

1 Modelo de Marcadores Miembros Superiores

Para poder resolver un problema biomecánico es necesario formular ecuaciones que permitan obtener las variables de interés. El modelo utilizado junto con los valores antropométricos y cinemáticos del sujeto de prueba, permiten estimar los valores biomecánicos de interés, el modelo más utilizado se llama “*modelo de segmentos articulados*”. Por lo tanto, si se cuenta con los valores cinemáticos, valores antropométricos del sujeto y las fuerzas externas ejercidas sobre el mismo se puede determinar las variables de interés previamente descriptas. Esta predicción se denomina solución inversa.

1.1 Marcadores

Se utilizarán marcadores reflectivos para referenciar distintas partes de los segmentos a analizar. Los marcadores serán distribuidos según la figura N° 1. La siguiente nomenclatura va a ser utilizada para ubicar los marcadores, los cuales serán utilizados con el fin de generar los sistemas coordenados locales correspondientes para cada uno de los segmentos:

- Torso:
 - PX : Proceso xifoideo, ubicado en el extremo inferior del esternón.
 - IJ : Punto más profundo de la incisura yugular.
 - $C7$: Punta superior de la espina posterior de la 7ma vértebra cervical.
 - $T8$: Punta superior de la espina posterior de la 8va vértebra torácica.
- Clavícula:
 - AC_R y AC_L : extremos más dorsales de la articulación acromio-clavicular derecha e izquierda (compartido con la escápula).
- Húmero:
 - GH : centro de rotación de la articulación glenohumeral. Se obtiene mediante ecuaciones regresivas.
 - EL_R y EL_L : El punto más inferior en los epicóndilos laterales derecho e izquierdo.
 - EM_R y EM_L : El punto más inferior en los epicóndilos mediales derecho e izquierdo.
- Antebrazo:
 - RS_R y RS_L : extremos más laterales de las apófisis estiloides radiales derecha e izquierda respectivamente.
 - US_R y US_L : extremo más medial de las apófisis estiloides de los cúbitos derecho e izquierdo.
- Mano:
 - $MH2_R$ y $MH2_L$: cabeza del segundo metacarpo en mano derecha e izquierda.
 - $MH5_R$ y $MH5_L$: cabeza del quinto metacarpo en mano derecha e izquierda.
 - Alternativamente*
 - $MH3_R$ y $MH3_L$: cabeza del tercer metacarpo en mano derecha e izquierda.
- Pelvis:

- $ASIS_R$ y $ASIS_L$: puntos más prominentes de las espinas ilíacas anterosuperiores (derecha e izquierda).
- $SACRO$: punto medio de los puntos más prominentes de las espinas ilíacas derecha e izquierda posterosuperior.

Nota: La articulación GH se modela como una bisagra giratoria con un solo centro articular en el extremo distal del húmero. Es identificado según los estudios realizados por Rab *et. al.* [1]. Ver ecuación (8).

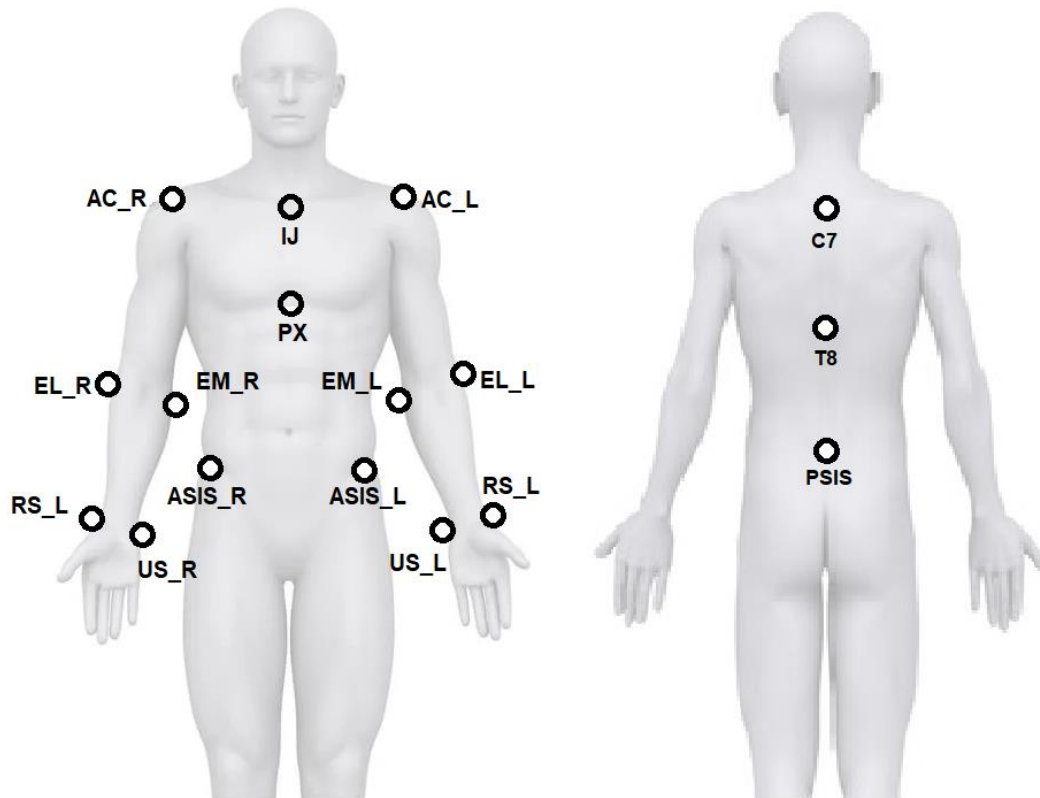


Figura N° 1 – Distribución de marcadores reflectivos.

1.2 Sistema de coordenadas locales:

El sistema de coordenada local (SCL) se encuentra definido por los marcadores corporales y por los centros articulares calculados mediante una ecuación de regresión. Para la creación de un sistema de ejes anatómicos se requiere al menos 3 marcadores por segmento corporal que no deben ser colineales entre sí. Los 3 marcadores definen el plano de traqueo.

A continuación, se definirán estos SCL para cada uno de los segmentos analizados basándose en las recomendaciones de la sociedad internacional de biomecánica (ISB) [38], [39].

En algunos segmentos se utilizará el subíndice i . Se hace referencia a que la ecuación es válida para marcadores del lado derecho como izquierdo.

1.2.1 Sistema coordinado de la pelvis

Se definen tres versores \vec{Y}_p , \vec{X}_p y \vec{Z}_p cuya dirección y sentido dependen de la posición de tres marcadores anatómicos ($ASIS_R$, $ASIS_L$ y $SACRO$).

O_p : El origen coincidente con $SACRO$.

\vec{Z}_P : Es la línea que conecta los marcadores correspondientes a las crestas ilíacas ($ASIS_L$ y $ASIS_R$) con apuntando con dirección hacia la derecha.

$$\vec{Z}_P = \frac{ASIS_R - ASIS_L}{|ASIS_R - ASIS_L|} \quad (1)$$

\vec{Y}_P : Es la línea perpendicular al plano formado por $ASIS_R$, $ASIS_L$ y $SACRO$, apuntando hacia arriba.

$$\vec{Y}_P = \frac{(SACRO - ASIS_L) \times (ASIS_R - ASIS_L)}{|(SACRO - ASIS_L) \times (ASIS_R - ASIS_L)|} \quad (2)$$

\vec{X}_P : Es la línea común perpendicular al eje \vec{Z}_P y \vec{Y}_P apuntando hacia adelante.

$$\vec{X}_P = \frac{\vec{Y}_P \times \vec{Z}_P}{|\vec{Y}_P \times \vec{Z}_P|} \quad (3)$$

El sistema coordenado del segmento pelvis queda conformado según la imagen figura N° 2.

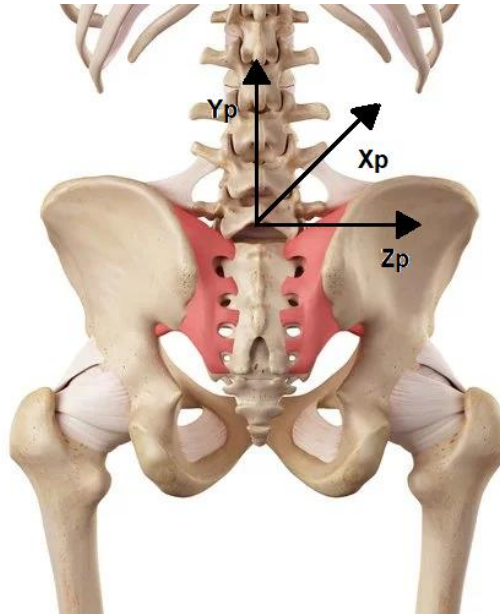


Figura N° 2 – Vista posterior de la pelvis con su sistema coordenado local.

1.2.2 Sistema coordenado del tórax:

Se definen tres versores \vec{Y}_T , \vec{X}_T y \vec{Z}_T cuya dirección y sentido depende de la posición de cuatro marcadores anatómicos (IJ , $C7$, PX y $T8$).

O_T : El origen coincidente con IJ .

\vec{Y}_T : Es la línea que conecta el punto medio entre PX y $T8$ y el punto medio entre IJ y $C7$, apuntando hacia arriba.

$$\vec{Y}_T = \frac{\left[\frac{IJ + C7}{2} \right] - \left[\frac{PX + T8}{2} \right]}{\left| \left[\frac{IJ + C7}{2} \right] - \left[\frac{PX + T8}{2} \right] \right|} \quad (4)$$

\vec{Z}_T : Es la línea perpendicular al plano formado por IJ , $C7$ y el punto medio entre PX y $T8$, apuntando hacia la derecha.

$$\vec{Z}_T = \frac{[\overrightarrow{C7 - IJ}] \times \left[\frac{\overrightarrow{PX} + \overrightarrow{T8}}{2} \right] - IJ}{\left| [\overrightarrow{C7 - IJ}] \times \left[\frac{\overrightarrow{PX} + \overrightarrow{T8}}{2} \right] - IJ \right|} \quad (5)$$

\vec{X}_T : Es la línea común perpendicular al eje \vec{Z}_T y \vec{Y}_T apuntando hacia adelante.

$$\vec{X}_T = \frac{\vec{Y}_T \times \vec{Z}_T}{|\vec{Y}_T \times \vec{Z}_T|} \quad (6)$$

El sistema coordenado del segmento tórax queda conformado según la imagen figura N° 3.

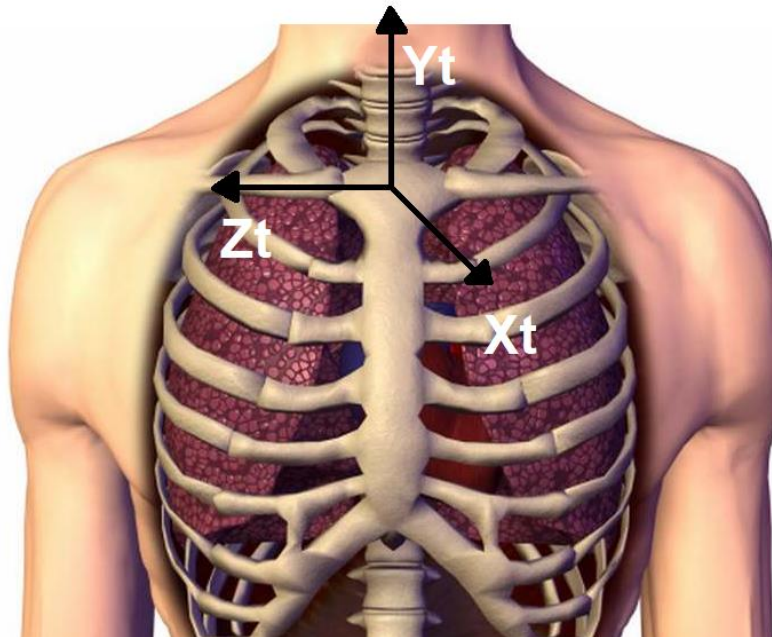


Figura N° 3 – Sistema coordenado local del tronco.

1.2.3 Sistema coordenado del húmero

ISB [2] plantea dos formas de establecer el SCL del húmero y recomienda en el caso del análisis de codo, el uso del siguiente sistema.

O_{H2} : Origen coincidente con GH .

La ubicación de GH , se basan en el desplazamiento espacial de los marcadores superficiales, la magnitud de este desplazamiento se expresa como fracción de la distancia entre marcadores individuales. En ese trabajo el centro articular de la GH se estima en un 17% de la distancia entre los dos acromiones, en la dirección de un eje axial al Tronco, posicionándose sobre el acromion, tanto derecho para determinar el centro articular GH derecho como izquierdo respectivamente. Para determinar GH se utilizó el trabajo realizado por Rab [1], para ello defino un vector definido por los marcadores AC_R y AC_L , con sentido hacia la derecha que será el eje X auxiliar para definir el centro articular.

$$\overrightarrow{GH_{x_aux}} = \frac{AC_R - AC_L}{|AC_R - AC_L|} \quad (7)$$

Se definirá un versor auxiliar que al hacer producto cruz con el eje X definido arriba, determinará el eje Y auxiliar. Este versor auxiliar será el definido entre el punto medio de IJ y $C7$ con AC_L .

$$\begin{aligned} \overrightarrow{GH_{aux}} &= \frac{C7 - AC_L}{|(C7 - AC_L)|} \\ \overrightarrow{GH_{y_aux}} &= \frac{\overrightarrow{GH_{aux}} \times \overrightarrow{GH_{x_aux}}}{|\overrightarrow{GH_{aux}} \times \overrightarrow{GH_{x_aux}}|} \end{aligned}$$

Finalmente, para determinar la ubicación de GH , se hace desplazar un 17% de la distancia entre AC_R y AC_L en el sentido contrario al eje GH_{y_aux} (ver ecuación 8).

$$\begin{aligned} GH_{derecho} &= -0.17|AC_R - AC_L| \cdot \overrightarrow{GH_{y_aux}} + AC_R \\ GH_{izquierdo} &= -0.17|AC_R - AC_L| \cdot \overrightarrow{GH_{y_aux}} + AC_L \end{aligned} \quad (8)$$

$\overrightarrow{Y_{H2}}$: Es la línea que conecta GH y el centro articular del codo (EJC), apuntando hacia GH . Para ambas extremidades se respeta la ecuación siguiente.

El EJC es el punto medio de los marcadores EL y EM (9).

$$EJC_i = \frac{EL_i + EM_i}{2} \quad (9)$$

Finalmente, $\overrightarrow{Y_{H2}}$ queda expresado según ecuación 10.

$$\overrightarrow{Y_{H2i}} = \frac{\overrightarrow{GH_i} - \overrightarrow{EJC_i}}{|\overrightarrow{GH_i} - \overrightarrow{EJC_i}|} \quad (10)$$

$\overrightarrow{Z_{H2}}$: Es la línea perpendicular al plano formado por $\overrightarrow{Y_{H2}}$ y $\overrightarrow{Y_A}$ apuntando a la derecha, siendo $\overrightarrow{Y_A}$ el eje axial del antebrazo el cual será descrito en la sección siguiente.

Para ambas extremidades se respeta la ecuación 11.

$$\overrightarrow{Z_{H2}} = \frac{\overrightarrow{Y_{h2}} \times \overrightarrow{Y_a}}{|\overrightarrow{Y_{h2}} \times \overrightarrow{Y_a}|} \quad (11)$$

$\overrightarrow{X_{H2}}$: Es una línea común perpendicular al eje $\overrightarrow{Z_{H2}}$ y $\overrightarrow{Y_{H2}}$, apuntando hacia adelante (ver ecuación 12).

$$\overrightarrow{X_{H2}} = \frac{\overrightarrow{Y_{H2}} \times \overrightarrow{Z_{H2}}}{|\overrightarrow{Y_{H2}} \times \overrightarrow{Z_{H2}}|} \quad (12)$$

El sistema coordenado del segmento húmero derecho queda conformado según la figura N° 4.

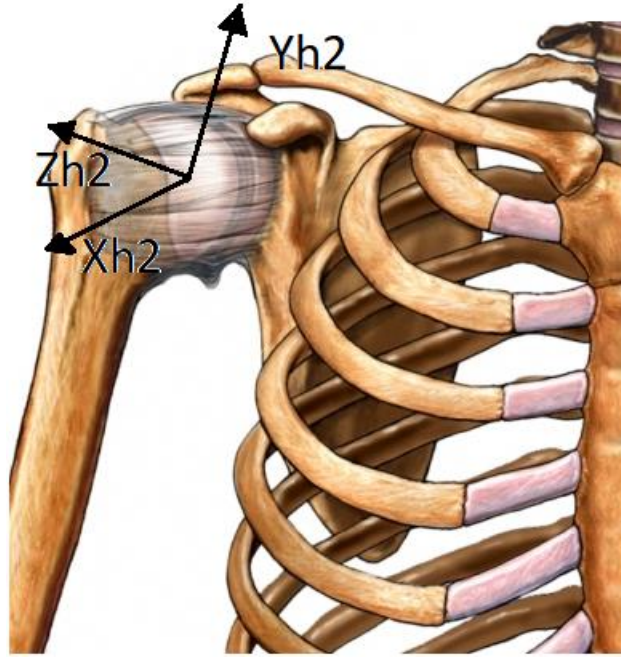


Figura N° 4 – Sistema de referencia local del húmero derecho.

1.2.4 Sistema coordinado para el antebrazo:

O_A : Origen coincidente con US .

\vec{Y}_A : Es la línea que conecta US y EJC , apuntando proximalmente. La ecuación 13 es válida para antebrazo derecho e izquierdo.

$$\vec{Y}_{A_i} = \frac{\overrightarrow{EJC_i - US_i}}{|\overrightarrow{EJC_i - US_i}|} \quad (13)$$

\vec{X}_A : Es la línea perpendicular al plano formado por el plano US , RS y EJC , apuntando hacia adelante. Las ecuaciones 14 y 15 describen el eje para antebrazo derecho e izquierdo respectivamente.

$$\vec{X}_{A_derecho} = \frac{\overrightarrow{Y_{A_derecho}} \times (\overrightarrow{RS_R} - \overrightarrow{US_R})}{|\overrightarrow{Y_{A_derecho}} \times (\overrightarrow{RS_R} - \overrightarrow{US_R})|} \quad (14)$$

$$\vec{X}_{A_izquierdo} = \frac{(\overrightarrow{RS_L} - \overrightarrow{US_L}) \times \overrightarrow{Y_{A_izquierdo}}}{|(\overrightarrow{RS_L} - \overrightarrow{US_L}) \times \overrightarrow{Y_{A_izquierdo}}|} \quad (15)$$

\vec{Z}_A : Es la línea perpendicular al eje \vec{X}_A y \vec{Y}_A , apuntando hacia la derecha. La ecuación 16 es válida para antebrazo derecho e izquierdo.

$$\vec{Z}_A = \frac{\vec{X}_A \times \vec{Y}_A}{|\vec{X}_A \times \vec{Y}_A|} \quad (16)$$

El sistema coordinado del segmento antebrazo derecho queda conformado según la figura N° 5.

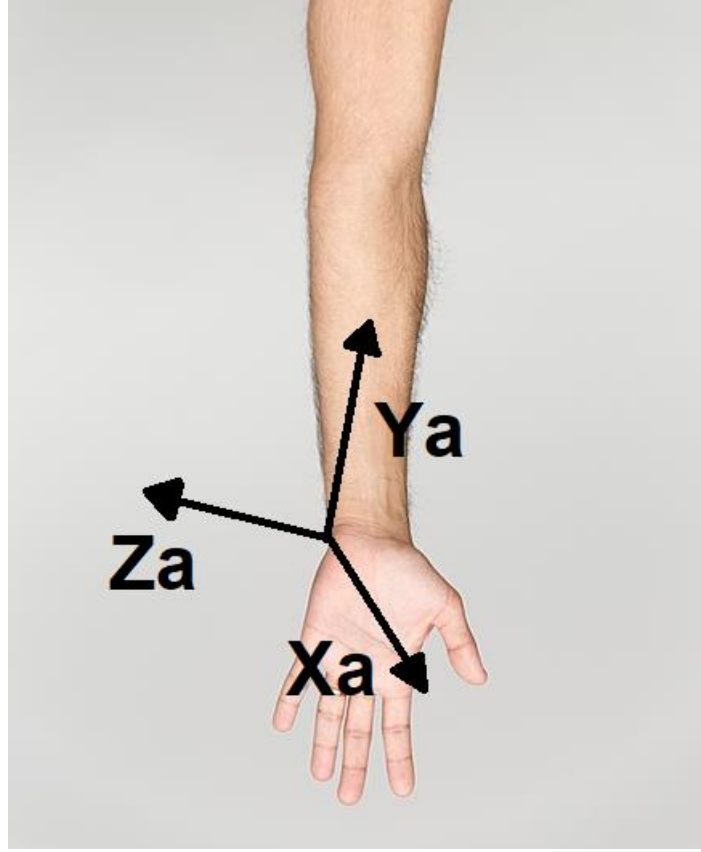


Figura N° 5 – Sistema de referencia local para el antebrazo izquierdo

1.2.5 Sistema coordinado para la mano:

En este desarrollo se considera lo descrito por Dumas et al. [4].

O_M : origen coincidente con el centro articular de la muñeca.

$$O_{M_i} = \frac{US_i + RS_i}{2} \quad (17)$$

$\overrightarrow{Y_M}$: El eje axial de la mano se encuentra definido como el versor que une O_M con el punto medio de $MH2$ y $MH5$. Este entre Apuntando en sentido proximal (ver ecuación 18).

$$\overrightarrow{Y_{M_i}} = \frac{O_{M_i} - \frac{MH2_i + R_MH5_i}{2}}{\left| O_{M_i} - \frac{MH2_i + MH5_i}{2} \right|} \quad (18)$$

Se debe considerar que si se usa $MH3$ en cada mano, estos reemplazan al punto medio entre $MH2$ y $MH5$ de las respectivas manos.

$\overrightarrow{X_M}$: Es el eje normal a un plano que contiene los marcadores $MH2$, $MH5$ y el centro articular de la muñeca. Apuntando hacia adelante. Las ecuaciones 19 y 20 son las expresiones para mano derecha e izquierda respectivamente.

$$\overrightarrow{X_{M_derecho}} = \frac{(\overrightarrow{MH2_R - O_{M_R}}) \times (\overrightarrow{MH5_R - O_{M_R}})}{|(\overrightarrow{MH2_R - O_{M_R}}) \times (\overrightarrow{MH5_R - O_{M_R}})|} \quad (19)$$

$$\overrightarrow{X_{M_izquierdo}} = \frac{(\overrightarrow{MH5_L - O_{M_L}}) \times (\overrightarrow{MH2_L - O_{M_L}})}{|(\overrightarrow{MH5_L - O_{M_L}}) \times (\overrightarrow{MH2_L - O_{M_L}})|} \quad (20)$$

Alternativamente si se cuenta con MH3 estas expresiones,

$$\overrightarrow{X_{M_derecho}} = \frac{(\overrightarrow{US_R - MH3_R}) \times (\overrightarrow{RS_R - MH3_R})}{|(\overrightarrow{US_R - MH3_R}) \times (\overrightarrow{RS_R - MH3_R})|} \quad (21)$$

$$\overrightarrow{X_{M_izquierdo}} = \frac{(\overrightarrow{RS_L - MH3_L}) \times (\overrightarrow{US_L - MH3_L})}{|(\overrightarrow{RS_L - MH3_L}) \times (\overrightarrow{US_L - MH3_L})|} \quad (22)$$

$\overrightarrow{Z_M}$: Es el eje perpendicular a ambos versores previos. (ver ecuación 23).

$$\overrightarrow{Z_{M_i}} = \overrightarrow{X_{m_i}} \times \overrightarrow{Y_{m_i}} \quad (23)$$

El sistema coordenado del segmento mano queda conformado según la figura N° 6.

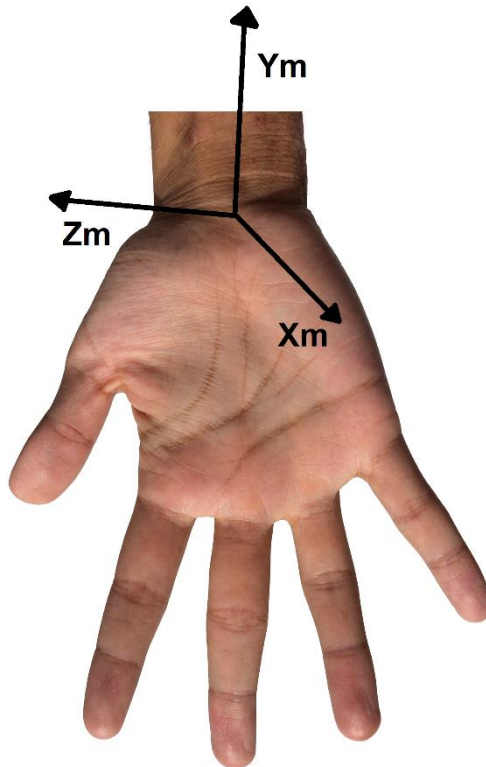


Figura N° 6 – Sistema coordenado local para la mano derecha.

1.3 Excursión angular.

Para poder obtener las excursiones angulares, el ISB define una serie de versores que definen el sistema coordenado de la articulación (JCS en inglés) [2], [3].

La definición de los mismos consta de la rotación del segmento distal respecto del segmento proximal. A continuación, se definirá el JCS para la muñeca, codo y hombro tanto para el miembro superior derecho e izquierdo y la inclinación del tronco.

De igual manera que para determinar los SCL se utilizará el subíndice i , haciendo referencia a que la ecuación es válida tanto para miembro derecho como izquierdo.

1.3.1 Articulación del hombro.

$\overrightarrow{e1_{hombro}}$: Es el eje fijo al tórax coincidente con el eje Y_T del sistema coordinado del tórax. La rotación sobre el mismo define el ángulo α_h y corresponde al plano de elevación. El ángulo de 0° corresponde cuando el húmero se ubica coincidente con el plano frontal y los ángulos positivos corresponden a la posición en el cual realiza una flexión hacia adelante.

$$\overrightarrow{e1_{hombro}} = \overrightarrow{Y_T}$$

Para la resolución, se utilizará un versor auxiliar perpendicular a Y_{H2} y Y_T (ver ecuación 24).

$$I_{hombro_i} = \frac{Y_{H2_i} \times Y_T}{|Y_{H2_i} \times Y_T|} \quad (24)$$

El arco coseno de I_{hombro} proyectado en X_T da el ángulo de plano de elevación. Para determinar la polaridad del ángulo, se referencia I_{hombro} respecto de Z_T . Finalmente, el plano de elevación para hombro derecho e izquierdo quedan representado según ecuación 25 y 26 respectivamente.

$$\alpha_{h_derecho} = \arccos(I_{hombro_derecho} \cdot X_T) \cdot \frac{I_{hombro_derecho} \cdot (-Z_T)}{|I_{hombro_derecho} \cdot (-Z_T)|} \quad (25)$$

$$\alpha_{h_izquierdo} = \arccos(I_{hombro_izquierdo} \cdot X_T) \cdot \frac{I_{hombro_izquierdo} \cdot (-Z_T)}{|I_{hombro_izquierdo} \cdot (-Z_T)|} \quad (26)$$

$\overrightarrow{e3_{hombro}}$: Es el versor coincidente con Y_{H2} , que es el eje axial del húmero. La rotación sobre el mismo define el ángulo γ_h que es positivo cuando la rotación es interna y negativa cuando es externa. El cero corresponde a la orientación en la que el eje anteroposterior del brazo se encuentra contenido en un plano transversal sagital al tronco. La ecuación 27 representan la rotación del hombro derecho e izquierdo.

$$\overrightarrow{e3_{hombro_i}} = \overrightarrow{Y_{H2_i}}$$

$$\gamma_{h_i} = \arccos(X_{H2_i} \cdot I_{hombro_i}) \cdot \frac{I_{hombro_i} \cdot Z_{H2_i}}{|I_{hombro_i} \cdot Z_{H2_i}|} \quad (27)$$

$\overrightarrow{e2_{hombro}}$: Para este versor la representación se determina a partir de realizar la el producto cruz entre $\overrightarrow{e1_{hombro}}$ y $\overrightarrow{e3_{hombro}}$. Este eje define el ángulo de elevación β_h del húmero respecto del tronco, siendo 0° cuando el eje Y_T es paralelo y con el mismo sentido que el eje Y_{H2} y 180° cuando son paralelos y sentido opuesto. La ecuación 28 representa el ángulo de elevación del hombro derecho e izquierdo.

$$\overrightarrow{e2_{hombro}} = \overrightarrow{e3_{hombro}} \times \overrightarrow{e1_{hombro}} = I_{hombro}$$

$$\beta_{h_i} = \arccos(Y_{H2_i} \cdot Y_T) \quad (28)$$

1.3.2 Articulación del codo.

$\overrightarrow{e1_{codo}}$: Es el eje fijo al segmento proximal, coincidiendo con el eje Z_{H2} del sistema coordinado del húmero. Es el eje que define el ángulo de flexión/extensión α_c siendo positivo para la flexión y negativa para hiperextensión, considerando la última como patológica y cero cuando coinciden los ejes axiales del antebrazo y húmero.

$$\overrightarrow{e1_{codo_i}} = \overrightarrow{Z_{H2_i}}$$

Para la definición del ángulo α_c se usará un versor auxiliar denominado $I_{articulación}$. Se lo define según la ecuación 29.

$$I_{articulación} = \frac{Z_p \times Y_d}{|Z_p \times Y_d|} \quad (29)$$

Para este segmento se lo define según:

$$I_{c_i} = \frac{Z_{h2_i} \times Y_{a_i}}{|Z_{h2_i} \times Y_{a_i}|}$$

Las ecuaciones que definen el ángulo α_c es la ecuación 30.

$$\alpha_{c_i} = -\arccos(-I_{c_i} \cdot X_{H2_i}) \cdot \frac{I_{c_i} \cdot Y_{H2_i}}{|I_{c_i} \cdot Y_{H2_i}|} \quad (30)$$

$\overrightarrow{e3_{codo}}$: Es el eje fijo al segmento distal y coincidente con el eje Y_A del sistema coordinado del antebrazo. Define el ángulo de rotación del codo γ_c siendo positivo para pronación (rotación interna) y negativo para supinación (rotación externa). Ver ecuaciones 31 y 32.

$$\overrightarrow{e3_{codo_i}} = \overrightarrow{Y_{A_i}}$$

$$\gamma_{c_derecho} = -\arccos(-I_{c_derecho} \cdot X_{A_derecho}) \cdot \frac{X_{A_derecho} \cdot Z_{H2_derecho}}{|X_{A_derecho} \cdot Z_{H2_derecho}|} \quad (31)$$

$$\gamma_{c_izquierdo} = \arccos(-I_{c_izquierdo} \cdot X_{A_izquierdo}) \cdot \frac{X_{A_izquierdo} \cdot Z_{H2_izquierdo}}{|X_{A_izquierdo} \cdot Z_{H2_izquierdo}|} \quad (32)$$

$\overrightarrow{e2_{codo}}$: Es el eje flotante, común con el eje perpendicular definido por $\overrightarrow{e1_{codo}}$ y $\overrightarrow{e3_{codo}}$, siendo el eje rotado X_A del sistema coordinado del antebrazo. Sobre el mismo se calcularían los movimientos de abducción y aducción que definen el ángulo β_c . Cuando el eje Y_A del antebrazo y el eje Y_{H2} del húmero se encuentran paralelos y apuntando con el mismo sentido se considera un ángulo β_c de 0°. El movimiento de abducción se lo considera negativo, mientras el de aducción positivo (ver ecuación 33 y 34).

$$\overrightarrow{e2_{codo}} = \overrightarrow{e3_{codo}} \times \overrightarrow{e1_{codo}} = -I_{codo}$$

$$\beta_{c_derecho} = \arcsen(Z_{h2_derecho} \cdot Y_{A_derecho}) \quad (33)$$

$$\beta_{c_izquierdo} = -\arcsen(Z_{h2_izquierdo} \cdot Y_{A_izquierdo}) \quad (34)$$

Se debería poder corroborar que ambos ángulos β_c son prácticamente cero para la población sana.

1.3.3 Articulación de la muñeca.

$\overrightarrow{e1_{muñeca}}$: Es el eje fijo al segmento proximal, coincidiendo con el eje Z_A del sistema coordenado del antebrazo. Es el eje que define el ángulo de flexión/extensión de la muñeca α_m siendo positivo para la flexión, negativa para hiperextensión y cero cuando se encuentra en la posición anatómica.

$$\overrightarrow{e1_{muñeca}} = \overrightarrow{Z_A}$$

Para este segmento se utiliza un versor auxiliar I_{m_i} que se define según:

$$I_{m_i} = \frac{Z_{A_i} \times Y_{M_i}}{|Z_{A_i} \times Y_{M_i}|}$$

Las ecuaciones que definen el ángulo α_{m_i} se encuentra definido según ecuación 35 para muñeca derecha e izquierda.

$$\alpha_{m_i} = -\arccos(-I_{m_i} \cdot X_{A_i}) \cdot \frac{I_{M_i} \cdot Y_{A_i}}{|I_{M_i} \cdot Y_{A_i}|} \quad (35)$$

$\overrightarrow{e3_{muñeca}}$: Es el eje fijo al segmento distal y coincidente con el eje Y_M del sistema coordenado de la mano. Define el ángulo de rotación de la muñeca γ_m siendo positivo para pronación (rotación interna) y negativo para supinación (rotación externa). Ver ecuación 36 y 37.

$$\overrightarrow{e3_{muñeca_i}} = \overrightarrow{Y_{M_i}}$$

$$\gamma_{m_derecho} = -\arccos(-I_{m_derecho} \cdot X_{M_derecho}) \cdot \frac{X_{M_derecho} \cdot Z_{A_derecho}}{|X_{M_derecho} \cdot Z_{A_derecho}|} \quad (36)$$

$$\gamma_{m_izquierdo} = \arccos(-I_{m_izquierdo} \cdot X_{M_izquierdo}) \cdot \frac{X_{M_izquierdo} \cdot Z_{A_izquierdo}}{|X_{M_izquierdo} \cdot Z_{A_izquierdo}|} \quad (37)$$

Si realmente la mano fuese un segmento rígido ambos ángulos γ_m deberían ser prácticamente cero para la población sana. Solo habría que considerar la situación, que al usar $MH2_R$, $MH5_R$, $MH2_L$ y $MH5_L$, existe una deformación del cuerpo rígido que consideramos la mano por movimiento de los metacarpianos, lo que daría lugar a erróneo ángulo distinto de cero.

$\overrightarrow{e2_{muñeca}}$: Es el eje flotante, común con el eje perpendicular definido por $\overrightarrow{e1_{muñeca}}$ y $\overrightarrow{e3_{muñeca}}$. Sobre el mismo se da los movimientos de abducción (desviación radial) y aducción (desviación cubital). Cuando el eje Y_M de la mano y el eje Y_A del antebrazo se encuentran paralelos y apuntando con el mismo sentido se considera un ángulo β_m de 0° . El movimiento de abducción (desviación radial) se lo considera negativo, mientras el de aducción (desviación cubital) se lo considera positivo (ver ecuación 38 y 39).

$$\overrightarrow{e2_{muñeca}} = \overrightarrow{e3_{muñeca}} \times \overrightarrow{e1_{muñeca}}$$

$$\beta_{m_derecho} = \arcsen(Z_{A_derecho} \cdot Y_{M_derecho}) \quad (38)$$

$$\beta_{m_izquierdo} = -\arcsen(Z_{A_izquierdo} \cdot Y_{M_izquierdo}) \quad (39)$$

- [1] G. Rab, K. Petuskey, and A. Bagley, "A method for determination of upper extremity kinematics," *Gait Posture*, vol. 15, no. 2, pp. 113–119, 2002.

- [2] G. Wu *et al.*, "ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion - Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand," *J. Biomech.*, vol. 38, no. 5, pp. 981–992, 2005.
- [3] G. Wu *et al.*, "ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion - Part I: Ankle, hip, and spine," *J. Biomech.*, vol. 35, no. 4, pp. 543–548, 2002.
- [4] R. Dumas, L. Chèze, and J. P. Verriest, "Adjustments to McConville *et al.* and Young *et al.* body segment inertial parameters," *J. Biomech.*, vol. 40, no. 3, pp. 543–553, 2007.