

Movimiento del brazo humano: de los tres planos a las tres dimensiones*

Carlos F. Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los
Andes, Bogotá D.C.

Hugo Quintero

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los
Andes, Bogotá D.C.

Helena Aschner

Médico Ortopedista, Especialista en Cirugía de la Mano

Recibido 9 de septiembre de 2005, aprobado 31 de octubre de 2005.

**PALABRAS CLAVE: Movimiento del brazo, medición
de movimiento humano cinemática tridimensional.**

**KEYWORDS: Arm motion, human arm motion mea-
surement, three-dimensional, kinematics.**

RESUMEN La representación clásica de movimiento de la extremidad superior es muy adecuada para describir movimientos individuales que se realizan en planos, pero presenta algunas incoherencias cuando se intentan describir movimientos tridimensionales relativamente complejos. En este trabajo se propone una modificación de la representación de movimientos del brazo humano, especialmente útil para el reporte de resultados de laboratorios de análisis computarizado de movimiento. La representación propuesta tiene dos ventajas: es robusta en el sentido de unicidad y permite describir movimientos tridimensionales a través de gráficas de uso común para los profesionales de la salud.

ABSTRACT The classic upper limb motion representation is appropriate for describe individual motions performed in planes, but it has incoherencies when it's used for description of three-dimensional complex movements. In this work a modification for the motion representation of the upper limb is presented. This representation is especially useful for the report of results in computerized motion analysis laboratories. The proposed representation has two advantages: it is robust in the sense of unicity and it allows description of three-dimensional motion graphically in a familiar way for health professionals.

1. INTRODUCCIÓN

El movimiento del cuerpo humano, evidentemente, se realiza en tres dimensiones: cada segmento del cuerpo va asumiendo posiciones y orientaciones en el espacio a medida que se realiza el movimiento. Sin embargo, la comprensión del movimiento es más simple si se realiza en dos dimensiones, proyectando el movimiento en un plano adecuado.

Para poder describir la posición espacial de los segmentos del cuerpo humano se ha utilizado tradicionalmente un sistema de coordenadas cartesiano con origen en el centro de gravedad del cuerpo. Con frecuencia, los movimientos se nombran con respecto a los planos frontal, sagital y coronal (Villalba, 2003). Esta representación es muy adecuada para describir movimientos, como el de la marcha humana, que están prácticamente confinados a un plano. Sin embargo, no es suficiente y presenta inconsistencias cuando se intentan describir movimientos tridimensionales relativamente complejos.

En el caso particular de las extremidades superiores, la referencia de movimientos se define con respecto a una posición arbitraria, denominada posición anatómica, que corresponde a tener el brazo al costado del tórax con la palma de la mano hacia el frente.

A partir de esta posición se identifican los movimientos de la cadena formada por los segmentos de la extremidad superior (Rau y Schmidt, 2000).

En este trabajo se identifican algunos inconvenientes de esta representación de movimientos de la extremidad superior y se propone una modificación tanto en la posición de referencia (posición cero), como en la convención del movimiento. La descripción propuesta permite representar los movimientos tridimensionales de la extremidad superior de forma unívoca y sencilla.

Inicialmente se plantea un modelo biomecánico de la extremidad superior como una cadena de cuerpos rígidos. Sobre este modelo, se exponen los inconvenientes de la representación convencional y se propone la nueva representación. Finalmente, se ilustran algunos ejemplos de reportes gráficos de experimentos, que explican unívocamente el movimiento de la extremidad superior

nientes de la representación convencional y se propone la nueva representación. Finalmente, se ilustran algunos ejemplos de reportes gráficos de experimentos, que explican unívocamente el movimiento de la extremidad superior

2. MODELO DEL BRAZO HUMANO

El modelo biomecánico de la extremidad superior (Fig. 1) se define como una cadena abierta de 5 segmentos rígidos, conectados entre sí por 4 uniones articulares simples.



Fig. 1. Modelo del brazo humano

Los segmentos que componen el modelo serán tratados como cuerpos rígidos y se definen en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de segmentos del modelo del brazo humano.

SEGMENTO	DEFINICIÓN
Tórax	Origen del sistema articulado (Tierra).
Clavícula	Desde la articulación esterno-clavicular hasta la acromio-clavicular.
Húmero	Desde la articulación gleno-humeral hasta la articulación de codo.
Antebrazo	Desde el codo hasta la muñeca.
Mano	A partir de la muñeca.

Estos segmentos se unen por medio de cuatro articulaciones que proveen un total de nueve grados de libertad. Las articulaciones que se han incluido en el modelo son: la articulación esterno-clavicular

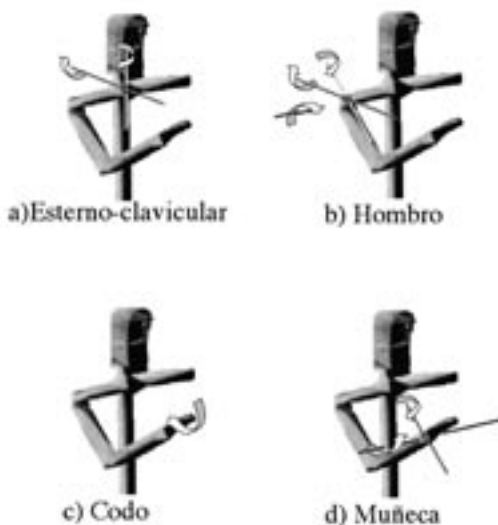
* Trabajo financiado por COLCIENCIAS. Contrato 142-2002. Proyecto “Desarrollo de una Herramienta de Análisis Cuantitativo de Movimiento en Extremidades Superiores”

lar (Fig. 2a) que permite 2 grados de libertad; el hombro (Fig. 2b) que permite 3 grados de libertad y funcionalmente es la unión de las articulaciones acromio-clavicular y gleno-humeral; el codo (Fig. 2c); y la muñeca (Fig. 2d) que permiten cada una 2 grados de libertad.

El modelo propuesto tiene algunas simplificaciones importantes con respecto a la fisiología de la extremidad superior. Las tres principales son las siguientes:

- Cada articulación se define a través de un centro articular, que es un punto que se considera fijo a los dos cuerpos adyacentes. La articulación del hombro, especialmente, se considera como una unión esférica simple, que mantiene la funcionalidad de los movimientos del hombro pero no su configuración real.
- El antebrazo se considera como un cuerpo rígido, lo cual hace que los movimientos de pronación y supinación se deban considerar alrededor del codo.
- La mano se modela como un cuerpo rígido.

Fig. 2. Articulaciones consideradas en el modelo

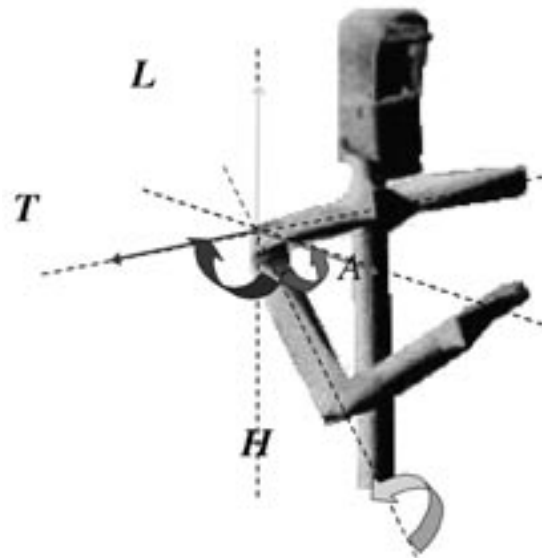


Por otra parte, una novedad de este modelo respecto a otros propuestos en la literatura es la inclusión del

movimiento de la clavícula como parte de la extremidad superior; lo cual enriquece la representación de movimientos, como se muestra posteriormente.

3. DEFINICIÓN TRADICIONAL DE LOS MOVIMIENTOS DEL HOMBRO

Fig. 3. Movimiento del hombro y ejes relacionados



En la figura 3 se muestran los ejes principales que se definen para describir el movimiento del hombro: un eje transverso (T) que va desde un hombro hasta el otro; un eje antero-posterior (A) que va de atrás hacia delante a través del hombro; y un eje longitudinal (L) que atraviesa el hombro verticalmente y es perpendicular a los dos anteriores. Adicionalmente, se define un eje longitudinal del miembro (H) fijo al húmero.

Con base en estos ejes se definen los siguientes planos de referencia:

- El plano de flexión - extensión, el cual contiene el eje antero-posterior y el eje longitudinal, y es normal al eje transversal.
- El plano de abducción - aducción, el cual contiene los ejes transversal y longitudinal, y es normal al eje antero-posterior.

- El plano neutro, el cual contiene los ejes transverso y antero-posterior, y es normal al eje longitudinal.

Teniendo estas definiciones de ejes y planos, los movimientos del hombro se definen como:

Flexión: Este movimiento tiene lugar alrededor del eje transverso y es una descripción del movimiento que ocurre cuando se eleva el brazo hacia adelante. En el caso del hombro, se cuantifica mediante el valor del ángulo que se crea entre el brazo y el eje longitudinal en el plano de Flexión – Extensión. En la posición anatómica la flexión del hombro es nula.

Extensión: Movimiento opuesto a la flexión, también tiene lugar alrededor del eje transverso. Se describe como el movimiento que acerca el brazo hacia el cuerpo si el brazo está en flexión.

Abducción y Aducción: Estos movimientos tienen lugar alrededor del eje antero-posterior y ocurren cuando el brazo se aleja del cuerpo (abducción) y cuando se acerca nuevamente (aducción). Para el hombro, estos movimientos se cuantifican mediante el valor del ángulo creado entre el brazo y el eje longitudinal en el plano de Abducción – Aducción.

Rotación de Hombro: Este movimiento tiene lugar alrededor del eje longitudinal del miembro. Se define como la rotación del miembro sobre su propio eje.

Esta descripción de los movimientos del brazo es ampliamente utilizada por fisioterapeutas y médicos, y

resulta especialmente útil para describir movimientos sencillos del tipo arcos de movimiento del brazo (Rodríguez, Quintero y Botero, 2003). Sin embargo, estas definiciones no son lo suficientemente claras y precisas para definir movimientos complejos, entendidos como movimientos compuestos que ocurren en el espacio tridimensional.

Para ilustrar este punto en la figura 4 se muestra una secuencia correspondiente a tres movimientos simples ejecutados sucesivamente: un giro de 90° respecto al eje trasverso, un giro de -90° respecto al eje longitudinal y un giro de 90° respecto al eje antero-posterior.

Observando la secuencia, en ningún momento se hace una rotación de hombro; sin embargo, cuando el brazo regresa a la posición inicial se vuelve con el hombro rotado -90° . Esto se debe a que durante la segunda parte del movimiento (abducción) el hombro rota para poder mantener la posición vertical del antebrazo. Esta rotación no es percibida mediante la aplicación de la definición de movimientos tradicional.

Por otra parte, si en la secuencia de la figura 4 se considera la imagen marcada, el movimiento en las

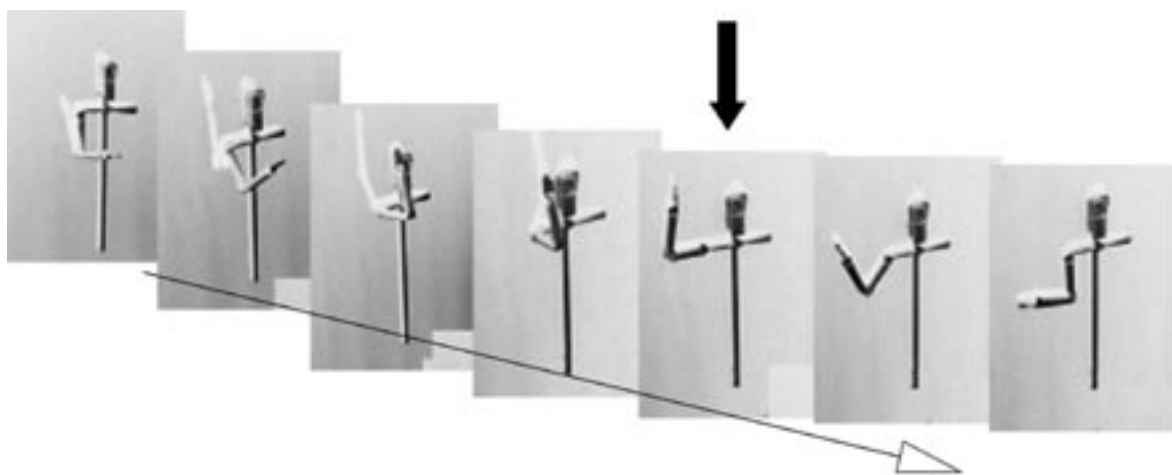


Fig. 4. Movimiento del brazo en el espacio

dos imágenes posteriores es una aducción de 90° del hombro de acuerdo con la representación tradicional. Sin embargo, el movimiento partiendo de la misma marca, dos imágenes atrás, a pesar ser una rotación simple, genera ambigüedad en la representación tradicional. De hecho podría sumirse también como una aducción de 90° .

Este ejemplo evidencia la necesidad de una nueva definición que sea precisa y robusta desde el punto de vista de la unicidad, para la descripción de movimientos del brazo en el espacio.

4. PROPUESTA DE DEFINICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR

Tradicionalmente, se consideran cinco movimientos necesarios para describir el movimiento de las extremidades superiores: las tres rotaciones del hombro, la flexión-extensión del codo y la prono-supinación del antebrazo. Adicionalmente, se consideran dos rotaciones de la muñeca con respecto al antebrazo (flexión-extensión y desviación radio-cubital). Los movimientos se definen de forma independiente utilizando planos y ejes de referencia del cuerpo. En esta definición usualmente no se incluyen los movimientos de la clavícula (Rau y Schmidt, 2000).

A continuación se presenta una nueva propuesta de definición de los movimientos de la extremidad superior (Ran, Petuskey y Bagley, 2002). Para medir los movimientos de un segmento respecto al anterior, se define un sistema de coordenadas local sobre cada segmento compuesto por tres vectores unitarios mutuamente perpendiculares.

Como referencia global, se define un sistema de coordenadas fijo en el tórax (t_1, t_2, t_3) tal como se ilustra en la Figura 5. El vector t_2 indica la dirección antero-posterior al tórax, el vector t_3 indica la dirección longitudinal y el vector t_1 completa el sistema de tal forma que el sistema sea dextrógiro ($t_1 = t_2 \times t_3$).

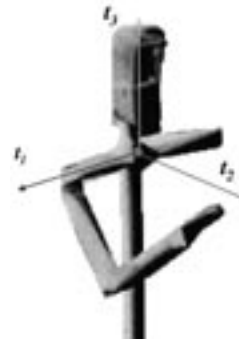
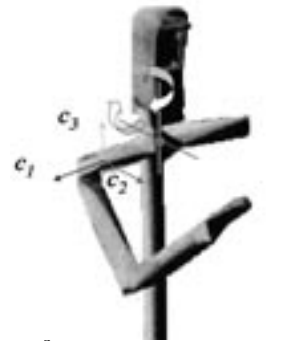


Fig. 5. Sistema de coordenadas global

4.1 MOVIMIENTOS DE LA CLAVÍCULA

Para describir el comportamiento de la clavícula se define un sistema de coordenadas local (c_1, c_2, c_3) de la siguiente forma (Fig. 6): el vector c_1 va en dirección de la línea que une la articulación esternoclavicular con la articulación acromio-clavicular.



Los otros dos vectores tienen menor influencia en las definiciones de movimiento, sólo tienen la restricción de ser perpendiculares a c_1 y completar la terna para que sea dextrógiro. En este caso, el vector c_2 puede definirse en la dirección antero-posterior del segmento y el vector $c_3 = c_1 \times c_2$; de tal forma que c_2 coincide con t_2 y c_3 coincide con t_3 , en la posición de reposo de la clavícula (posición cero).

Una vez definido este sistema de coordenadas se definen dos movimientos de la clavícula respecto al tórax: Elevación de clavícula: es el ángulo entre el vector c_1 y el plano formado por t_1 y t_2 .

Inclinación de clavícula: se define la inclinación como el ángulo entre el vector c_1 y el plano formado por t_1 y t_3 .

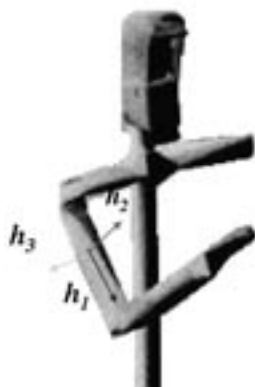
La posición cero de la clavícula se define cuando el brazo descansa sin ningún tipo de esfuerzo (c_1 coincide con t_1).

4.2 MOVIMIENTOS DEL HÚMERO

El sistema de coordenadas fijo al húmero (b_1, b_2, b_3) se define de forma similar que el del segmento anterior (Fig. 7): el vector b_1 coincide con la dirección longitudinal del húmero, es decir la dirección de la línea que une el hombro (articulación gleno-humeral) con el codo.

Los otros dos vectores son perpendiculares a b_1 y completan una terna dextrógira: el vector b_2 se define en la dirección antero-posterior del segmento y el vector $b_3 = b_1 \times b_2$.

Para asimilar lo más posible la definición propuesta con la definición de movimientos del hombro expuesta en el numeral 3, los movimientos del húmero se definen con respecto al tórax y se nombran como los movimientos del hombro. Su definición será:



Flexión de hombro: se calcula con base en el ángulo formado por el vector b_1 y vector t_2 . Su valor es 90° menos dicho ángulo.

Abducción de hombro: se calcula con base en el án-

gulo formado por el vector b_1 y el vector t_1 . Su valor es 90° menos este ángulo.

Rotación de hombro: se define como el movimiento angular del húmero sobre su propio eje longitudinal (alrededor del vector b_1). Para medir este ángulo es necesario alinear antes el húmero, de tal forma que el vector b_1 sea anti-paralelo con el vector t_3 ; de esta forma, el ángulo de rotación será el formado por los vectores b_2 y t_2 .

La posición cero del húmero se define cuando el brazo descansa sin ningún esfuerzo: el húmero está unido al tórax sin rotación sobre su eje longitudinal y el vector b_1 está alineado con el vector t_3 .

4.3 MOVIMIENTOS DEL ANTEBRAZO

A diferencia de los segmentos anteriores los movimientos del antebrazo se definen con respecto al segmento anterior (el húmero) y no directamente respecto al sistema de coordenadas global. Se define un sistema de coordenadas fijo al antebrazo (f_1, f_2, f_3) de la siguiente forma: (Fig. 8): el vector f_1 coincide con la dirección longitudinal del antebrazo, es decir la dirección de la línea que une el codo con el centro de la muñeca. El vector f_3 es perpendicular al anterior y es paralelo al vector que va desde prominencia ósea del cúbito en la muñeca a la prominencia ósea del radio en la muñeca. El vector f_2 completa la terna de forma que sea dextrógira.



Fig. 8. Sistema local al antebrazo

Así como en el caso del húmero, la definición propuesta de movimientos del antebrazo hace referencia

la definición tradicional de movimientos para facilitar su comprensión.

Flexión de codo: es el ángulo formado por el vector f_1 y el vector b_1 más 90° (de acuerdo con la definición de posición cero del antebrazo).

Pronación-Supinación: este movimiento ocurre cuando la línea que une las prominencias óseas de la muñeca gira sobre el eje del antebrazo. En el modelo considerado, esto correspondería con una rotación del antebrazo sobre su eje longitudinal (realmente imposible). Para medir este ángulo es necesario antes alinear el antebrazo de tal forma que el vector f_1 sea paralelo con el vector b_1 , de esta forma el ángulo de pronación-supinación será el formado por los vectores f_3 y b_2 .

La posición cero del antebrazo se define respecto al húmero haciendo que el vector f_1 sea paralelo al vector b_1 y que el ángulo de pronación-supinación sea nulo.

4.4 MOVIMIENTOS DE LA MANO

m_1

Finalmente se define un sistema de coordenadas fijo en la mano (m_1, m_2, m_3) para describir su movimiento con respecto al antebrazo (Fig. 9). En el modelo propuesto la mano es un solo cuerpo rígido y si perder generalidad podría considerarse abierta, de tal forma que la definición de los vectores que definen el sistema de coordenadas es la siguiente: el vector m_1 va sobre la palma de la mano en dirección longitudinal de los dedos, el vector m_2 es perpendicular a la palma de la mano y el vector $m_3 = m_1 \times m_2$

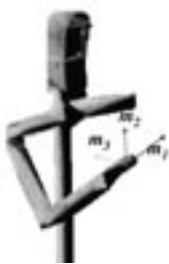


FIG. 9. SISTEMA LOCAL A LA MANO

Así como en casos anteriores la definición propuesta hace referencia la definición tradicional de movimientos para facilitar su comprensión.

Flexión de muñeca: es el ángulo formado por el vector m_1 y el plano que contiene a los vectores f_1 y f_3 .

Desviación radio-cubital: es el ángulo formado por el vector m_1 y el plano que contiene a los vectores f_1 y f_3 .

Se define la posición cero de la mano de tal forma que el vector m_1 sea paralelo al vector f_1 y el vector m_2 sea paralelo al vector f_2 .

3 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO

A manera de ejemplo, se diseñó un experimento de movimiento típico del brazo que consiste en manipular un objeto ubicado en una mesa (una colombina). El sujeto deberá llevar este objeto desde la mesa hacia la boca y luego regresarlo a la posición inicial. El movimiento se grabó y analizó en el Laboratorio de Análisis de Movimiento del Instituto de Ortopedia infantil Roosevelt siguiendo el protocolo descrito en el *Protocolo de análisis de movimiento en los brazos para diagnóstico clínico* (Villalba, 2003).

La figura 10 ilustra un conjunto de gráficas resultado organizadas de la siguiente forma:

Primer Renglón, Clavícula:

- Gráfica 1: Elevación(+) – Descenso (-).
- Gráfica 2: Rotación, Adelante(+) – Atrás(-).

Segundo Renglón, Hombro:

- Gráfica 1: Flexión(+)- Extensión(-).
- Gráfica 2: Abducción(+) – Aducción(-).
- Gráfica 3: Rotación Externa(+) – Interna(-).

Tercer Renglón, Codo:

- Gráfica 1: Flexión(+) – Extensión(-).
- Gráfica 2: Pronación(+) – Supinación (-) (Antebrazo).

Cuarto Renglón, Muñeca:

- Gráfica 1: Flexión(+) – Extensión(-).
- Gráfica 2: Desviación Radial(+) – Cubital(-).

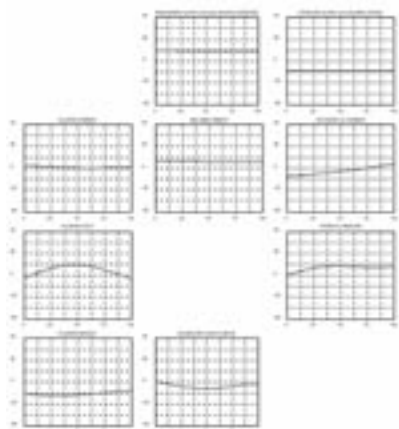


Fig. 10. Gráficas resultado del experimento

Las gráficas anteriores tienen en su eje horizontal el porcentaje de movimiento; es decir, inicio (0 %) a fin (100%) del movimiento medido y en el eje vertical se presenta el ángulo en grados.

En este reporte se pueden observar varios elementos. En primer lugar, la flexión del codo es la variable que exhibe un rango de movimiento más amplio: comienza casi en una posición neutra, progresivamente va hacia flexión cuando lleva el objeto hacia la boca y regresa a una posición ligeramente más extendida que la que tenía al empezar el movimiento.

En la gráfica de rotación de hombro se puede observar que comienza ligeramente en rotación interna y durante el movimiento va evolucionando hasta configurarse en una leve rotación externa. Las gráficas de flexión y abducción del hombro muestran una posición constante, lo cual indica que el sujeto tomó el objeto cuando este se encontraba cerca del plano medio del cuerpo y durante el movimiento lo alejó progresivamente. Esto es coherente con la gráfica de pronosupinación que muestra que toma el objeto en neutro y avanza hacia supinación, se puede observar que, para mantener el objeto en posición vertical, la rotación del hombro hacia externo debe ser compensada con pronación y si la rotación del hombro es interna la compensación se hace mediante supinación.

En el reporte la desviación radio cubital se muestra que a medida que el codo es flexionado la muñeca se gira hacia el cúbito y viceversa; esto se debe una vez más a que se intenta mantener la posición vertical del objeto durante el movimiento.

Por último en las gráficas también se puede ver que el paciente no tuvo el objeto un largo periodo en la boca, de lo contrario las gráficas, especialmente la de flexión de codo mostrarían una meseta.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una propuesta de representación de movimiento de la extremidad superior. La representación propuesta facilita especialmente la interpretación gráfica de los movimientos tridimensionales de la extremidad superior.

Utilizando un modelo biomecánico sencillo se han ilustrado las deficiencias que tiene la representación tradicional de movimiento de la extremidad superior.

Se ha mostrado la bondad de la representación propuesta para el análisis de movimiento de extremidades superiores, pues permite describir de forma robusta y unívoca el movimiento realizado por el sujeto.

La representación se ha incluido dentro de una herramienta para análisis cuantitativo de movimiento de extremidades superiores (Schmidt, Disselhorst, Sinly y Rau, 2003), que se ha implantado como método diagnóstico en el Laboratorio de Análisis de Movimiento del Instituto de Ortopedia Infantil Roosevelt.

5 BIBLIOGRAFÍA

Baruh H. 1999.

Analytical Dynamics.

WCB Mc Graw Hill.

Nigg B., Herzog W. 1998.

Biomechanics of the Musculo-skeletal System.

Second Edition, Wiley.

Quintero H. 2003.

Cálculo de fuerzas producidas durante el movimiento de una extremidad humana.

Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Rab G., Petuskey, K., Bagley A., 2002.

“Determination of kinematics of the upper extremity”.

Gait and Posture, Volume 15, Number 2, pp. 113-119(7)

Rau G., Disselhorst-Klug R., Schmidt R.. 2000.

“Movement biomechanics goes upwards: from the leg to the arm”.

Journal of Biomechanics, 33(10), pp.1207 – 1216.

Rodríguez C.F., Quintero H., Botero J.C. 2003.

Herramienta cuantitativa para evaluación de la funcionalidad del brazo.

I Jornadas CYTED sobre Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, Natal, Brasil.

Schmidt R., Disselhorst-Klung C., Silny J., Rau G.,

1999.

“A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions”.

Journal of Biomechanics, 32:6 , pp. 615-621.

Tozeren A. 2000.

Human body mechanics: Classical mechanics and human movement.

Springer-Verlag, N. Y, U.S.A.

Villalba M. 2003.

Protocolo de análisis de movimiento en los brazos para diagnóstico clínico.

Proyecto de grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.