

S3 – Etude des mouvements humains et du couplage humain-robot

L. Courty, L. Moreno, P. René,
Q. Vermot des Roches, I. Yeterian

Sommaire:

A. CONTEXTE

1. Pourquoi étudier les mouvements humains ?
2. Modèle de bras retenu
3. Angles possibles pour les articulations

B. CINEMATIQUE

1. Modèle cinématique du bras humain
2. Positions humaines atteignables
3. Modèle cinématique du bras robotique

C. COUPLAGE

1. Fermeture cinématique simplifiée
2. Matrices de couplage
3. Schéma-blocs et réponse animée
4. Résultats pour le système simplifié
5. Adaptation de la démarche au couplage bras humain – bras exosquelette

A.1. Pourquoi étudier les mouvements humains ?

- Déterminer les plages angulaires des articulations
- Déterminer les positions atteignables par le bras

→ Créer un exosquelette permettant des mouvements:

- Réalistes
- Sans danger
- Agréables



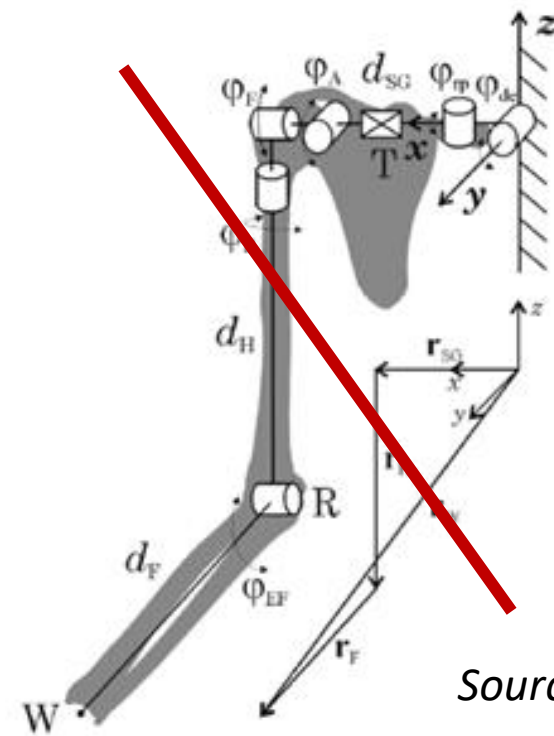
A.2. Modèle de bras retenu

- ✗ Omoplate+Clavicule+Epaule = 6 liaisons: trop complexe
- ✗ Poignet et main hors du cadre d'étude
- ✓ Modèle retenu: Système épaule+coude à poignet fixe = 4 DDL

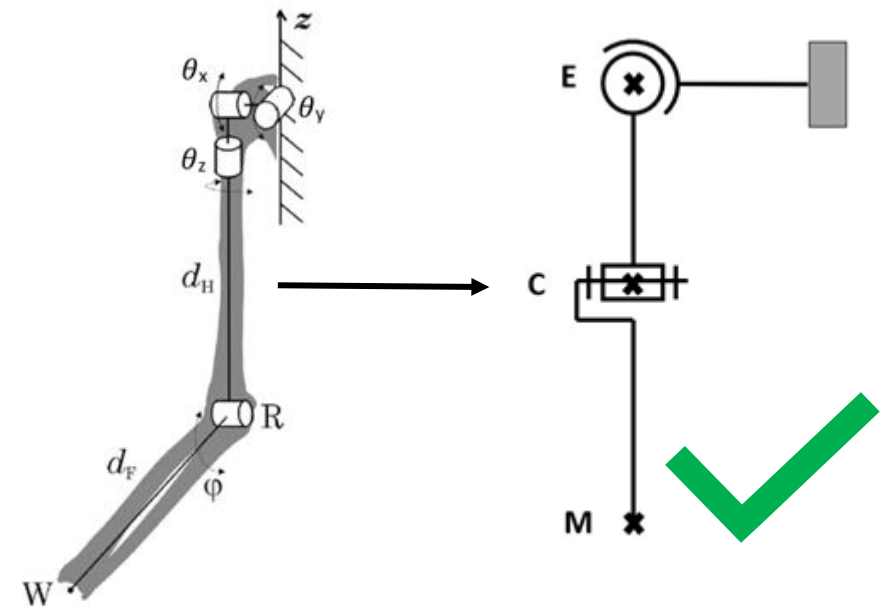
Paramétrage:

EC=b=31,62cm longueur entre le centre de l'épaule et le coude

CM=a=43,18cm longueur de l'avant-bras et de la main



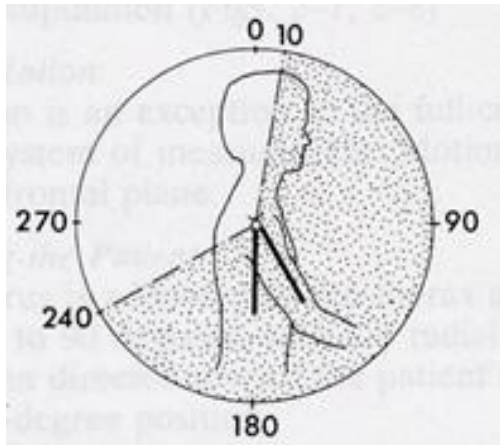
Source: N. Klopčar, 2007



A.3. Angles possibles pour les articulations

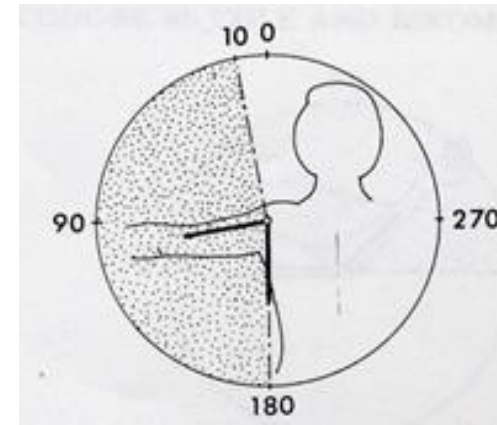
Source: Cours de biomécanique des membres supérieurs de l'Université Laval, Québec

NB: Notre choix d'angle 0° est différent, d'où des valeurs décalées par rapport aux schémas

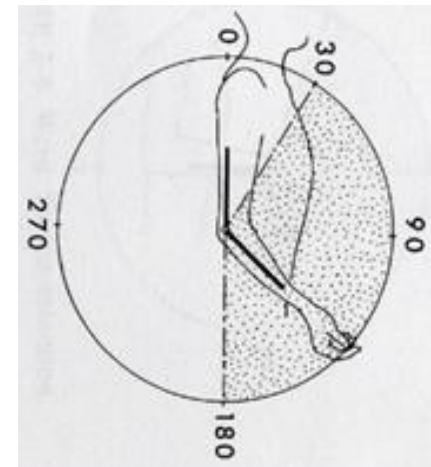


Angle de flexion/extension de l'épaule: $\theta_x \in [-60^\circ ; 170^\circ]$

On détermine expérimentalement : $\theta_z \in [-60^\circ ; 90^\circ]$



Angle d'abduction/adduction de l'épaule: $\theta_y \in [0^\circ ; 170^\circ]$



Angle de flexion/extension du coude: $\varphi \in [-60^\circ ; 170^\circ]$

B.1. Modèle cinématique du bras humain

Matrices de transformation homogène

$T_{\theta_x} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$T_{\theta_z} =$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$T_{\theta_y} =$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$T_{\phi} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) & -\frac{1581}{50} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

NB: $-1581/50 = -b$

On pose les matrices de transition liées à chacune des 4 liaisons 1DDL.

Cela permet notamment de déterminer la position du coude.

$posi_coude =$

$$\begin{pmatrix} -\frac{1581 \sin(\theta_y)}{50} \\ \frac{1581 \cos(\theta_y) \sin(\theta_x)}{50} \\ -\frac{1581 \cos(\theta_x) \cos(\theta_y)}{50} \end{pmatrix}$$

B.1. Modèle cinématique du bras humain

Vecteur position de la main
(à l'extrémité des doigts)

On obtient également la position de la main :

position =

$$\begin{pmatrix} -\frac{1581 \sin(\theta_y)}{50} - \frac{2159 \cos(\phi) \sin(\theta_y)}{50} - \frac{2159 \cos(\theta_y) \sin(\phi) \sin(\theta_z)}{50} \\ \frac{1581 \cos(\theta_y) \sin(\theta_x)}{50} + \frac{2159 \sin(\phi) (\cos(\theta_x) \cos(\theta_z) - \sin(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z))}{50} + \frac{2159 \cos(\phi) \cos(\theta_y) \sin(\theta_x)}{50} \\ \frac{2159 \sin(\phi) (\cos(\theta_z) \sin(\theta_x) + \cos(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z))}{50} - \frac{1581 \cos(\theta_x) \cos(\theta_y)}{50} - \frac{2159 \cos(\phi) \cos(\theta_x) \cos(\theta_y)}{50} \end{pmatrix}$$

B.1. Modèle cinématique du bras humain

Matrice jacobienne du bras humain

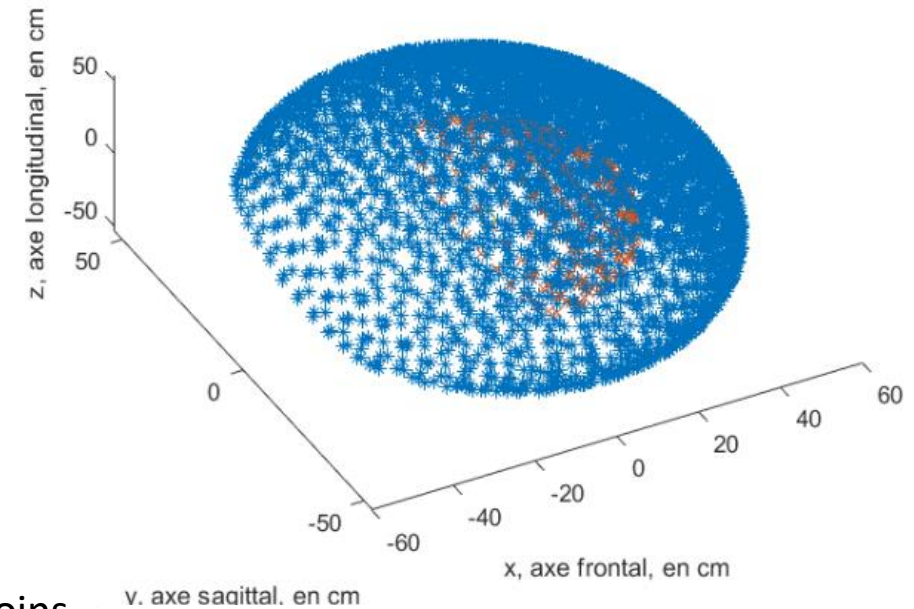
$$\begin{pmatrix} 0 & as\varphi s\theta_y s\theta_z - ac\varphi c\theta_y - bc\theta_y & -ac\theta_y c\theta_z s\varphi & as\varphi s\theta_y - ac\varphi c\theta_y s\theta_z \\ bc\theta_x c\theta_y - as\varphi\sigma_2 + bc\varphi c\theta_x c\theta_y & -bs\theta_x s\theta_y - ac\varphi s\theta_x s\theta_y - ac\theta_y s\varphi s\theta_x s\theta_z & -as\varphi c\theta_x s\theta_z + c\theta_z s\theta_x s\theta_y & ac\varphi\sigma_1 - as\varphi c\theta_y s\theta_x \\ bc\theta_y s\theta_x + as\varphi\sigma_1 + bc\varphi c\theta_y s\theta_x & bc\theta_x s\theta_y + ac\varphi c\theta_x s\theta_y - ac\theta_x c\theta_y s\varphi s\theta_z & -as\varphi s\theta_x s\theta_z - c\theta_x c\theta_z s\theta_y & ac\varphi\sigma_2 + ac\theta_x c\theta_y s\varphi \\ 0 & s\theta_y & s\theta_y & c\varphi s\theta_y + c\theta_y s\varphi s\theta_z \\ -s\theta_x & \sigma_3 & \sigma_3 & -s\varphi\sigma_1 - c\theta_y c\varphi s\theta_x \\ c\theta_x & \sigma_4 & \sigma_4 & c\varphi c\theta_x c\theta_y - s\varphi\sigma_2 \end{pmatrix}$$

$$\text{où : } \begin{cases} \sigma_1 = \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sigma_2 = \cos \theta_z \sin \theta_x + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sigma_3 = -\cos \theta_y \sin \theta_x \\ \sigma_4 = \cos \theta_x \cos \theta_y \end{cases}$$

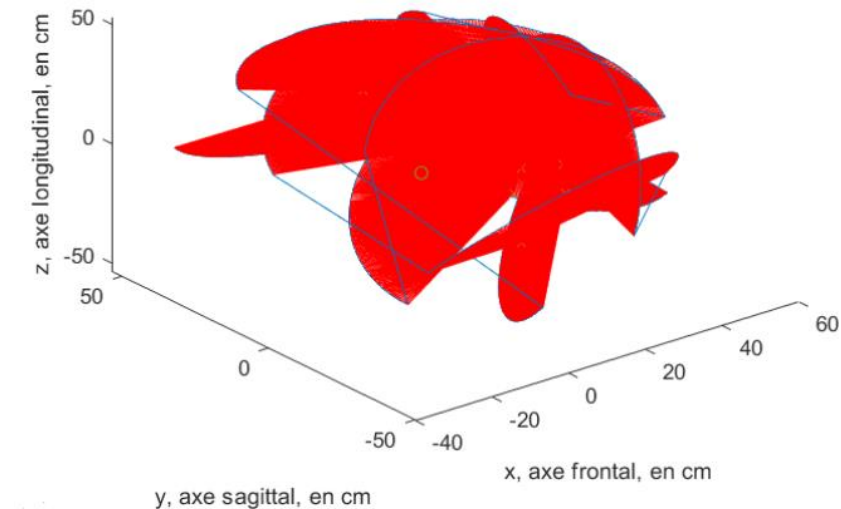
B.2. Positions atteignables humaines:

(NB: l'épaule se trouve en (0,0,0), on utilise uniquement les débattements angulaires précédents, le corps n'est pas pris en compte comme obstacle)

On utilise MatLab pour tracer un nuage de points atteignables par le coude (orange) et la main (bleu):



On représente cette fois avec moins de points les positions du coude et la surface recouverte par l'avant-bras:



B.3. Modèle cinématique du bras robotique

Matrices de transformation homogène

$T_{\theta_x} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$T_{\theta_z} =$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Quand c et d tendent vers 0 on retrouve en principe les matrices de transformation associées au bras humain.

$T_{\theta_y} =$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$T_{\phi} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) & -b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

position =

$$\begin{pmatrix} c - a (\cos(\phi) \sin(\theta_y) + \cos(\theta_y) \sin(\phi) \sin(\theta_z)) - b \sin(\theta_y) - d \sin(\theta_y) \\ a (\sin(\phi) (\cos(\theta_x) \cos(\theta_z) - \sin(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z)) + \cos(\phi) \cos(\theta_y) \sin(\theta_x)) + b \cos(\theta_y) \sin(\theta_x) + d \cos(\theta_y) \sin(\theta_x) \\ a (\sin(\phi) (\cos(\theta_z) \sin(\theta_x) + \cos(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z)) - \cos(\phi) \cos(\theta_x) \cos(\theta_y)) - b \cos(\theta_x) \cos(\theta_y) - d \cos(\theta_x) \cos(\theta_y) \end{pmatrix}$$

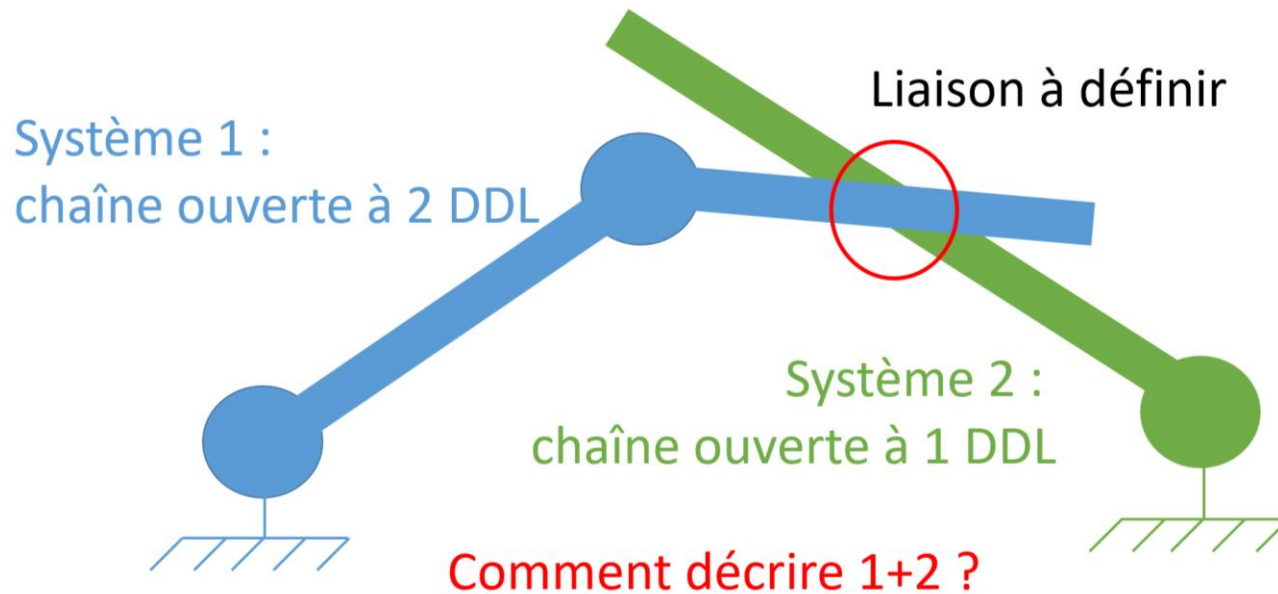
B.3. Modèle cinématique du bras robotique

Matrice jacobienne du bras robotique

$$\begin{pmatrix} 0 & -as\varphi s\theta_y s\theta_z - c\varphi c\theta_y - bc\theta_y - dc\theta_y & -ac\theta_y c\theta_z s\varphi & as\varphi s\theta_y - ac\varphi c\theta_y s\theta_z \\ bc\theta_x c\theta_y - as\varphi\sigma_2 - \sigma_4 + dc\theta_x c\theta_y & -bs\theta_x s\theta_y - ac\varphi s\theta_x s\theta_y - ac\theta_y s\varphi s\theta_x s\theta_z - ds\theta_x s\theta_y & -as\varphi c\theta_x s\theta_z + c\theta_z s\theta_x s\theta_y & ac\varphi\sigma_1 - as\varphi c\theta_y s\theta_x \\ bc\theta_y s\theta_x + as\varphi\sigma_1 + \sigma_3 + dc\theta_y s\theta_x & bc\theta_x s\theta_y + ac\varphi c\theta_x s\theta_y + ac\theta_x c\theta_y s\varphi s\theta_z + dc\theta_x s\theta_y & -as\varphi s\theta_x s\theta_z - c\theta_x c\theta_z s\theta_y & ac\varphi\sigma_2 + ac\theta_x c\theta_y s\varphi \\ 0 & s\theta_y & s\theta_y & c\varphi s\theta_y + c\theta_y s\varphi s\theta_z \\ -s\theta_x & & \sigma_5 & -s\varphi\sigma_1 - \sigma_3 \\ c\theta_x & \sigma_4 & \sigma_6 & \sigma_4 - s\varphi\sigma_2 \end{pmatrix}$$

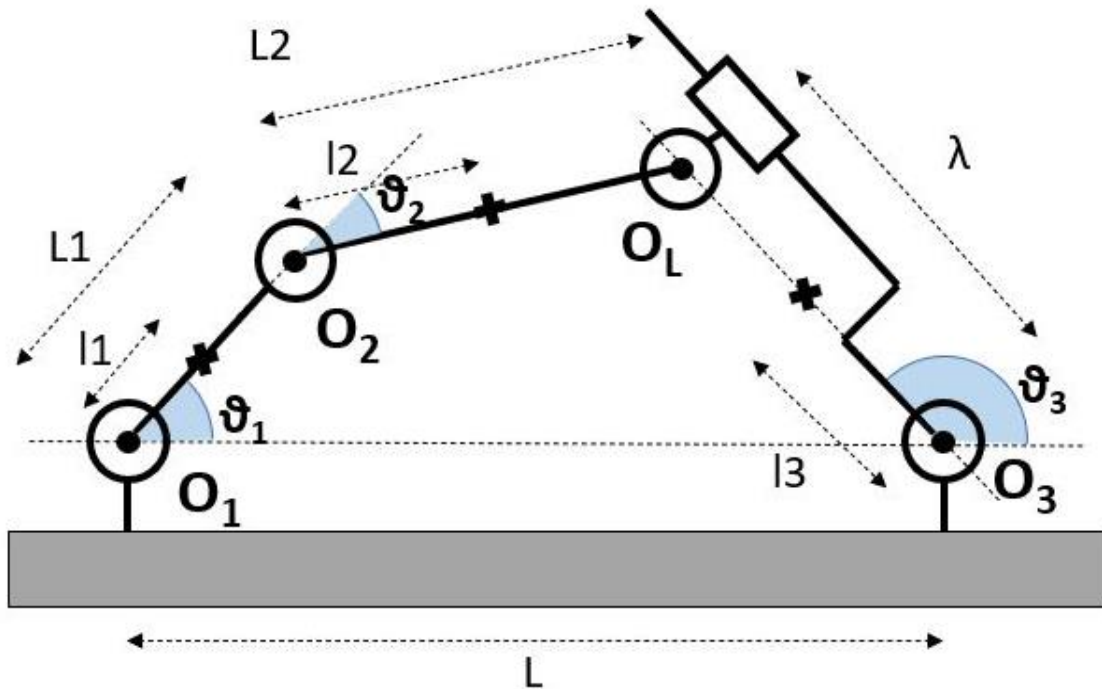
$$\text{où : } \begin{cases} \sigma_1 = \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sigma_2 = \cos \theta_z \sin \theta_x + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sigma_3 = \cos \phi \cos \theta_y \sin \theta_x \\ \sigma_4 = \cos \phi \cos \theta_x \cos \theta_y \\ \sigma_5 = -\cos \theta_y \sin \theta_x \\ \sigma_6 = \cos \theta_x \cos \theta_y \end{cases}$$

C.1. Fermeture cinématique simplifiée



- Système à 2+1 DDL
- Objectifs: Comprendre un couplage basique entre deux systèmes, déterminer les conditions et liaisons appropriées
- Première tentative avec seulement un pivot pour appréhender le problème

C.1. Fermeture cinématique simplifiée



- Liaison choisie : pivot + glissière

C.1. Fermeture cinématique simplifiée

Pour un système polyarticulé, les équations de Lagrange peuvent s'écrire sous la forme :

$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

$$G_{1+2+3} = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & G_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_{ext} = \begin{bmatrix} Cm_1 & Cm_2 & Cm_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Système 1 :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11}(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) & C_{12}(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) \\ C_{21}(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) & C_{22}(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(\theta_1, \theta_2) \\ G_2(\theta_1, \theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{m1} \\ C_{m2} \end{bmatrix}$$

Système 2 :

$$A_{33}\ddot{\theta}_3 + C_{33}(\theta_3, \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3 + G_3(\theta_3) = C_{m3}$$

C.2. Matrices de couplage

Régularisation de type "Thikinov"

Dynamique des deux
chaînes ouvertes (3 lignes)

$$\begin{matrix} \text{Dynamique des deux} \\ \text{chaînes ouvertes (3 lignes)} \\ \text{Fermeture cinématique (1 ligne)} \end{matrix} \rightarrow \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{F} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C(q, \dot{q}) & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ F \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} G(q) - C_m \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$A_{1+2+3} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = (B_1 \quad B_2 \quad B_3)$$

$$B_1 = (L_1 \cdot z \wedge \mathbf{r}_2 + L_2 \cdot z \wedge \mathbf{r}_2) \cdot (z \wedge \mathbf{r}_3)$$

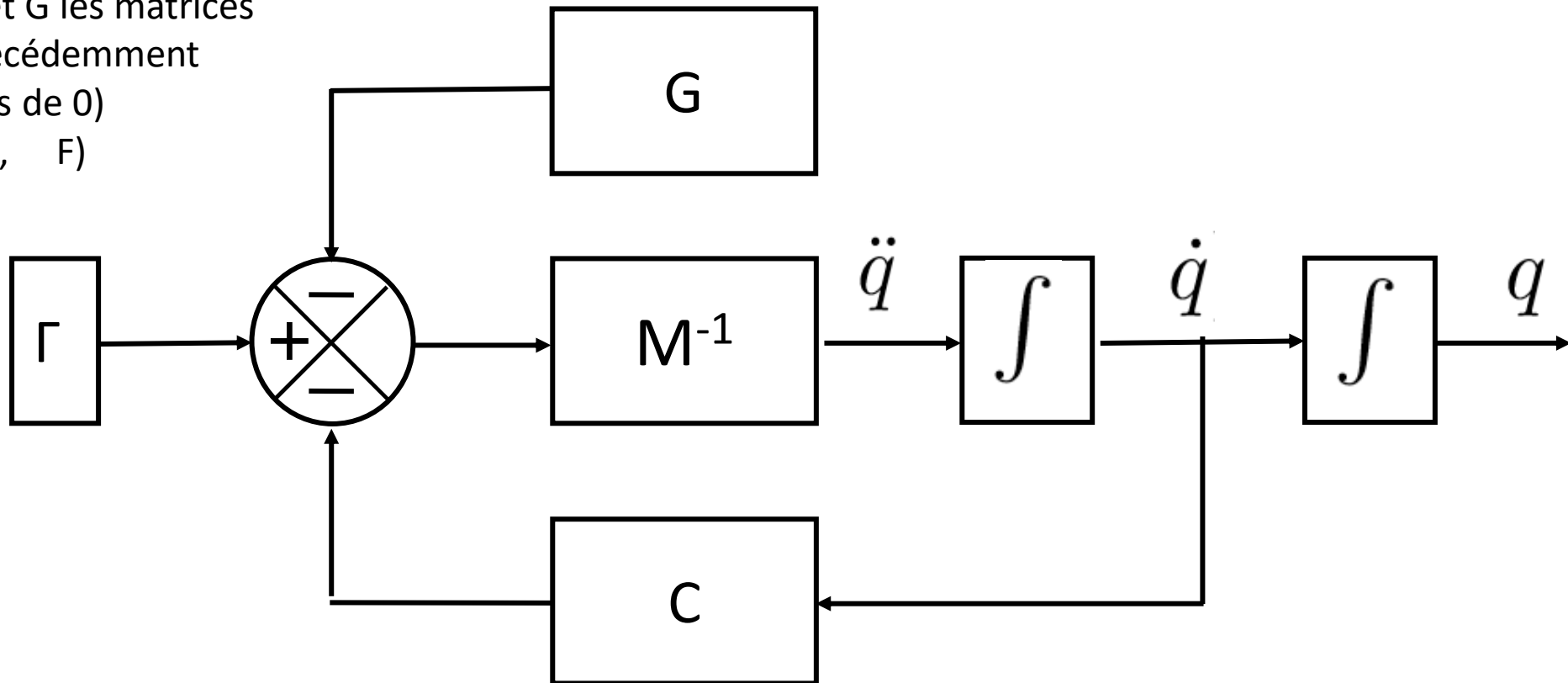
$$B_2 = L_2 \cdot (z \wedge \mathbf{r}_2) \cdot (z \wedge \mathbf{r}_3)$$

$$B_3 = -(L_1 \cdot \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2 + L_2 \cdot \mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{r}_3)$$

C.3. Schéma-blocs

$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

- Avec M , C et G les matrices définies précédemment (complétées de 0)
- $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, F)$



```

:signals.values;
:ta1);
:ta2);
:ta3);

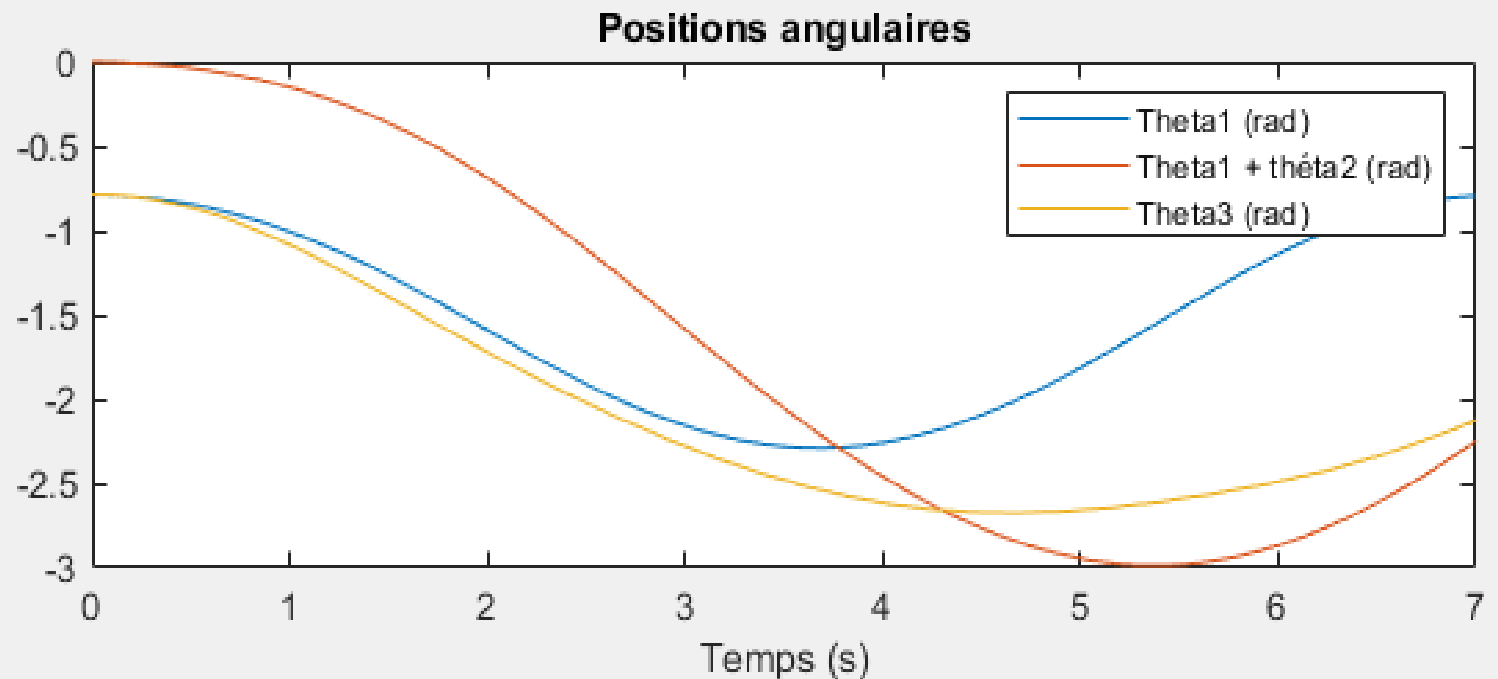
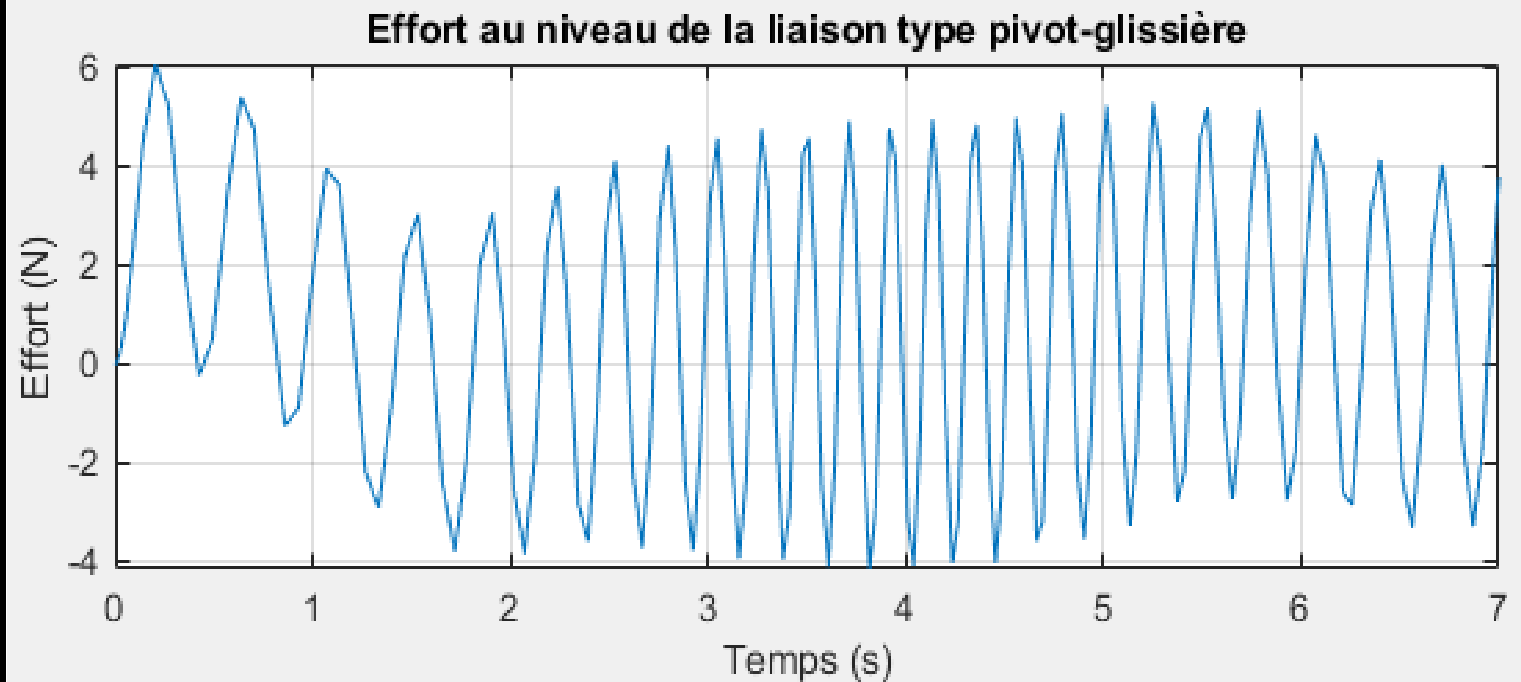
:l(i));
:a1(i));
:ta1(i)) + L2*cos(theta1(i)+theta2(i));
:a1(i)) + L2*sin(theta1(i) + theta2(i));

:(theta3(i));
:a3(i));
:os(theta3(i));
:in(theta3(i));
[0 x1], 'YData', [0 y1]);
[x1 x2], 'YData', [y1 y2]);

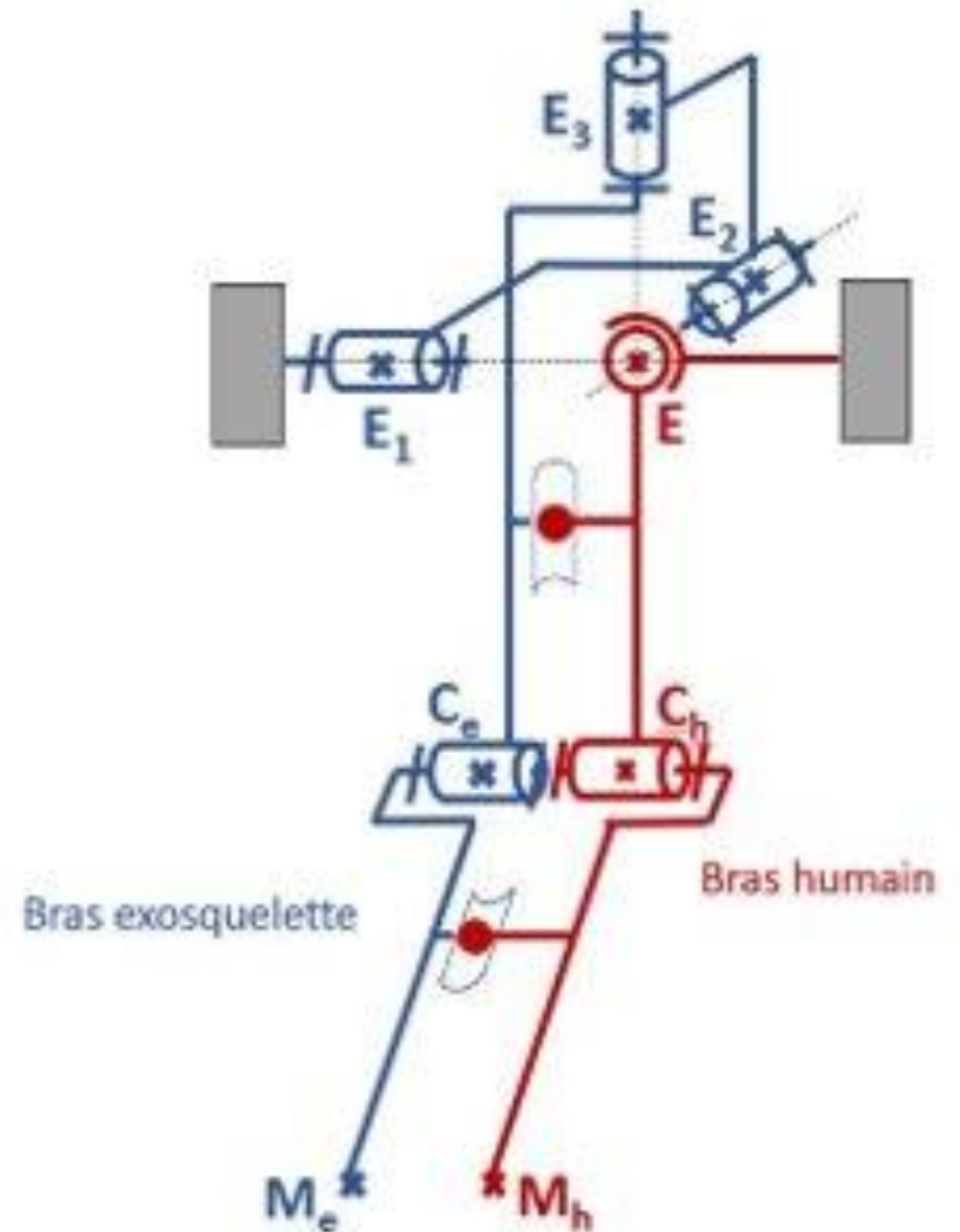
```

C.4. Résultats pour le système simplifié

- Réponse libre (pas de couple appliqué)



C.5. : Adaptation de la démarche au couplage bras humain – bras exosquelette



Conclusion

- Prendre en considération les mouvements de l'épaule en complexifiant par rapport au modèle de la rotule
- Utilisation des résultats du groupe S5
- Point important retenu dans notre démarche : toujours essayer de trouver un sens à ce qu'on écrit et confronter tous les résultats intermédiaires à notre esprit critique