

CÁLCULO DE ESFUERZOS ARTICULARES EN LA MARCHA HUMANA

Alumno: Pablo Andrés Mosquera Villarino

Tutor: Urbano Lugrís Armesto



Índice

1. Introducción
2. Modelo biomecánico, ADI
3. Características de la marcha humana
4. Fases del análisis
5. Experimentación
6. Conclusiones
7. Trabajo futuro



1. Introducción

- **Biomecánica** ciencia que estudia el movimiento de seres vivos y las fuerzas que intervienen en dicho movimiento
- **Objetivo del proyecto** calculo de
 - Fuerzas de reacción
 - Esfuerzos motores
- **Planteamiento** capturar el movimiento, disponer de los datos del del sujeto, plantear las ecuaciones de la dinámica y realizar un Análisis Dinámico Inverso (ADI).
- **Aplicaciones**
 - Médicas y fisioterapéuticas
 - Aplicaciones deportivas
 - Aplicaciones ergonómicas.



2. Modelo biomecánico, ADI

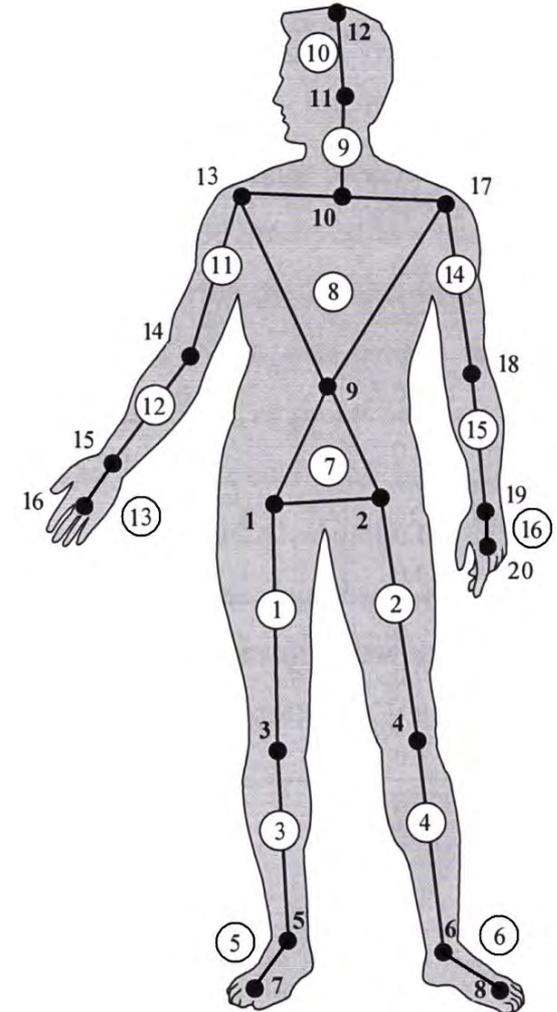
Modelo biomecánico

Cadena compuesta por un conjunto de sólidos rígidos unidos mediante pares esféricos. Cada sólido rígido representa una porción del cuerpo humano llamada segmento corporal.

Análisis dinámico inverso

Métodos de resolución:

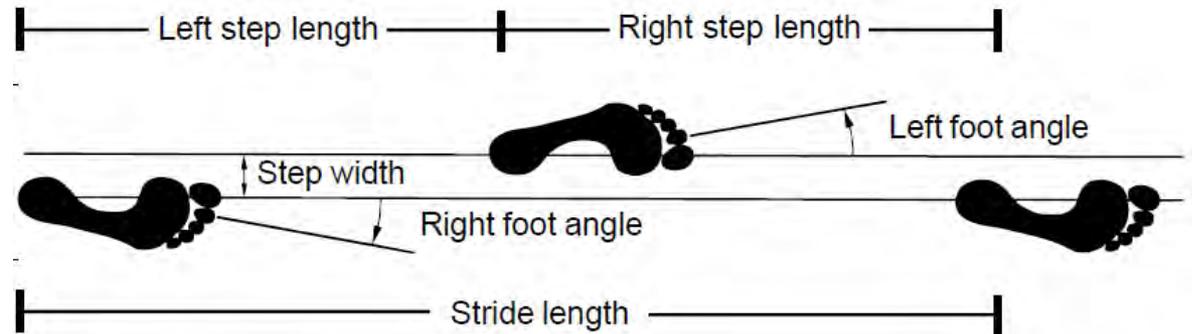
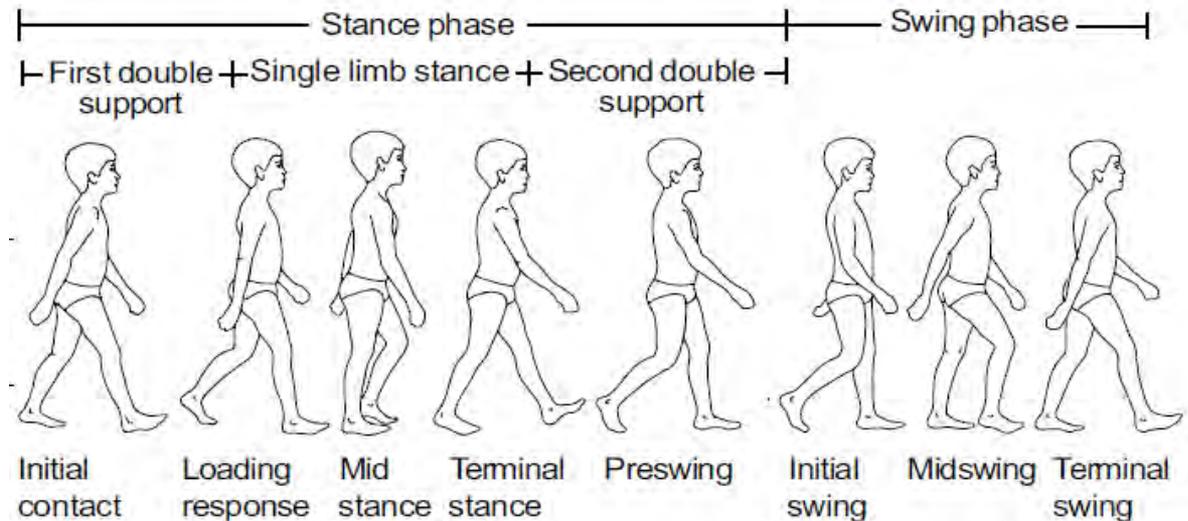
1. Plantear directamente las ecuaciones de la dinámica, conociendo el movimiento del cuerpo adquirido experimentalmente.
2. Usar las mediciones cinemáticas y las fuerzas de reacción con el suelo y plantea un sistema de ecuaciones dinámicas sobredeterminado.



3. Características de la marcha humana

Características

- Fenómeno cíclico
- Fases diferenciadas
- Eventos
- Simetría



4. Fases del análisis

1. Estimación de los parámetros biométricos (BSP)
2. Captura de movimiento mediante cámaras de video infrarrojas
Posiciones de los marcadores
3. Medición de reacciones: Placas de fuerza
4. Filtrado de señales: SSA
5. Posición de las articulaciones y puntos extremos
6. Consistencia cinemática
7. Orientación de segmentos
8. Cálculo de los ángulos de giro: Cinemática inversa
9. Cálculo de velocidades y aceleraciones: Diferenciación numérica
10. Cálculo de reacciones y esfuerzos motores: Dinámica inversa



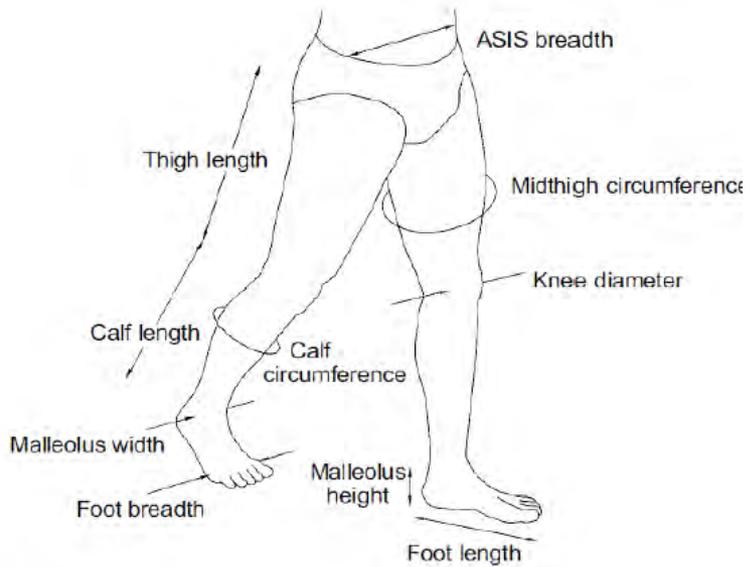
4.1 Estimación de los parámetros biométricos

Parámetros inerciales de cada segmento del cuerpo, para cada sujeto.

- Masa
- Posición del centro de gravedad
- Momentos de inercia

Métodos Empleados

Ecuaciones de regresión (parte inferior)



4.1 Estimación de los parámetros biométricos

Parámetros inerciales de cada segmento del cuerpo, para cada sujeto.

- Masa
- Posición del centro de gravedad
- Momentos de inercia

Métodos Empleados

Ecuaciones de regresión (parte inferior)

Masa del segmento = $C1 \cdot \text{Masa total} + C2 \cdot \text{longitud}^3 + C3$

Momento de inercia del segmento = $C4(\text{Masa total})(\text{longitud})^2 + C5$

Posición del CG del segmento = $C6(\text{distancia entre extremos})$

Estimación a partir de un modelo estándar (parte superior)

Factor de escala de masa: $X_m = m/m_{st}$

Factor de escala de longitud: $X_L = L/L_{st}$

Factor de escala de inercia: $X_I = X_m \cdot X_L^2$

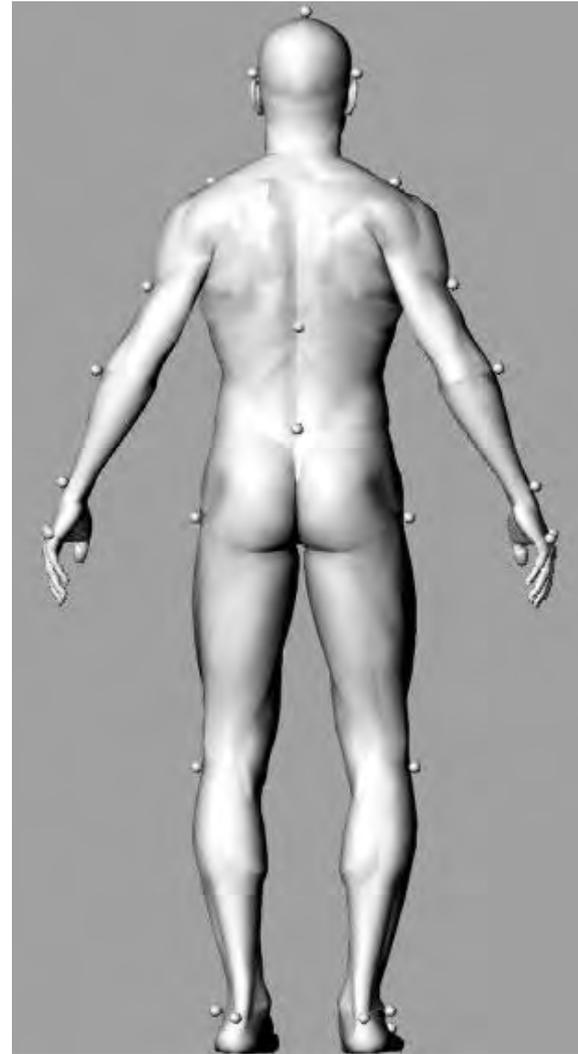
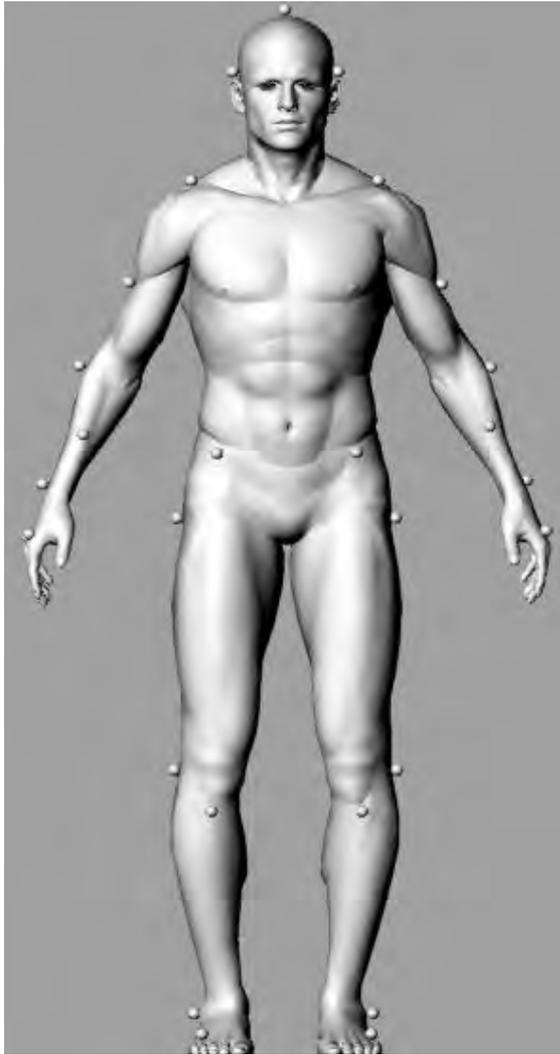


4.2 Captura mediante cámaras de video infrarrojas

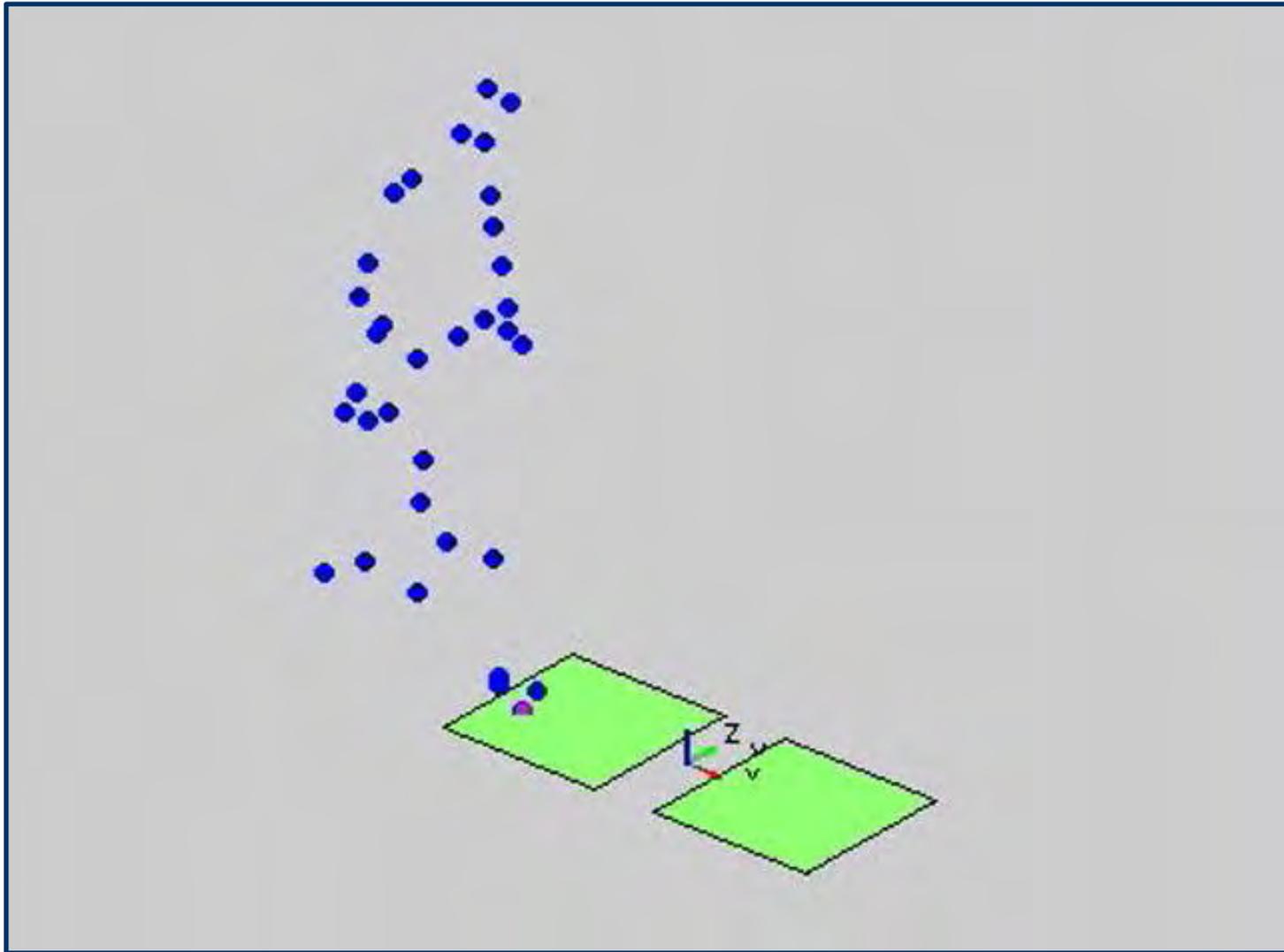
- Estas cámaras se utilizan para obtener la posición del cuerpo en 3D.
- Captan la luz infrarroja que emiten unos marcadores que se sitúan sobre la superficie del cuerpo.
- Se emplean varias cámaras situadas de forma estratégica. Las imágenes obtenidas por cada una muestran las trayectorias de los marcadores en 2D según su punto de vista.
- Mediante triangulación se calcula la posición en 3D de cada marcador.
- **Marcadores Pasivos**
 - Son catadióptricos. Reflejan la iluminación IR en la dirección de la fuente. Pueden ser pegatinas o esferas cubiertas con cinta retrorreflectante.



4.2.1 Posiciones de los marcadores

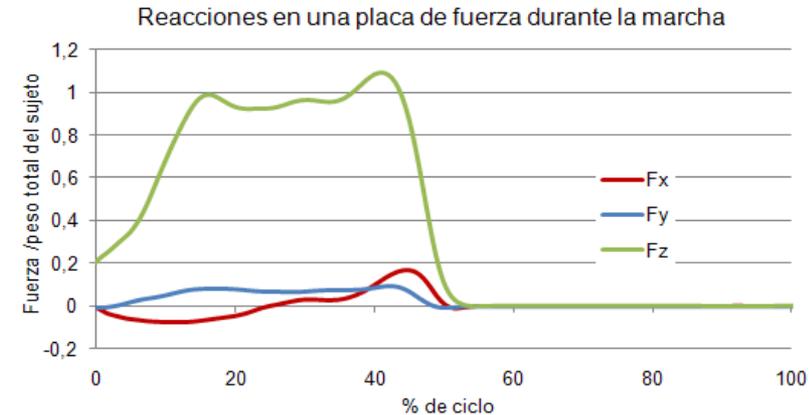


4.2.1 Posiciones de los marcadores



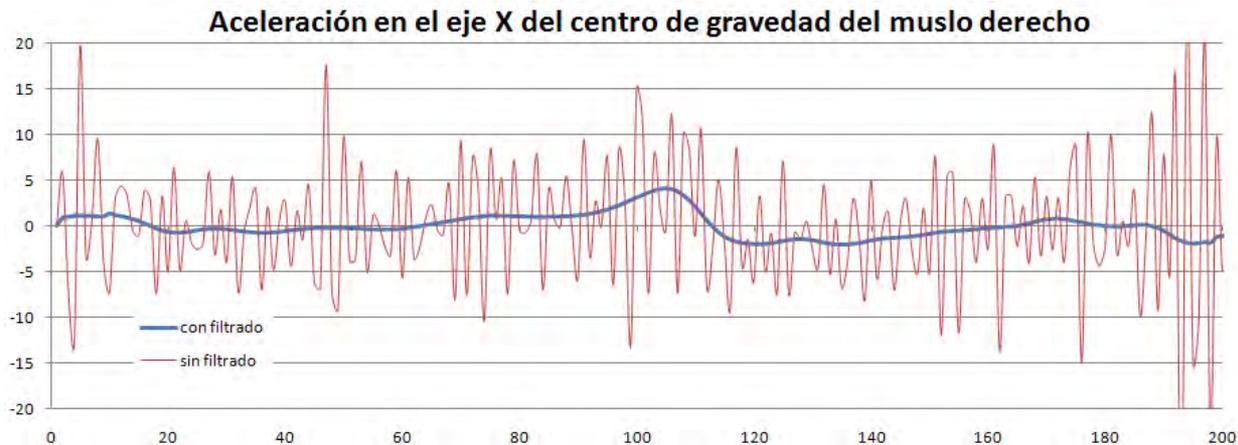
4.3 Medición de reacciones: Placas de fuerza

- Miden la fuerza y el momento de reacción del pie con el suelo durante la marcha. Dividiéndolas en tres componentes, una vertical y otras dos paralelas al suelo, en las direcciones anterior-posterior y medio-lateral.
- Para caracterizar la reacción que ejerce el suelo, necesitamos conocer además la posición del centro de presión: punto donde se produce la resultante de fuerzas ejercidas sobre la planta del pie.



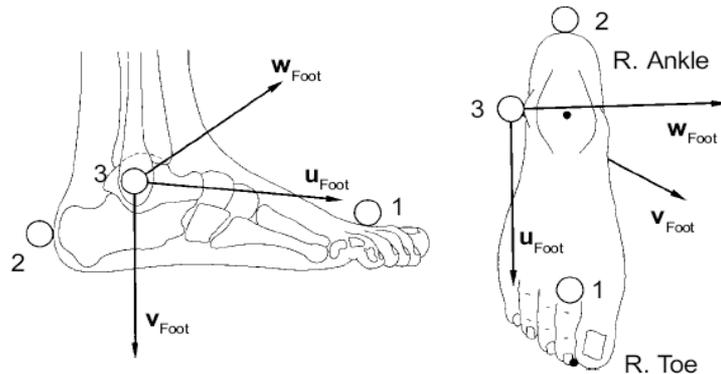
4.4 Filtrado de señales: SSA

- Los datos obtenidos por el sistema de captura presentan ruido de alta frecuencia.
- Es necesario filtrar la señal de desplazamiento antes de la derivación para obtener velocidades y aceleraciones suaves que contribuyan a aumentar la precisión del ADI.
- El Análisis de Espectro Singular (SSA) es una técnica de filtrado de series temporales.
- Descompone la serie temporal original en un conjunto de series aditivas independientes y la reconstruye a partir de las componentes que representan la tendencia, con la menor pérdida de información posible.



4.5 Posición de articulaciones y puntos extremos

Construcción de ejes: a partir de la posición de los marcadores.



$$\mathbf{u}_{R.Foot} = \frac{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2}{|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|}$$
$$\mathbf{w}_{R.Foot} = \frac{(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3) \times (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3)}{|(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3) \times (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3)|}$$
$$\mathbf{v}_{R.Foot} = \mathbf{w}_{R.Foot} \times \mathbf{u}_{R.Foot}$$

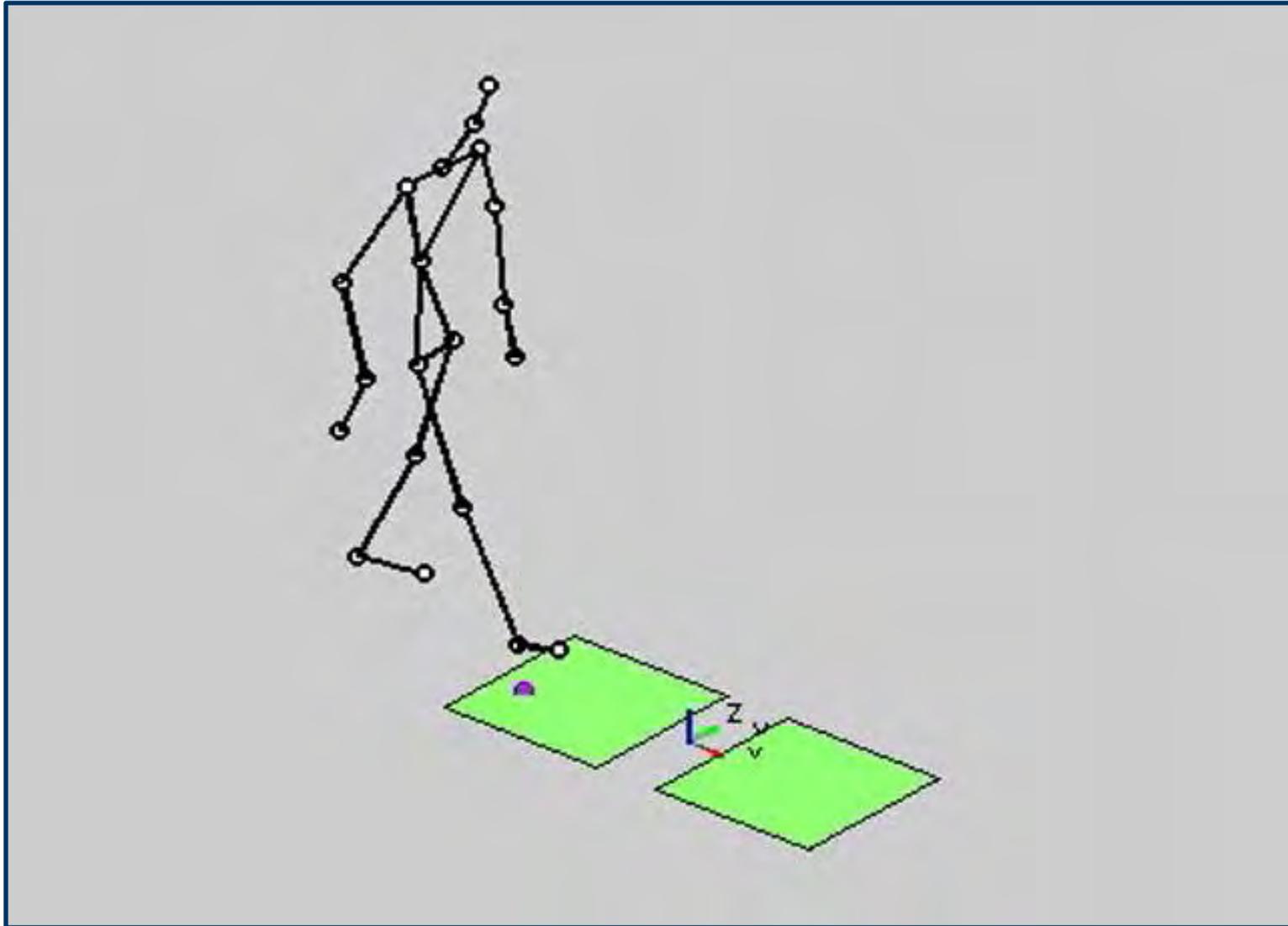
Desplazamiento: distancia que nos debemos mover desde un marcador para situarnos en la articulación.

$$\mathbf{p}_{Ankle} = \mathbf{p}_3 + 0.016(\text{longitud del pie})\mathbf{u}_{R.Foot} + 0.392(\text{altura del tobillo})\mathbf{v}_{R.Foot} + 0.478(\text{ancho del tobillo})\mathbf{w}_{R.Foot}$$

$$\mathbf{p}_{Toe} = \mathbf{p}_3 + 0.742(\text{longitud del pie})\mathbf{u}_{R.Foot} + 1.074(\text{altura del tobillo})\mathbf{v}_{R.Foot} - 0.187(\text{ancho del pie})\mathbf{w}_{R.Foot}$$



4.5 Posición de articulaciones y puntos extremos



4.6 Consistencia cinemática

- La deformación y el desplazamiento de la piel en las proximidades de las articulaciones causa errores en el cálculo de su posición.
- Para solventar estas deficiencias, se modifica la posición de las articulaciones, de manera que satisfagan unas ecuaciones de restricción cinemática, que obligan a que las dimensiones del sistema esquelético sean constantes.

$$\Phi(\mathbf{q}) = \emptyset \quad \Phi_1 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - (l_{1-2})^2$$

- Para ello, se minimiza de forma iterativa la suma de distancias entre las coordenadas medidas por el sistema de captura de movimiento y aquellas que cumplen las ecuaciones de restricción.

$$\min \mathbf{v} = \frac{1}{2} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_0)^T \mathbf{W} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_0) \quad \text{s.t. } \Phi = 0$$

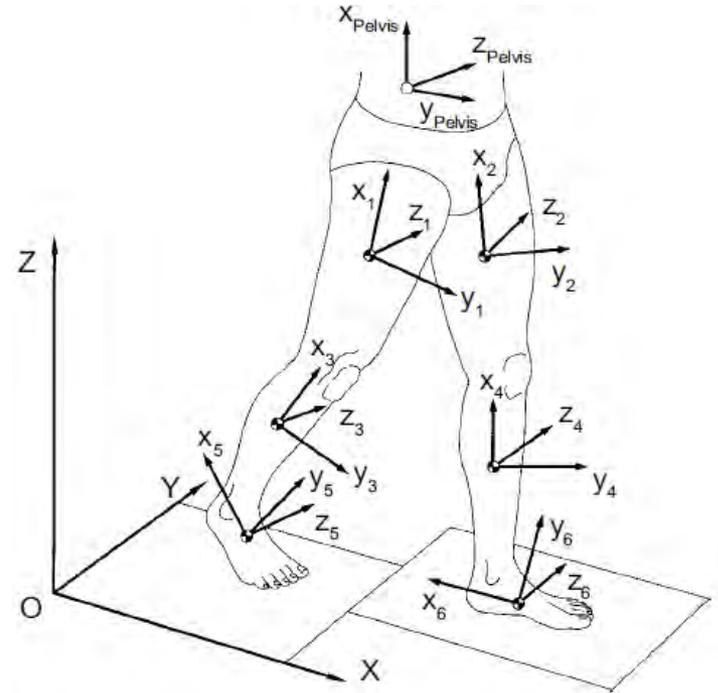
$$[\mathbf{W} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \Phi_{\mathbf{q}}] (\mathbf{q}_{i+1} - \mathbf{q}_i) = -\mathbf{W} (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_0) + \Phi_{\mathbf{q}}^T (\alpha \Phi + \lambda)$$

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \alpha \Phi \quad i = 1, \dots, n$$



4.7 Orientación de segmentos

- Un sólido en el espacio 3-D tiene seis grados de libertad.
- Para determinar la orientación de cada segmento emplearemos un sistema de ejes locales (xyz).
- Para ello necesitamos conocer las posiciones de al menos tres puntos no alineados en cada miembro del cuerpo.
- La ubicación del origen de cada sistema local xyz es el centro de gravedad del segmento correspondiente.



$$\mathbf{i}_1 = (\mathbf{p}_{R.Hip} - \mathbf{p}_{R.Knee}) / |\mathbf{p}_{R.Hip} - \mathbf{p}_{R.Knee}|$$

$$\mathbf{j}_1 = (\mathbf{p}_6 - \mathbf{p}_{R.Hip}) \times (\mathbf{p}_{R.Knee} - \mathbf{p}_{R.Hip}) / |(\mathbf{p}_6 - \mathbf{p}_{R.Hip}) \times (\mathbf{p}_{R.Knee} - \mathbf{p}_{R.Hip})|$$

$$\mathbf{k}_1 = \mathbf{i}_1 \times \mathbf{j}_1$$

4.8 Cálculo de ángulos de giro: Cinemática inversa

- **Ángulos articulares anatómicos:** están referidos a un sistema local, muestran de forma intuitiva el giro producido entre dos elementos, en sus ejes principales: flexión-extensión, aducción-abducción, etc...

$\mathbf{k}_{\text{proximal}}$ = eje de flexión/extensión

$\mathbf{i}_{\text{distal}}$ = eje de rotación interior/exterior

$\mathbf{l}_{\text{articulación}}$ = eje abducción/adducción

α = ángulo de flexión/extensión

β = ángulo de abducción/adducción

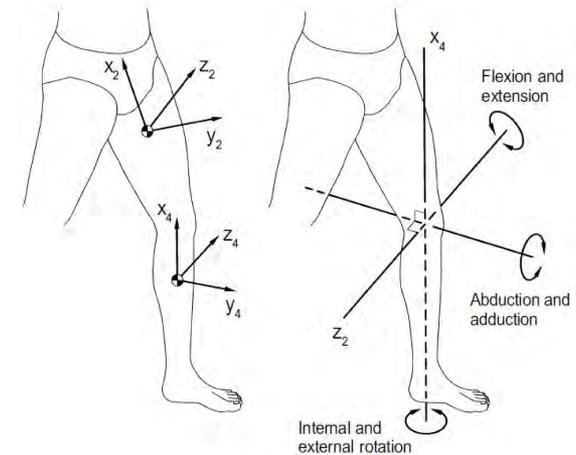
γ = ángulo de rotación interior/exterior

$$\mathbf{l}_{\text{Articulación}} = \frac{\mathbf{k}_{\text{proximal}} \times \mathbf{i}_{\text{distal}}}{|\mathbf{k}_{\text{proximal}} \times \mathbf{i}_{\text{distal}}|}$$

$$\alpha_{\text{R.Hip}} = \text{asin}[\mathbf{l}_{\text{R.Hip}} \cdot \mathbf{i}_{\text{pelvis}}]$$

$$\beta_{\text{R.Hip}} = \text{asin}[\mathbf{k}_{\text{pelvis}} \cdot \mathbf{i}_1]$$

$$\gamma_{\text{R.Hip}} = -\text{asin}[\mathbf{l}_{\text{R.Hip}} \cdot \mathbf{k}_1]$$



- **Ángulos de Euler:** los utilizaremos para calcular la velocidad y aceleración angular referida a ejes globales en el cálculo dinámico.

$$\phi = \text{asin}[(\mathbf{I} \times \mathbf{L}) \cdot \mathbf{K}]$$

$$\theta = \text{asin}[(\mathbf{K} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{L}] \quad \mathbf{L} = \frac{\mathbf{K} \times \mathbf{k}}{|\mathbf{K} \times \mathbf{k}|}$$

$$\psi = \text{asin}[(\mathbf{L} \times \mathbf{i}) \cdot \mathbf{k}]$$

4.9 Calculo de velocidades y aceleraciones

La velocidad y aceleración, se calcula mediante diferenciación numérica utilizando el método de las diferencias finitas.

$$\frac{dx}{dt} = x' = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2\Delta t} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = x'' = \frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{(\Delta t)^2}$$

Las velocidades y aceleraciones angulares para el sistema de ejes globales se calculan a partir de los ángulos de Euler y sus derivadas.

Velocidad angular = [Función de los ángulos Euler y sus derivadas]

$$\omega_{ix} = \phi' \sin \theta \sin \psi + \theta' \cos \psi$$

$$\omega_{iy} = \phi' \sin \theta \cos \psi - \theta' \sin \psi$$

$$\omega_{iz} = \phi' \cos \theta + \psi'$$

Aceleración angular = [Función de los ángulos Euler y sus primeras y segundas derivadas]

$$\omega'_{ix} = \phi'' \sin \theta \sin \psi + \phi' \theta' \cos \theta \sin \psi + \phi' \psi' \sin \theta \cos \psi + \theta'' \cos \psi - \theta' \psi' \sin \psi$$

$$\omega'_{iy} = \phi'' \sin \theta \cos \psi + \phi' \theta' \cos \theta \cos \psi - \phi' \psi' \sin \theta \sin \psi - \theta'' \sin \psi - \theta' \psi' \cos \psi$$

$$\omega'_{iz} = \phi'' \cos \theta - \phi' \theta' \sin \theta + \psi''$$



4.10 Cálculo de reacciones y esfuerzos motores

Procedimiento para cada segmento:

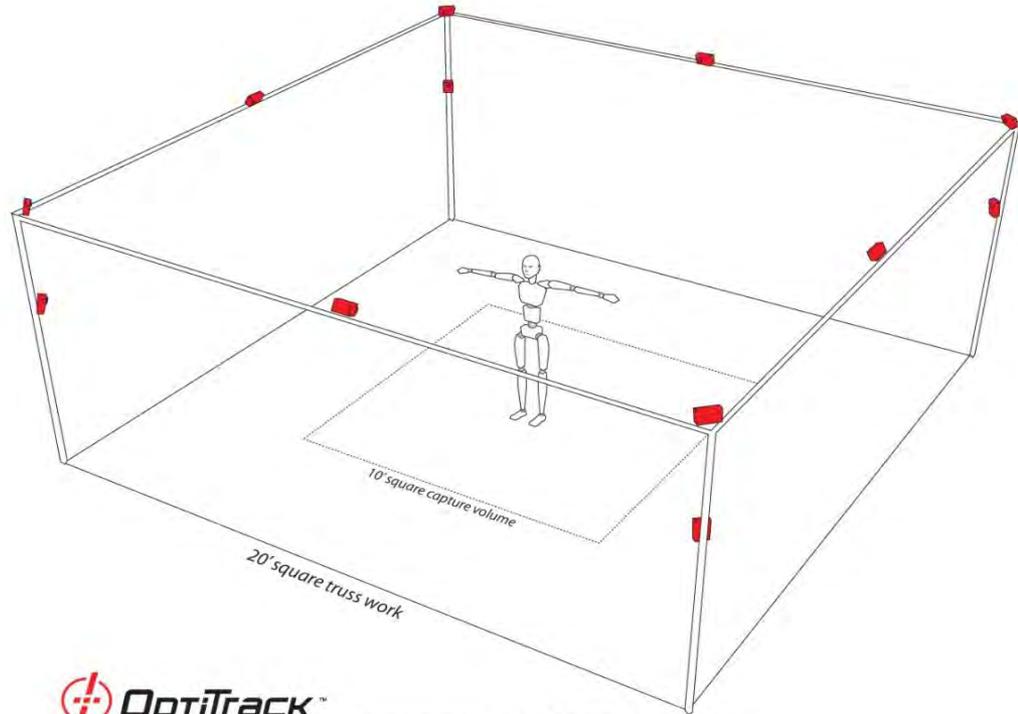
1. Calcular las fuerzas en la articulación proximal conociendo la fuerza distal, mediante la segunda ley de Newton.
2. Calcular la distancia entre el centro de gravedad del segmento a los extremos proximal y distal para posteriormente calcular los momentos generados por las fuerzas aplicadas.
3. Calcular el momento resultante que actúa en el segmento.
4. Calcular la variación del momento angular para el segmento.
5. Calcular el momento resultante conjunto usando la forma angular de la segunda ley de Newton, en las coordenadas globales XYZ del sistema.
6. Convertir la fuerza resultante y el momento en el sistema global XYZ a un sistema en ejes locales, según los ejes de flexión-extensión, abducción-aducción y de rotación interior-exterior.



5. Experimentación

Equipo empleado

- 12 cámaras infrarrojas montadas sobre una estructura metálica de perfiles de aluminio
- 2 placas de fuerza encajadas en una tarima de madera.



 **OptiTrack™**

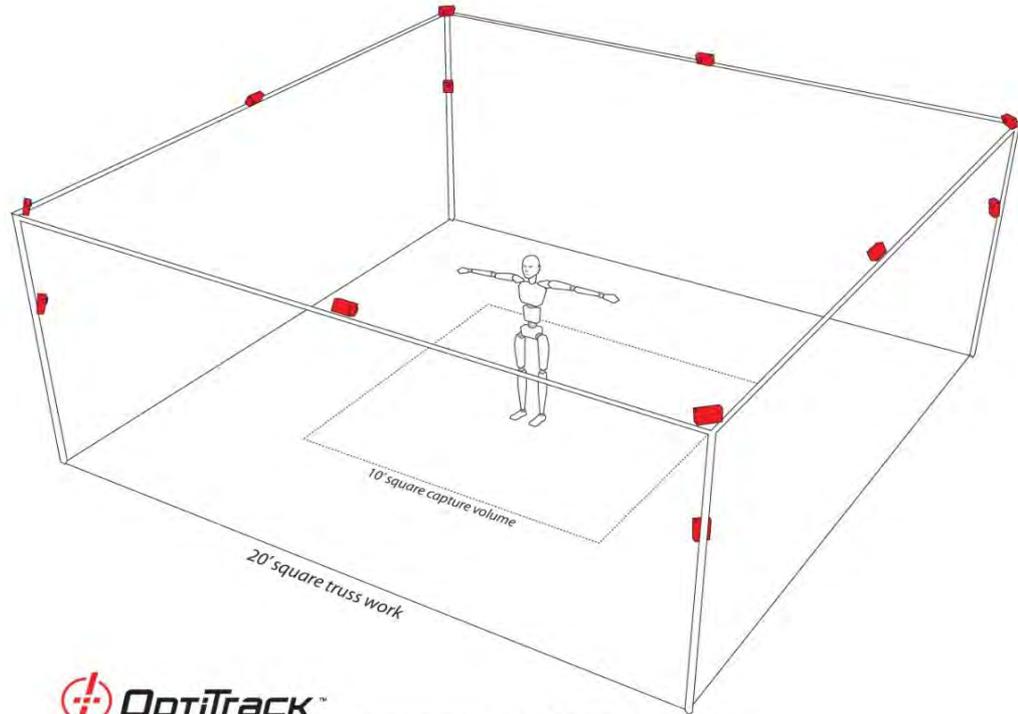
Recommended 12 Camera Setup



5. Experimentación

Equipo empleado

- 12 cámaras infrarrojas montadas sobre una estructura metálica de perfiles de aluminio
- 2 placas de fuerza encajadas en una tarima de madera.
- Traje de captura y marcadores pasivos
- Equipo de calibración
- Mazo de sincronización
- PC



Recommended 12 Camera Setup



5. Experimentación

Software empleado

- OPTITRACK ARENA

Controlador de las cámaras

- AMTI NETFORCE

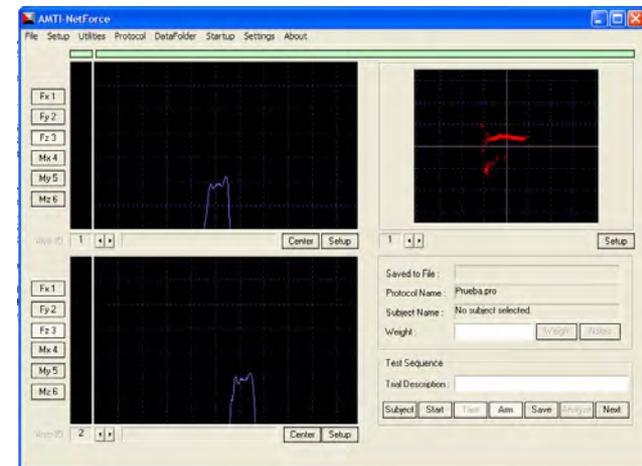
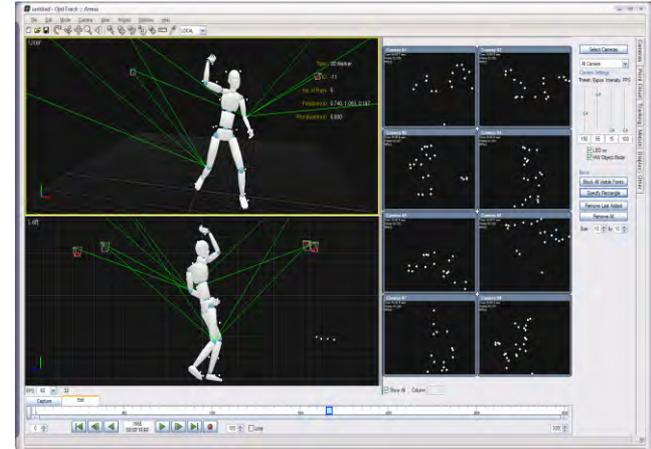
Controlador de las placas de fuerza

- EVENTGHOST

Controlador automático de sucesos

- MATLAB

Programa de cálculo matemático



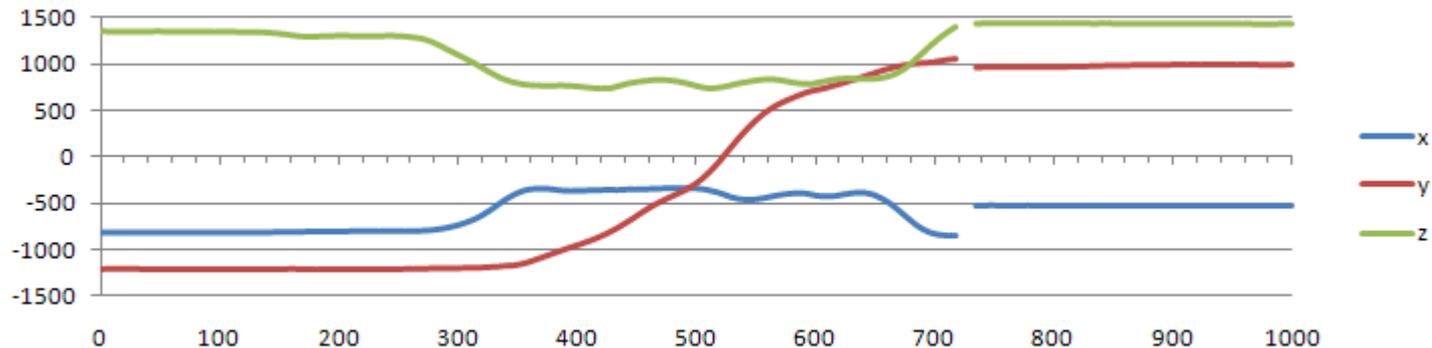
5. Experimentación



5. Experimentación

Reconstrucción de trayectorias

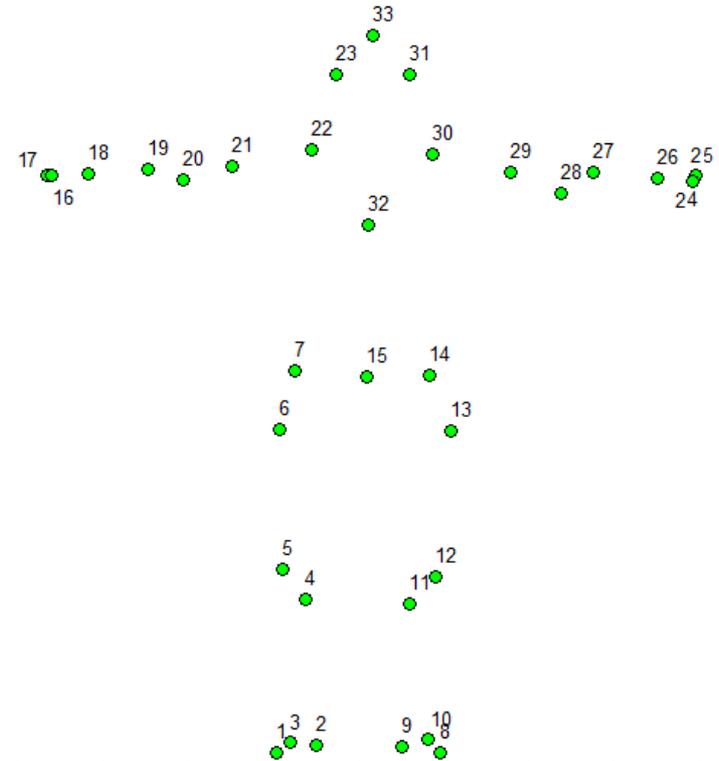
- Las trayectorias obtenidas por el ARENA pueden estar incompletas o fraccionadas.
- Esto es debido a intervalos de tiempo en el que los datos obtenidos de las cámaras son insuficientes para realizar la triangulación debido a que algún marcador queda tapado.
- O debido a un salto cuando las cámaras pierden la posición de un marcador y lo intercambian por el que está más próximo.
- Para corregir estos fallos, y evitar realizar cálculos con datos erróneos se realiza en primer lugar un análisis las trayectorias de los marcadores, se detectan estos fallos y se reconstruyen las trayectorias.



5. Experimentación

Identificación de marcadores

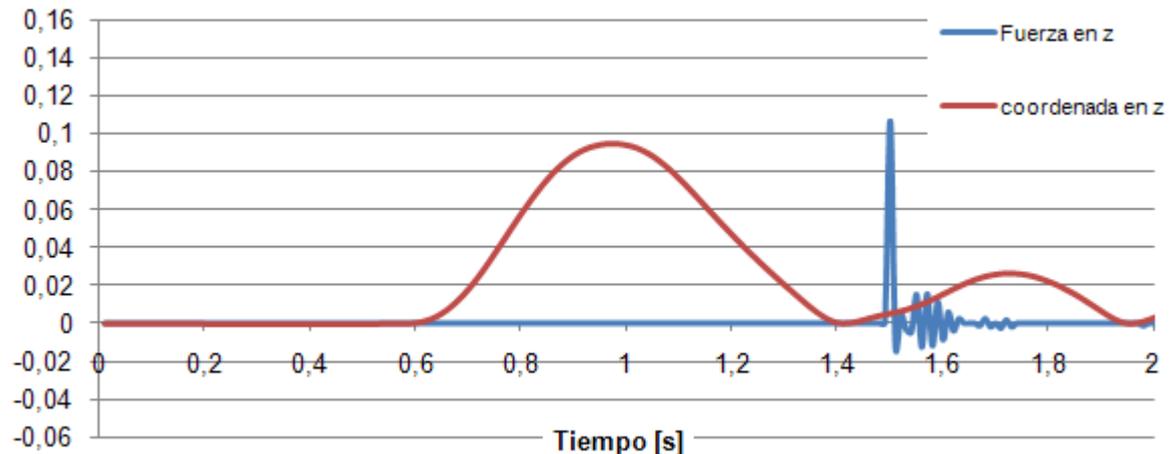
- El programa de captura no siempre ordena las trayectorias obtenidas de la misma manera, por lo que hay que identificar los marcadores.
- Si no los identificamos el programa no sabe cual pertenece a cada parte del cuerpo, y no podremos construir los ejes locales de cada miembro y situar los puntos de las articulaciones.
- Para identificar los marcadores separamos los marcadores en función de sus coordenadas en la posición inicial (brazos extendidos mirando en sentido de avance).



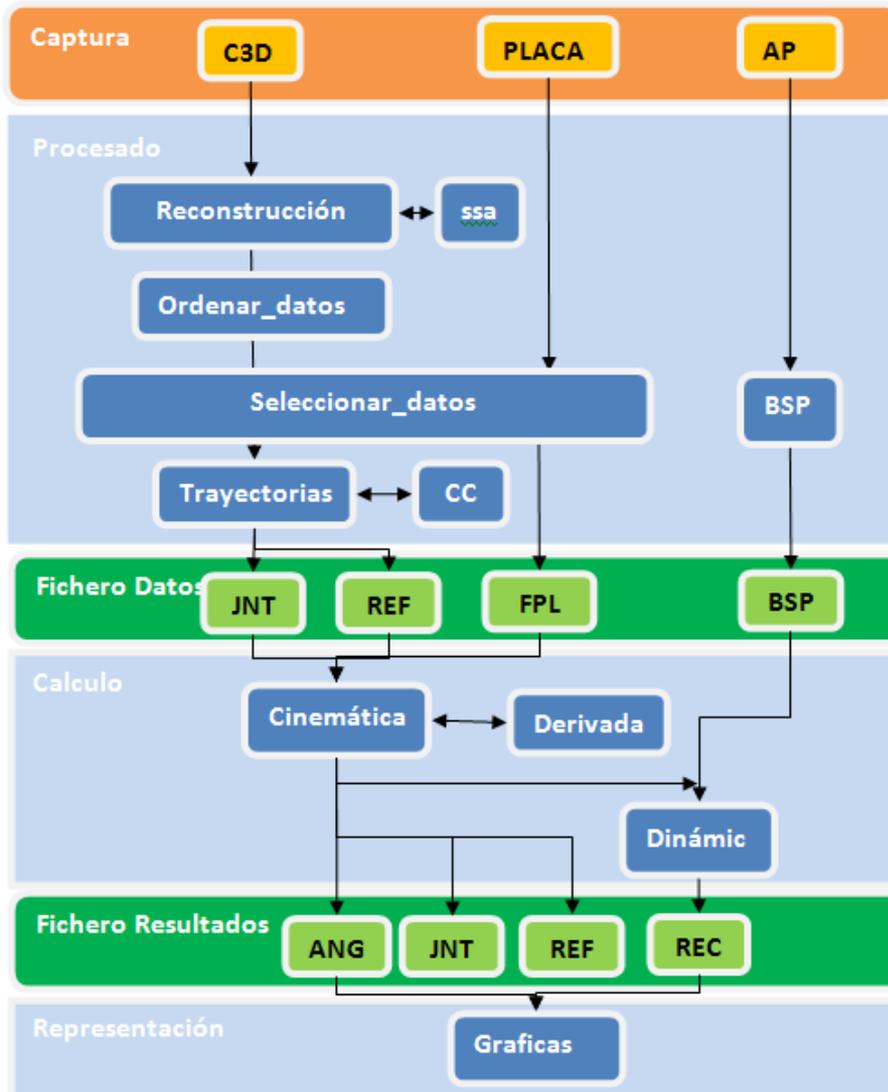
5. Experimentación

Sincronización entre cámaras y placas de fuerza

- Este problema nace por el desfase de tiempo existente entre el inicio de la medición de las placas, y el inicio de la captura de vídeo, debido al desfase en la ejecución de cada programa.
- Para corregir este problema al inicio de la captura, se golpea una placa con el mazo de sincronización.
- Se hace coincidir el instante en el que se detecta el golpe en la placa (aumento de la fuerza en dirección z), con el instante en el que la coordenada z del marcador alcanza un mínimo.



Estructura del programa en Matlab



Análisis de resultados

■ Análisis del modelo

- Visualización de trayectorias
- Numeración de marcadores
- Definición de segmentos y ejes de referencia
- Situación del centro de presiones

■ Interpretación de resultados

- Análisis de los ángulos de giro
- Análisis de fuerzas
- Análisis de momentos

■ Comparación de resultados

- Comparación con los resultados obtenidos por otros autores.

Esta comparación tiene la dificultad de estar comparando los resultados de sujetos distintos.

Por este motivo analizamos:

- La forma general de las gráficas obtenida por otros autores para un sujeto estándar.
- Los resultados obtenidos partiendo de los mismos datos. (datos empleados en el GaitLab)

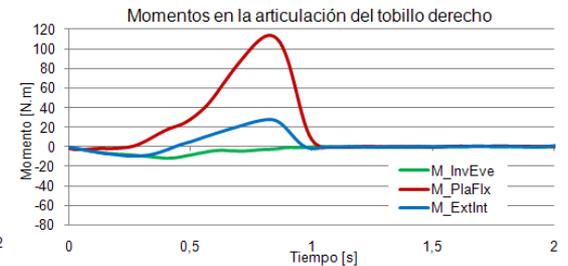
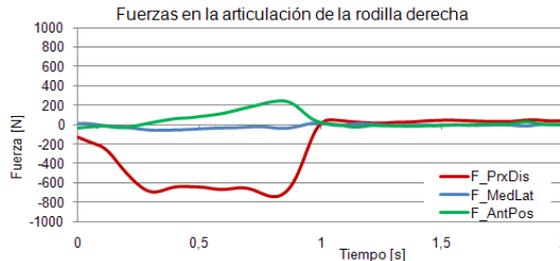
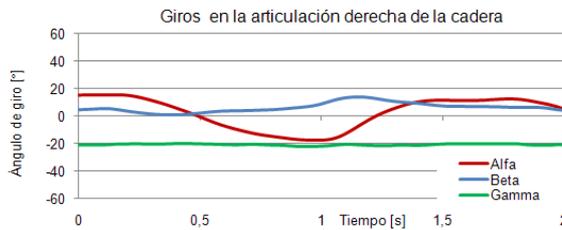


Análisis de resultados

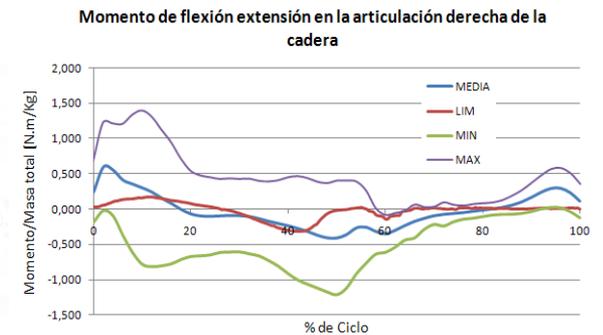
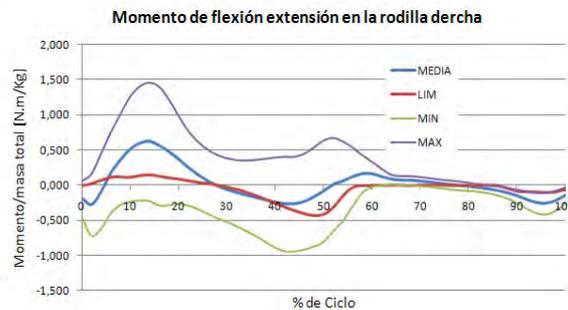
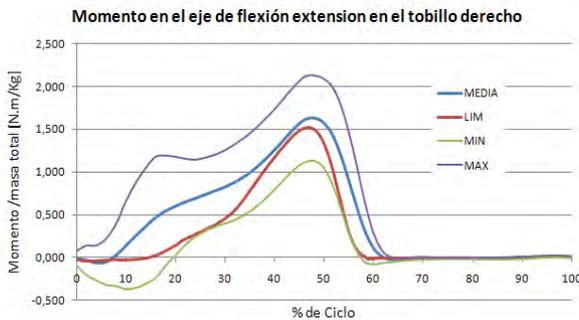
■ Análisis del modelo

- Visualización de trayectorias
- Numeración de marcadores
- Definición de segmentos y ejes de referencia
- Situación del centro de presiones

■ Interpretación de resultados



■ Comparación de resultados



6. Conclusiones

- 1. El principal objetivo de este proyecto era lograr el estudio de la marcha mediante un equipo comercial, de un coste muy inferior a los específicamente diseñados para este fin. Este objetivo se ha cumplido completamente, dado que se ha desarrollado con éxito un sistema de captura y análisis de datos totalmente automatizado.**
- 2. Los resultados obtenidos están a la altura de los obtenidos por los programas comerciales actuales que se encuentran disponibles al público.**
- 3. Aunque el programa desarrollado no tiene la finalidad de ser un programa comercial, podría desarrollarse para poder estar a disposición del público.**
- 4. Los datos obtenidos por este programa también pueden ser utilizados para comparar con los obtenidos mediante otros métodos a modo de validación.**



7. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se podría:

1. Añadir mejoras en el programa, como por ejemplo poder introducir nuevos elementos en la captura como bastones, andadores, ortesis, etc...
2. Analizar otras situaciones como caminar por una rampa o subir escalones.
3. Extenderse a otras actividades más allá de la marcha humana, como carrera, levantamiento de peso, salto etc...
4. Conocer el estado tensionar de los huesos, esfuerzos musculares, y calcular la potencia desarrollada y el trabajo necesario para realizar cualquier actividad.
5. Desarrollar las aplicaciones del programa.

