelo cinemático da como resultado una expresión analítica que permite el cálculo de la posición final del brazo (cinemática directa) y el cálculo de los ángulos corporales (cinemática inversa).

Las ventajas de usar un modelo cinemático, además de la precisión en la determinación de los ángulos ante-

riormente mencionada, radica en que es posible ajustar el cálculo (de ángulos y coordenadas) a cada caso particular. Es decir, el modelo cinemático depende, entre otras variables, de las dimensiones antropométricas y por eso se puede adaptar fácilmente a las características físicas de cada trabajador. Así mismo, al tratarse de un modelo analítico, es posible hacer los cálculos y simulaciones necesarias para encontrar la configuración adecuada del puesto de trabajo para las posturas y tareas estudiadas.

2. MODELO CINEMÁTICO

Se utiliza un modelo de cuatro grados de libertad siguiendo las directrices desarrolladas por Denavit y Hartenberg para relacionar la posición de la mano con el hombro teniendo en cuenta los ángulos del hombro y del codo así como las longitudes del brazo y del antebrazo (figura 1).

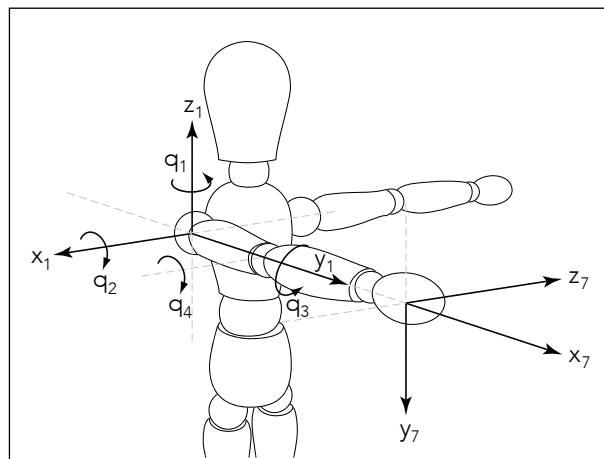


Figura 1. Ejes de coordenadas de hombro y mano para un modelo de Denavit Hartenberg de 4 grados de libertad.

Cinemática directa

Se habla de cinemática directa cuando se parte de unos valores dados de ángulos y longitudes corporales para obtener las coordenadas de la mano expresadas en el eje de referencia situado en el hombro. La expresión matemática correspondiente se muestra en el cuadro 1.

Las variables L_1 y L_2 corresponden a la longitud del brazo y del antebrazo respectivamente. Los cuatro grados de libertad del modelo son los que se muestran en la tabla 1. Dicha tabla también recoge el sentido positivo de cada uno de ellos que, además, se indica con una flecha en la figura 1.

Variable	Articulación	Movimiento	Sentido positivo
q_1	Hombro	Abducción/ aducción	Abducción
q_2	Hombro	Flexión/ extensión	Extensión
q_3	Hombro	Rotación	Sentido horario
q_4	Codo	Flexión/ extensión	Extensión

Tabla 1. Grados de libertad del modelo.

Es decir, partiendo de unos valores de L_1 , L_2 , q_1 , q_2 , q_3 y q_4 , la ecuación de la cinemática directa devuelve las coordenadas de la mano expresadas en el eje de coordenadas del hombro.

Cinemática inversa

Mediante la cinemática inversa se obtienen los valores de ángulos corporales para una determinada posición dada de la mano. Si la mano tiene por coordenadas, p_x^1 , p_y^1 y p_z^1 , los ángulos corporales pueden calcularse analíticamente en función del ángulo q_3 (ver el cuadro 2).

3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Se presentan dos ejemplos que muestran la utilidad de la cinemática directa e inversa en el análisis postural y en el rediseño de puestos de trabajo.

Ejemplo 1

Sea una cadena de montaje industrial en la que uno de los puestos de trabajo consiste en atornillar dos piezas metálicas. Para ello, se utiliza un destornillador eléctrico situado en el punto $p^1 = (0, 540, -340)$ —dimensiones en milímetros— según el sistema de coordenadas del hombro representado en la figura 1. Las longitudes del brazo (L_1) y del antebrazo (L_2) son 356 mm y 448 mm respectivamente. Es decir, el destornillador se encuentra delante del hombro derecho del trabajador a una distancia ligeramente superior al antebrazo.

Para valorar esta postura del brazo mediante un método de análisis postural, como por ejemplo el método RULA, es necesario conocer los ángulos corporales tanto del hombro como del codo. Mediante el uso de la cinemática inversa se pueden obtener estos ángulos a través de las expresiones desarrolladas anteriormente.

El ángulo q_4 corresponde a la flexión/extensión del codo. Dicho ángulo toma un valor negativo (según el sentido establecido en la figura 1) porque el codo está flexionado (ver el cuadro 3).

El mismo procedimiento se sigue para obtener el ángulo q_2 . Tanto este ángulo como el ángulo q_1 están parametrizados en función de q_3 . Por ello se debe fijar un valor de q_3 ; en este caso se toma $q_3=0$ rad ya que corresponde a la postura neutra de referencia. Sustituyendo en la expresión de q_2 se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{sen } q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4) + \cos q_2 \cos q_3 L_2 \text{sen } q_4 + p_z^1 &= 0 \\ \text{sen } q_2 (356 + 448 \cdot 0.25) + \cos q_2 \cos 0 \cdot 448 \text{sen}(-1.318) - 340 &= 0 \\ 468 \text{sen } q_2 - 433.76 \cos q_2 - 340 &= 0 \\ q_2 &= 1.309 \text{ rad} = 75^\circ \end{aligned}$$

Finalmente, el ángulo q_1 se obtiene tomando $q_3 = 0$ rad (ver el cuadro 4).

$$\mathbf{o}_7^1 = \begin{pmatrix} (\text{sen } q_1 \text{sen } q_2 \cos q_3 - \cos q_1 \text{sen } q_3) L_2 \text{sen } q_4 - \text{sen } q_1 \cos q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4) \\ -(\cos q_1 \text{sen } q_2 \cos q_3 + \text{sen } q_1 \text{sen } q_3) L_2 \text{sen } q_4 + \cos q_1 \cos q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4) \\ -\cos q_2 \cos q_3 L_2 \text{sen } q_4 - \text{sen } q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4) \end{pmatrix}$$

Cuadro 1.

$$\begin{aligned} \cos q_4 &= \frac{(p_x^1)^2 + (p_y^1)^2 + (p_z^1)^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1L_2} \\ \text{sen } q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4) + \cos q_2 \cos q_3 L_2 \text{sen } q_4 + p_z^1 &= 0 \\ \text{sen } q_1 (\text{sen } q_2 \cos q_3 L_2 \text{sen } q_4 - \cos q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4)) - \cos q_1 (\text{sen } q_3 L_2 \text{sen } q_4) - p_x^1 &= 0 \end{aligned}$$

Cuadro 2.

$$\begin{aligned} \cos q_4 &= \frac{(p_x^1)^2 + (p_y^1)^2 + (p_z^1)^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1L_2} = \frac{0^2 + 540^2 + (-340)^2 - (356^2 + 448^2)}{2 \cdot 356 \cdot 448} = 0.25 \\ q_4 &= \arccos 0.25 = -1.318 \text{ rad} = -75.5^\circ \end{aligned}$$

Cuadro 3.

$$\begin{aligned} \text{sen } q_1 (\text{sen } q_2 \cos q_3 L_2 \text{sen } q_4 - \cos q_2 (L_1 + L_2 \cos q_4)) - \cos q_1 (\text{sen } q_3 L_2 \text{sen } q_4) - p_x^1 &= 0 \\ \text{sen } q_1 (\text{sen } 1.309 \cos 0 \ 448 \text{sen}(-1.318) - \cos 1.309 (356 + 448 \ 0.25)) - \cos q_1 (\text{sen } 0 \ 448 \text{sen}(-1.318)) - 0 &= 0 \\ 540.107 \text{sen } q_1 - 0 &= 0 \\ q_1 &= 0 \text{ rad} \end{aligned}$$

Cuadro 4.

Seguidamente se puede aplicar el método RULA para valorar únicamente la postura del brazo. Como la flexión del brazo es menor que 20° , se añade la puntuación +1. Lo mismo sucede con la flexión del codo: al ser superior a 60° también se añade +1. Por el contrario, como no hay abducción del brazo no se añade ninguna penalización. De esta forma, tal y como muestra la tabla 2, la puntuación total para esta postura es +2.

Movimiento	Valor	Puntuación RULA
Flexión/ extensión del brazo	$\arctan \frac{\cos q_1 \cos q_2}{\text{sen } q_2} = 15.1^\circ$	+1
Abducción del brazo	$ q_1 = 0^\circ$	0
Flexión del codo	$ q_4 = 75.2^\circ$	+1
Puntuación total		+2

Tabla 2. Puntuación RULA para el ejemplo 1.

Ejemplo 2

Sea un puesto de conducción de un tren que exige al conductor pulsar un botón (a modo de pedal de hombre muerto) de forma periódica. Dicho botón está situado en las coordenadas (en milímetros) $p^2 = (390, 680, -120)$. El botón está situado ligeramente hacia la derecha (el valor de la coordenada x es 390 mm) y a una distancia horizontal cercana al máximo alcance. Intuitivamente, esta postura tiene asociada una mayor carga que la del ejemplo anterior ya que, ahora, el brazo está mucho más extendido.

Para obtener la solución de los ángulos q_4 , q_2 y q_1 , se sigue el mismo procedimiento que en el ejemplo anterior. De igual forma, se toma $q_3 = 0$ rad ya que este valor es el que corresponde a la postura neutra de referencia. Los valores obtenidos son: $q_4 = -0.30$ rad (-17.2°), $q_2 = 0.32$ rad (18.3°) y $q_1 = -0.52$ rad (-29.8°). Al aplicar el método RULA se obtiene una puntuación para el brazo de +6 (tabla 3).

Movimiento	Valor	Puntuación RULA
Flexión/ extensión del brazo	$\arctan \frac{\cos q_1 \cos q_2}{\text{sen } q_2} = 69^\circ$	+3
Abducción del brazo	$ q_1 = 29.8^\circ$	+1
Flexión del codo	$ q_4 = 17.2^\circ$	+2
Puntuación total		+6

Tabla 3. Puntuación RULA para el ejemplo 2.

Rediseño del puesto de trabajo

Se observa que el análisis postural del segundo ejemplo da como resultado una carga en la extremidad superior mucho mayor que en el primer ejemplo. Con la idea de reducir dicha carga, se plantea la posibilidad de cambiar la ubicación del botón del puesto de conducción de tren para, de esta forma, reducir la carga postural del brazo.

Debido a que la flexión/extensión del brazo es el movimiento que tiene una mayor puntuación, +3, una disminución de dicho movimiento comportará una mayor reducción de la puntuación total. Para ello, la flexión del brazo no deberá sobrepasar los 20° y a tal fin se fijan los siguientes valores de ángulos: $q_1 = -40^\circ$, $q_2 = 65^\circ$, $q_3 = 0^\circ$ y $q_4 = -65^\circ$. Un nuevo análisis aplicando el método RULA muestra que, con esta configuración, la carga postural asociada queda reducida a +3 (tabla 4).

Movimiento	Valor	Puntuación RULA
Flexión/ extensión del brazo	$\arctan \frac{\cos q_1 \cos q_2}{\text{sen } q_2} = 19.7^\circ$	+1
Abducción del brazo	$ q_1 = 40^\circ$	+1
Flexión del codo	$ q_4 = 65^\circ$	+1
Puntuación total		+3

Tabla 4. Puntuación RULA para el ejemplo 2 después de la reubicación del botón.

Para calcular la nueva posición del botón con este conjunto de ángulos corporales, se utiliza la cinemática directa. Tomando el vector O_7^1 e introduciendo los valores angulares se obtienen las coordenadas cartesianas (en relación al hombro) correspondientes a la nueva ubicación del botón:

$$O_7^1 \Big|_{q_1=-40^\circ, q_2=65^\circ, q_3=0^\circ, q_4=-65^\circ} \rightarrow \begin{cases} p_x = 383.9 \\ p_y = 457.6 \\ p_z = -321.6 \end{cases}$$

Con respecto a la posición original del botón en el punto $p^2 = p_0 = (390, 680, -120)$, se observa (figura 2) que ahora dicho botón se halla situado más cerca del hombro y más abajo para, de esta forma, evitar la antigua posición de brazo extendido que tenía asociada una mayor carga postural.

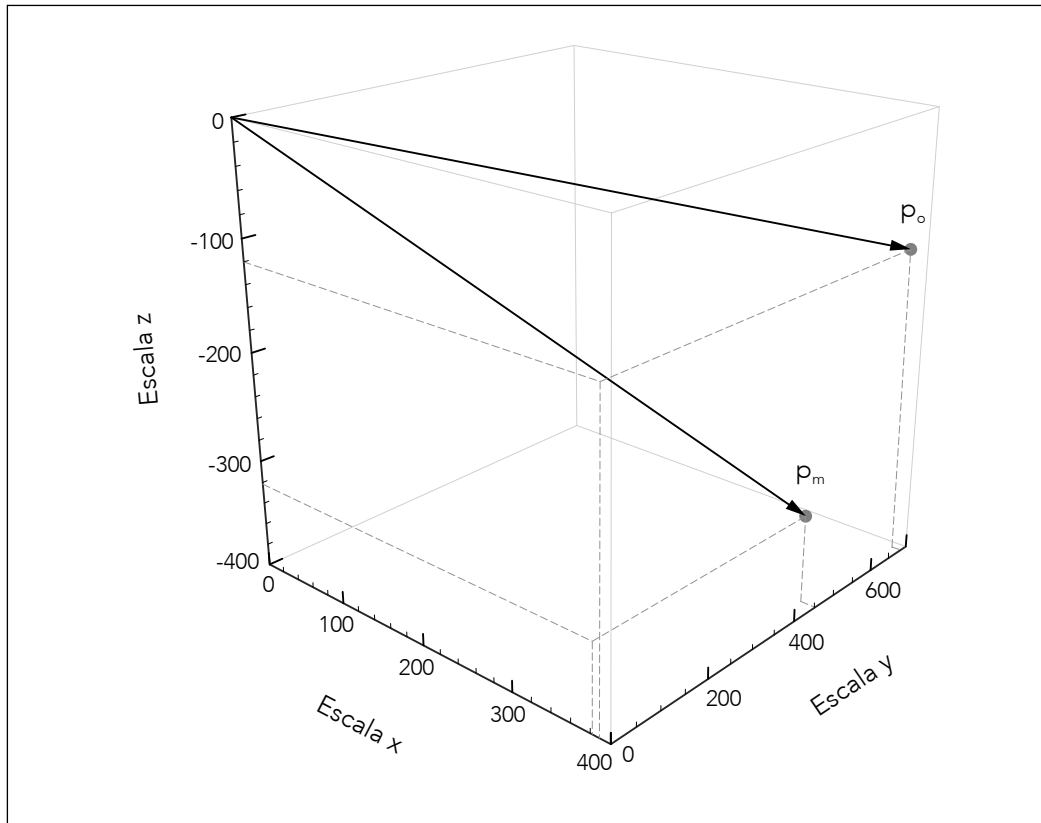


Figura 2. Posición original del botón p_o y posición modificada p_m .

BIBLIOGRAFÍA

CARMONA, A., 2001.

Datos antropométricos de la población laboral española.

Prevención Trabajo y Salud 14, 22-35.

DALMAU, I. Y NOGAREDA, S., 1997.

NTP 452: Evaluación de las condiciones de trabajo: carga postural.

INSHT.

ÁLVAREZ, A. Y NOGAREDA, S., 2003.

NTP 622: Carga postural: técnica goniométrica.

INSHT.

SCIAVICCO, L. Y SICILIANO, B., 2005.

Modelling and control of robot manipulators. 2nd ed.

London: Springer-Verlag.