

Modelo esquelético personalizado y captura de movimiento humano mediante filtros de Kalman

Autor:

Jorge Manuel Carreira Rubiños

Tutores:

Urbano Lugrís Armesto, Francisco José Mouzo Murujosa

Fecha:

Julio 2017

Motivación

- Problemas en la captura óptica
- La adaptación del sujeto al modelo esquelético es un proceso laborioso



Objetivo

- Obtención de un modelo esquelético personalizado
- Estimación óptima con los datos de la captura



Herramientas

- Proceso de escalado y optimización
- Filtro de Kalman

Captura de movimiento

Equipo de la captura

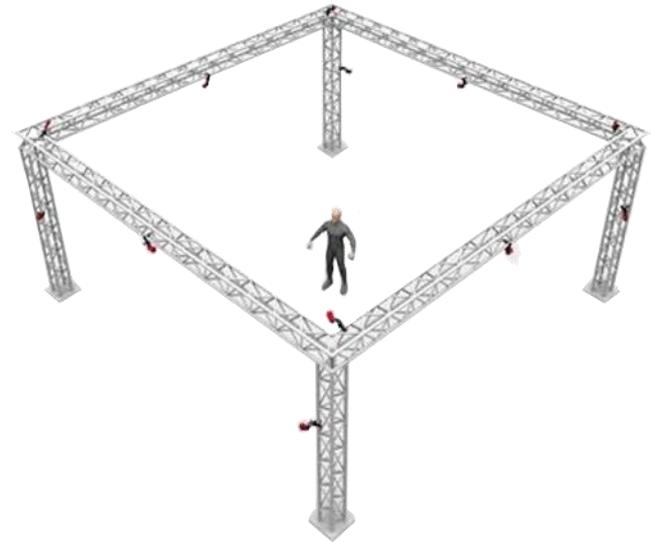


Cámaras infrarrojas



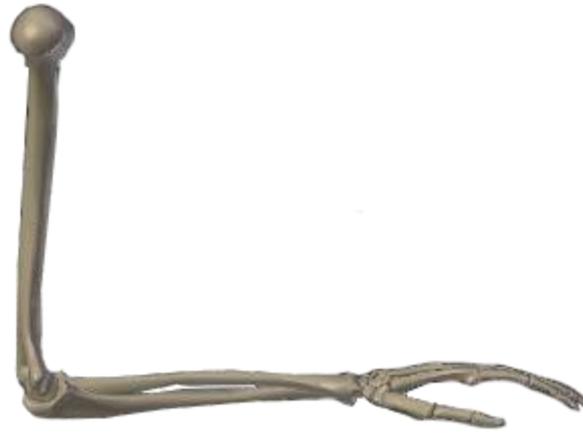
Markers pasivos

Entorno de la captura



Captura de movimiento

Modelo estudiado



3 sólidos → Húmero
→ Antebrazo
→ Mano

8 marcadores

Captura de movimiento

Problemas de la captura óptica

- Pérdidas temporales de los marcadores
⇒ Oclusiones
- Efecto piel
- Interferencias de la luz del entorno

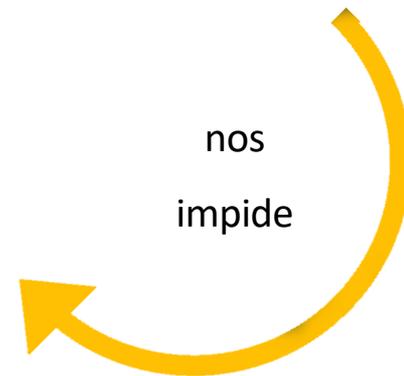
Método tradicional de trabajo en la captura



necesita

Las trayectorias completas

nos impide



Trabajar en tiempo real



nos obliga a

Situarnos en el post procesamiento de los datos

Filtro de Kalman

- La solución propuesta para intentar solventar estos fallos es el filtro de Kalman.
- Se trata de un algoritmo recursivo que permite identificar el estado oculto o no medible de un sistema dinámico lineal.
- Se sirve únicamente de:
 - Mediciones de entrada actuales
 - Estado calculado previamente
 - Matriz de incertidumbre

Filtro de Kalman

Dos
formulaciones

Lineal

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\boldsymbol{\mu}_k + \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \end{cases}$$

Extendida

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_{k-1}) \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k) \end{cases}$$

en nuestro caso

$$\mathbf{A}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{f}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_k, 0)$$

$$\mathbf{H}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{h}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}}(\tilde{\mathbf{x}}_k, 0)$$

Filtro de Kalman

Predicción

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^- + \mathbf{B}u_k$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$$

Corrección

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}\hat{\mathbf{x}}_k^-)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-$$

Estimaciones iniciales

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^-$$

$$\mathbf{P}_{k-1}$$

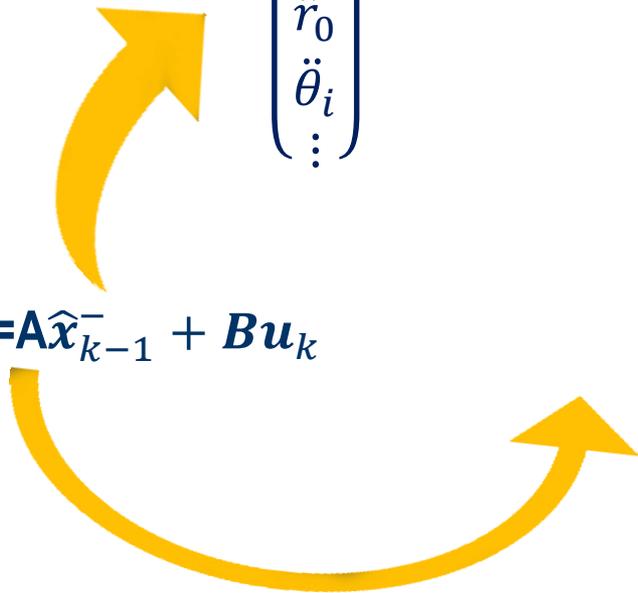
Medidas \mathbf{z}_k

Caracterización de las ecuaciones

$$x_k^- = \begin{Bmatrix} r_0 \\ \theta_i \\ \vdots \\ \dot{r}_0 \\ \dot{\theta}_i \\ \vdots \\ \ddot{r}_0 \\ \ddot{\theta}_i \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

$$\hat{x}_k^- = \mathbf{A}\hat{x}_{k-1}^- + \mathbf{B}u_k$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & T & 0 & 0 & \dots & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & T & 0 & \dots & 0 & \frac{T^2}{2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & T & \dots & 0 & 0 & \frac{T^2}{2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & T & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & T & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & T & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$



Caracterización de las ecuaciones

- Donde h viene dada por:

$$h = \begin{bmatrix} r_{m1} \\ r_{m2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \\ z_{m1} \\ x_{m2} \\ \vdots \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} r_1 = r_0 + K * R_1 * r_{m1} \\ r_2 = r_1 + K * R_2 * r_{m2} \\ r_3 = r_2 + K * R_3 * r_{m3} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \\ R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \\ R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{m1}}{\partial x_0} & \frac{\partial x_{m1}}{\partial y_0} & \frac{\partial x_{m1}}{\partial z_0} & \frac{\partial x_{m1}}{\partial \alpha_1} & \dots \\ \frac{\partial y_{m1}}{\partial x_0} & \frac{\partial y_{m1}}{\partial y_0} & & & \\ \frac{\partial z_{m1}}{\partial x_0} & & \ddots & & \\ \frac{\partial x_{m2}}{\partial x_0} & & & & \\ \vdots & & & & \end{bmatrix}$$

Caracterización de las ecuaciones

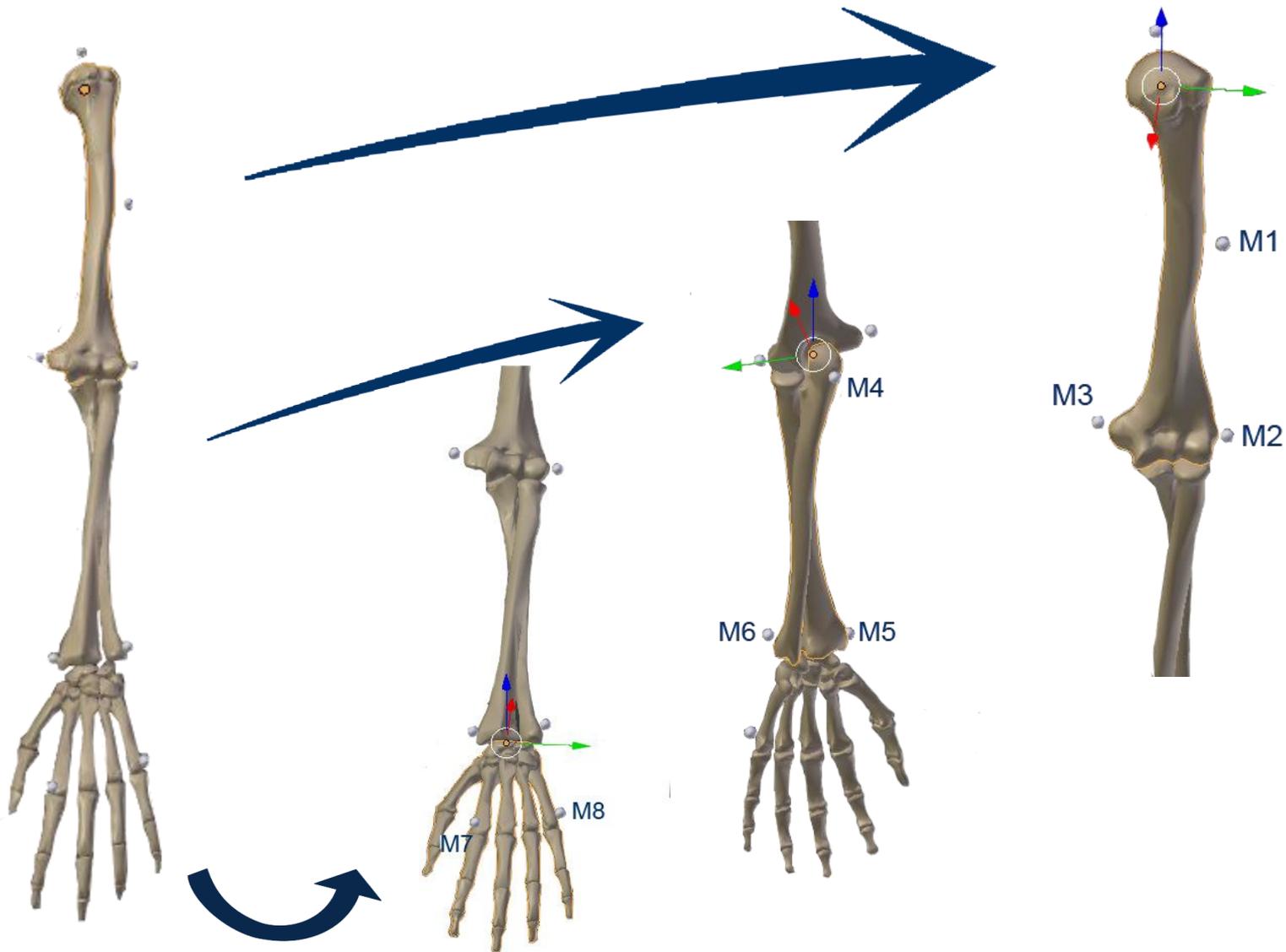
$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$R = \sigma_{sens} * I$$

$$P_k^- = A P_{K-1} A^T + Q$$

$$Q = \sigma_w * \begin{bmatrix} \frac{T^5}{20} & 0 & 0 & \dots & \frac{T^4}{8} & 0 & 0 & \dots & \frac{T^3}{6} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{T^5}{20} & 0 & \dots & 0 & \frac{T^4}{8} & 0 & \dots & 0 & \frac{T^3}{6} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{T^5}{20} & \dots & 0 & 0 & \frac{T^4}{8} & \dots & 0 & 0 & \frac{T^3}{6} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash \\ \frac{T^4}{8} & 0 & 0 & \dots & \frac{T^3}{6} & 0 & 0 & \dots & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{T^4}{8} & 0 & \dots & 0 & \frac{T^3}{6} & 0 & \dots & 0 & \frac{T^2}{2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{T^4}{8} & \dots & 0 & 0 & \frac{T^3}{6} & \dots & 0 & 0 & \frac{T^2}{2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash \\ \frac{T^3}{6} & 0 & 0 & \dots & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & \dots & T & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{T^3}{6} & 0 & \dots & 0 & \frac{T^2}{2} & 0 & \dots & 0 & T & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{T^3}{6} & \dots & 0 & 0 & \frac{T^2}{2} & \dots & 0 & 0 & T & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash & \vdots & \vdots & \vdots & \backslash \end{bmatrix}$$

Caracterización de la captura



Captura de movimiento



Resultados, 1ª simulación

La aplicación de un único factor de escala

provoca que

El filtro no funciona todo lo bien que cabría esperar

se propone para solucionarlo

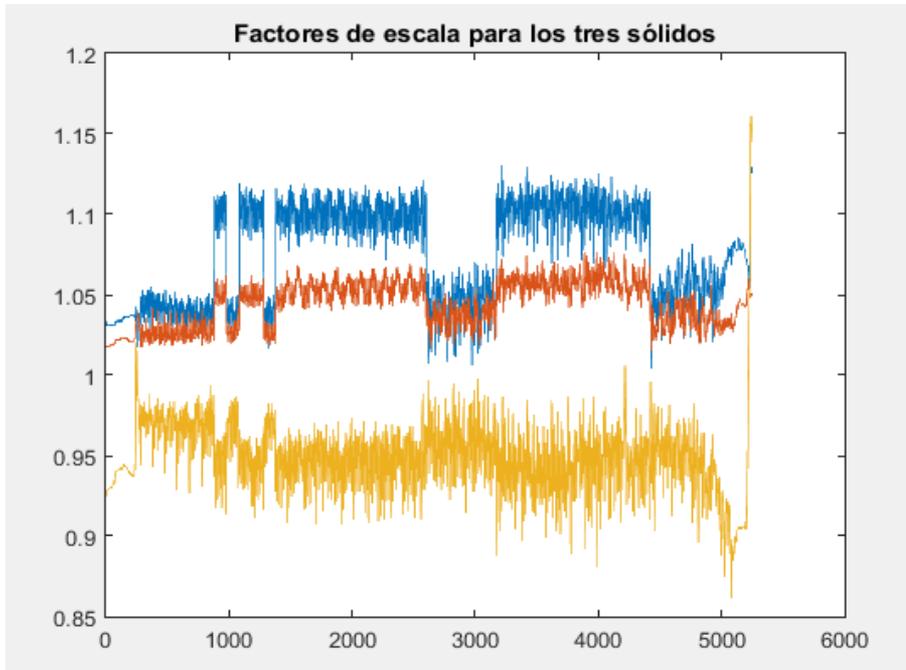
La aplicación de tres factores de escala

- Al tener tres factores de escala h cambia de forma:

$$h = \begin{bmatrix} r_{m1} \\ r_{m2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \\ z_{m1} \\ x_{m2} \\ \vdots \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} r_1 = r_0 + K_1 * R_1 * r_{m1} \\ r_2 = r_1 + K_2 * R_2 * r_{m2} \\ r_3 = r_2 + K_3 * R_3 * r_{m3} \end{cases}$$

Resultados, 2ª simulación

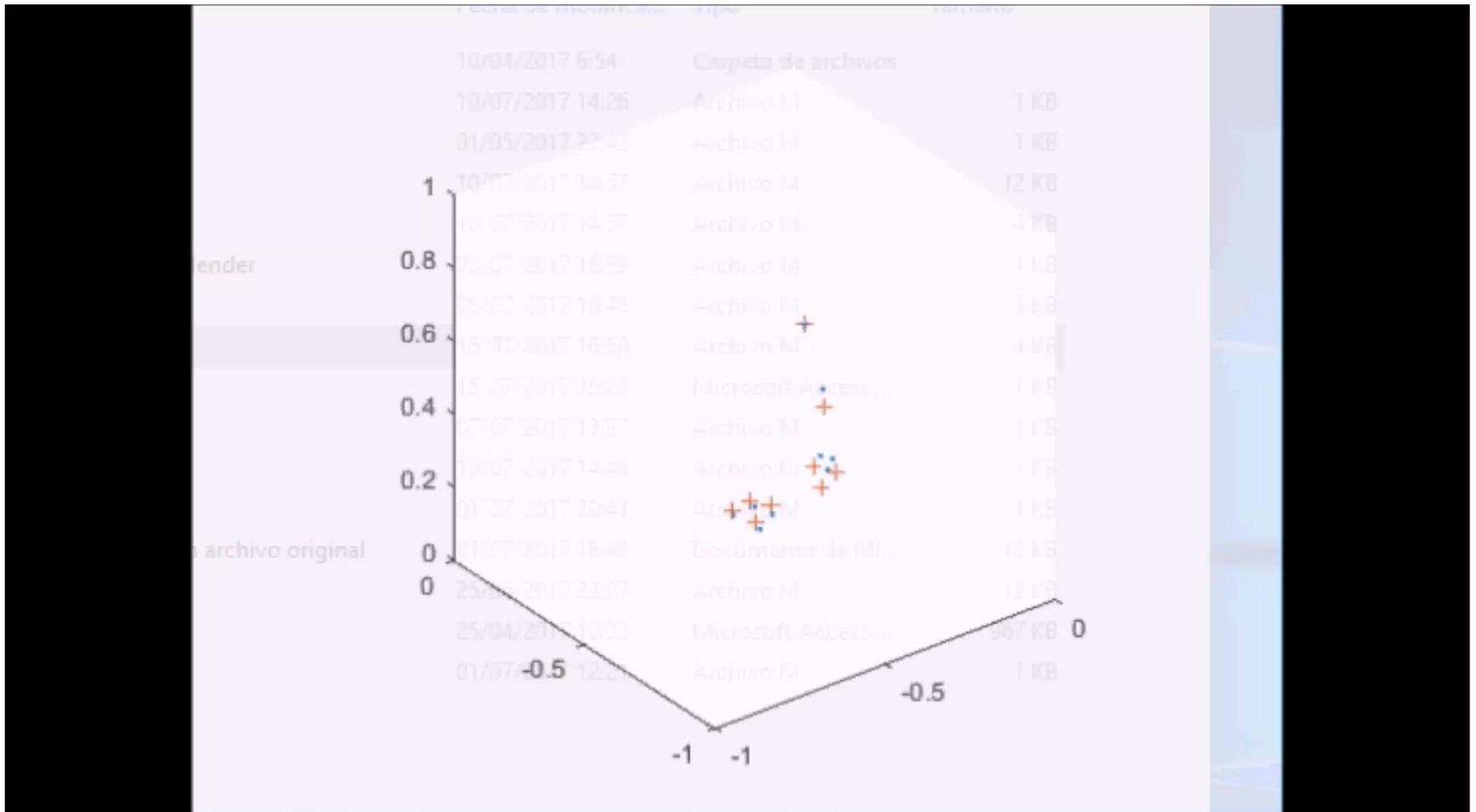
Los nuevos factores de escalado son:




$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{K_1} = 1,0757 \\ \overline{K_2} = 1,0437 \\ \overline{K_3} = 0,9506 \end{array} \right.$$

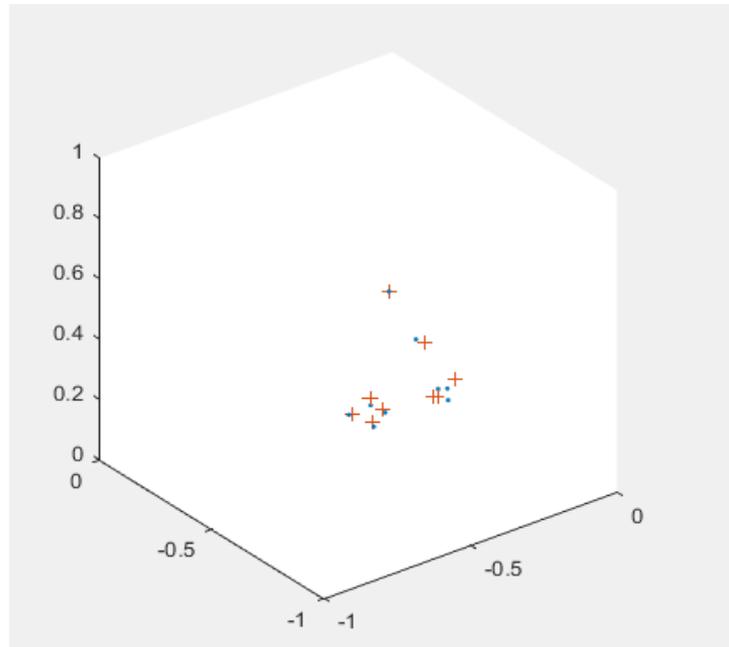


Resultados, 2ª simulación

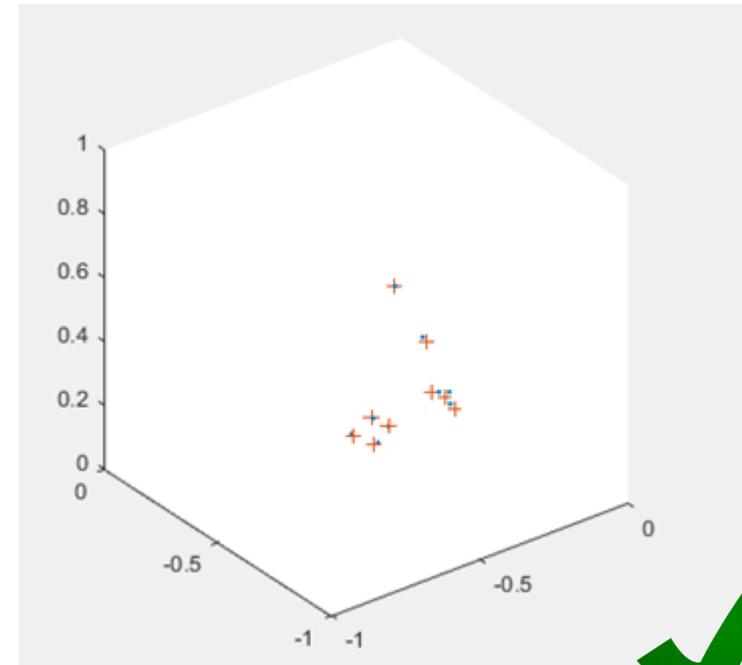


Resultados, 2ª simulación

Comparativa de la 1ª y la 2ª simulación, graficas 3D en Matlab:



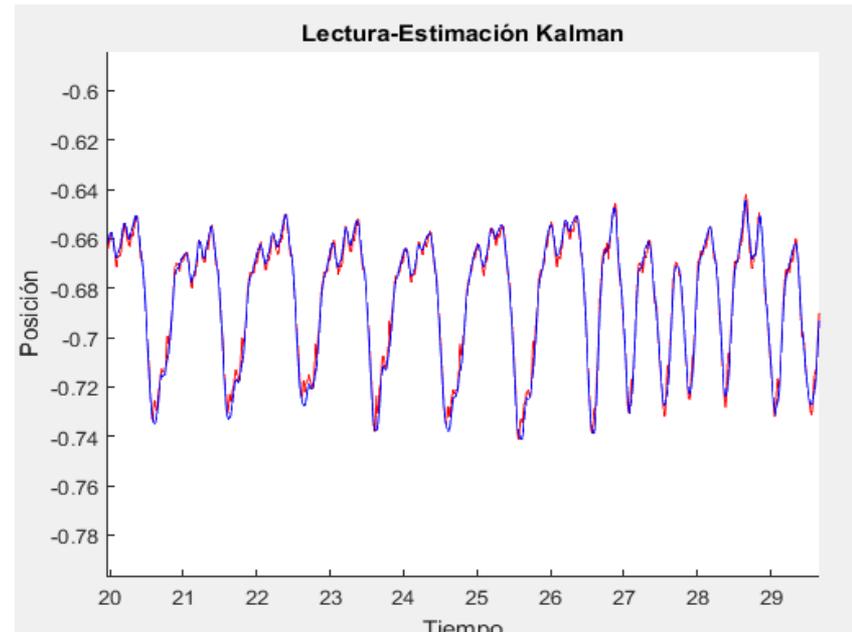
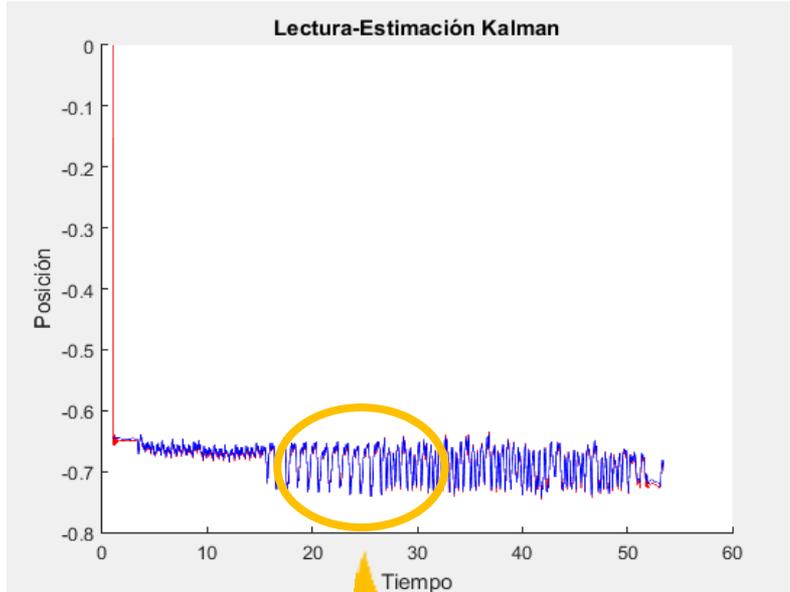
Gráfica 3D, capturas-estimaciones, de la 1ª simulación



Gráfica 3D, capturas-estimaciones, de la 2ª simulación

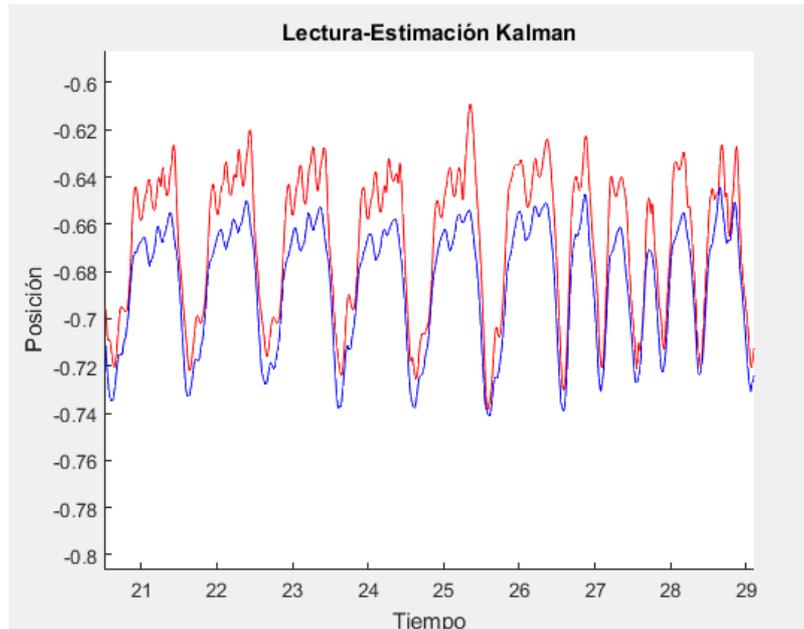
Resultados, 1ª simulación

Posición X capturada y estimada del 7º marcador:

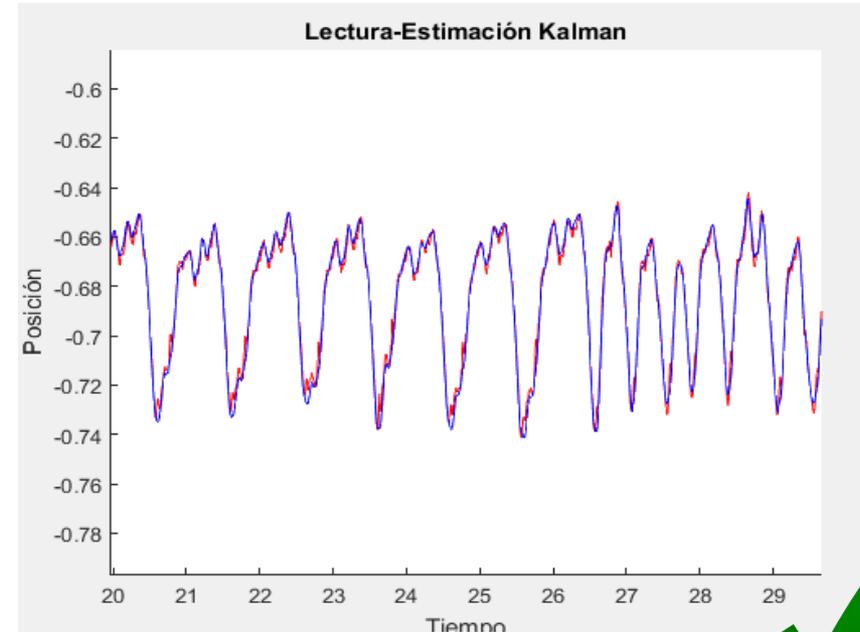


Resultados, 2ª simulación

Comparativa de la 1ª y la 2ª simulación, posición X del 7º marcador:



Posición X del 7º marcador de la 1ª simulación



Posición X del 7º marcador de la 2ª simulación



Ajuste de la 2ª simulación

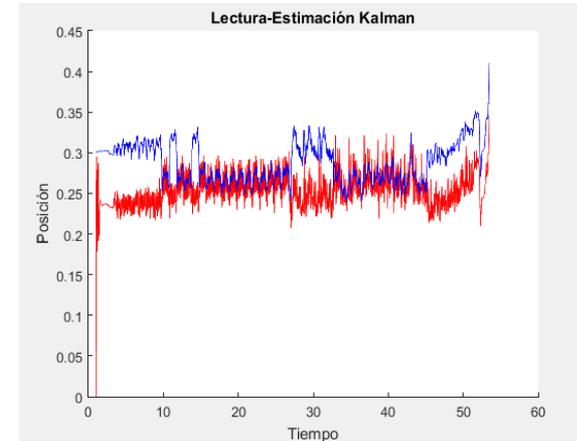
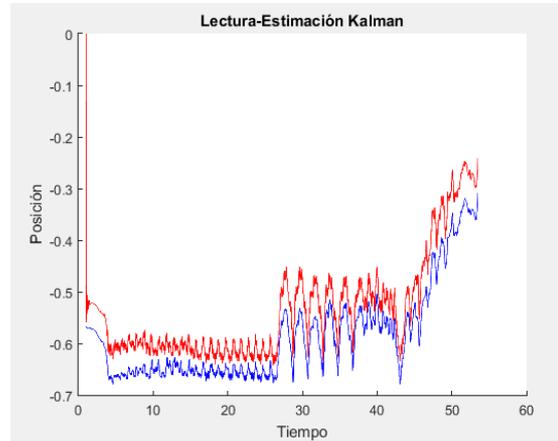
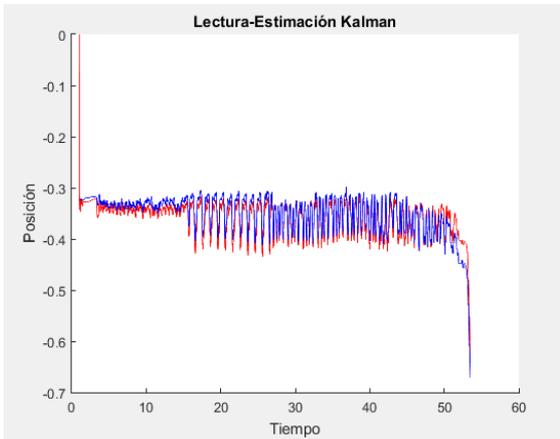
Cambios sobre los parámetros de ajuste, respecto a la 1ª simulación:

- Se modifica el parámetro σ_w , en general para todo el modelo, aumentándolo en dos órdenes de magnitud, $\sigma_w=10000000$
- σ_s se mantiene igual a 0,01 para todo el modelo, menos en los siguientes marcadores:

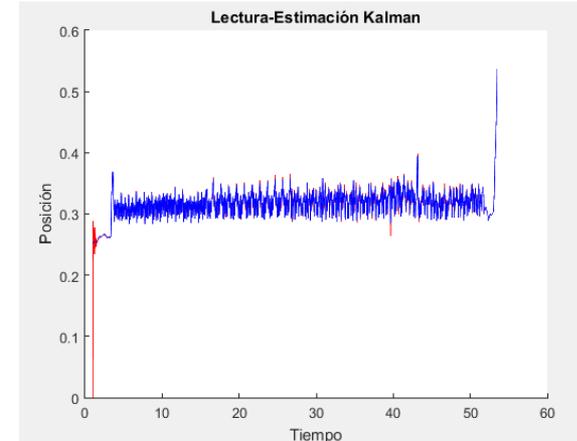
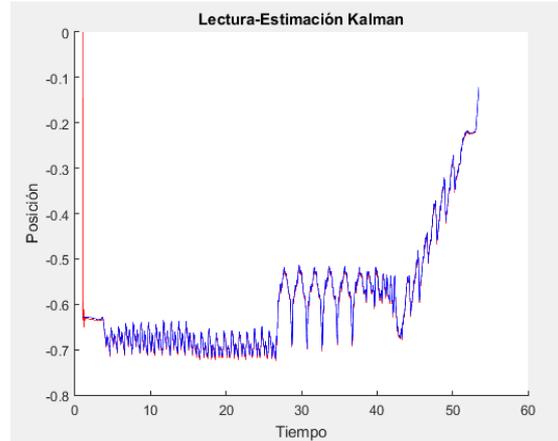
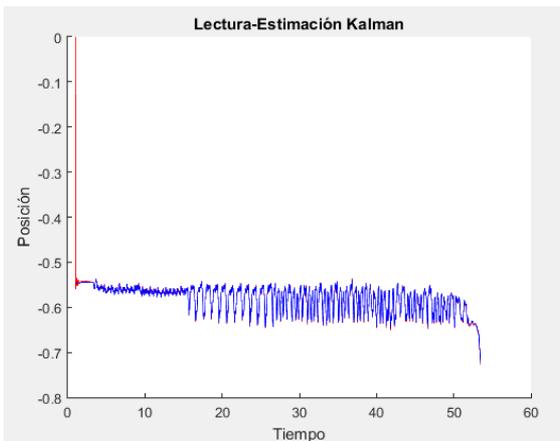
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Marcador 4} \Rightarrow \sigma_s=10000000 \\ \text{Marcador 5} \Rightarrow \sigma_s=0,0001 \\ \text{Marcador 6} \Rightarrow \sigma_s=0,0001 \end{array} \right.$$

Ajuste de la 2ª simulación

Posiciones X Y Z del 4º marcador, $\sigma_s=10000000$:

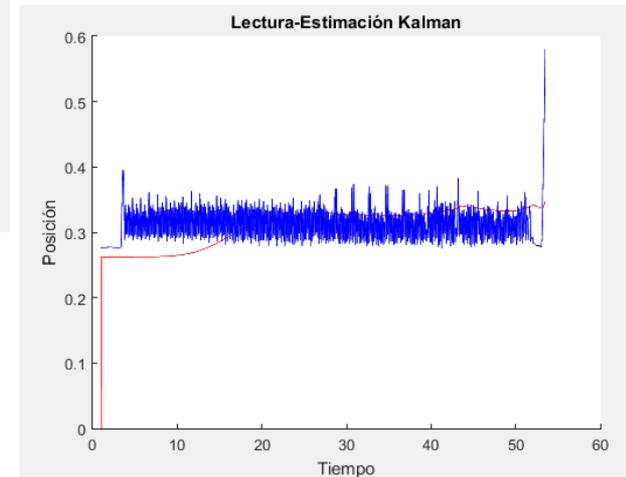
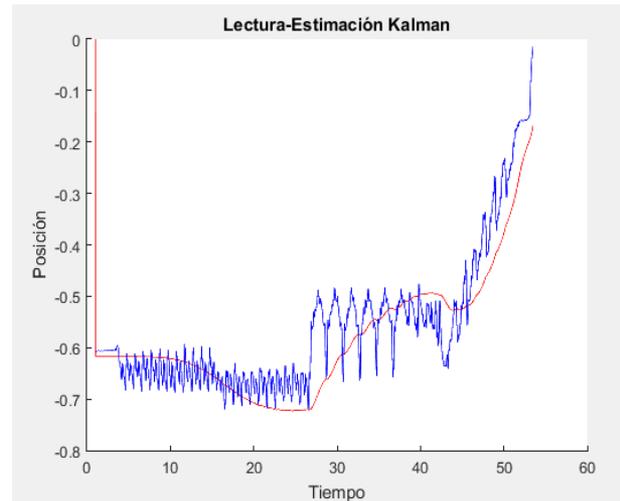
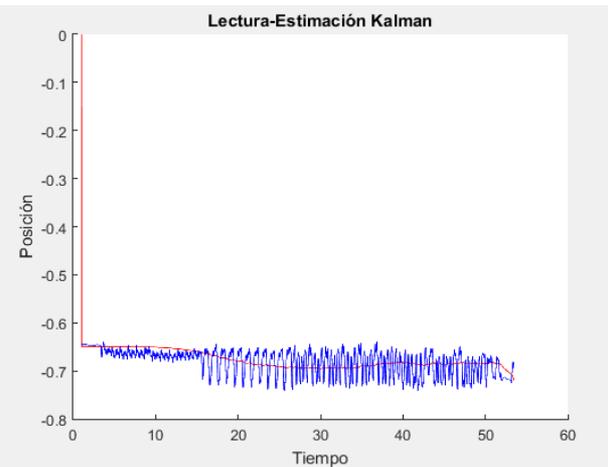


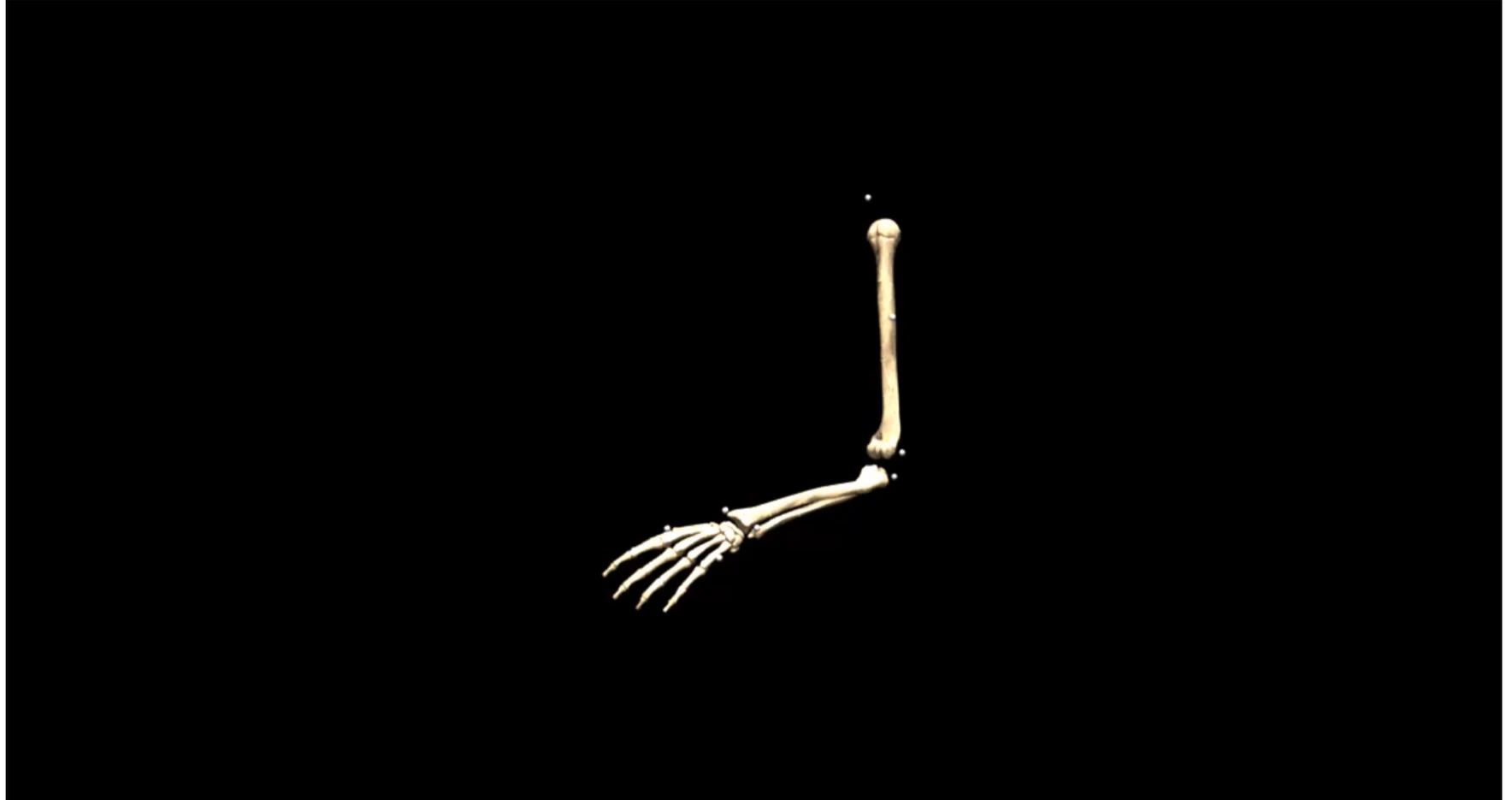
Posiciones X Y Z del 6º marcador, $\sigma_s=0,01$:



Ajustes de la 2ª simulación

Si suavizamos demasiado el movimiento, la posiciones X Y Z del 7º marcador son:





Conclusiones

- Se ha conseguido implementar un filtro de Kalman para captura de movimiento.
 - El filtro de Kalman es un estimador de estados óptimo, así que si el modelo está bien ajustado nos garantiza la mejor estimación.
 - Es un algoritmo recursivo, lo que lo hace muy eficiente y apto para aplicaciones de tiempo real.
 - ↳ Ejemplo: rehabilitación con biofeedback, que es cuando el paciente hace movimientos delante de una pantalla y se ve a sí mismo, con información superpuesta.
 - Al propagar los estados integrando velocidades y aceleraciones, podemos seguir avanzando aunque se pierda algún sensor temporalmente, lo que mejora la robustez para tiempo real.
 - El proceso de personalización se debe de realizar intentando escalar el mayor número de sólidos o partes de este posible.

Mejoras sobre el modelo actual:

- Mejorar el proceso de adaptación y escalado realizando una división mayor del modelo, en cuanto a número de sólidos a escalar.
- Expandir el modelo actual y llevarlo a un modelo de esqueleto completo.

Proyecto futuro:

- Trasladar la personalización del modelo y la estimación del movimiento, del post procesamiento de los datos, a realizarlo al mismo tiempo que se realiza la captura, en una captura en tiempo real.

