

CENTRIFUGEUSE HUMAINE

Présentation

L'élargissement du domaine de vol des avions de combat modernes soumet les pilotes de chasse à des niveaux d'accélération de plus en plus élevés. L'accélération ressentie par le pilote est généralement exprimée en « équivalent » pesanteur noté G ($1\text{ G} = 9,81\text{ m/s}^2$).

Dans le cadre de l'entraînement physiologique des pilotes, l'utilisation d'une centrifugeuse humaine est un moyen avantageux de recréer, au niveau du sol, l'accélération subie en opération. La **figure 1** présente une centrifugeuse humaine qui est service depuis 1997 au centre d'entraînement de Brétigny / Orge où l'on reconnaît une structure cinématique ouverte à quatre corps (support, bras, anneau, nacelle) assemblés par liaison pivot.

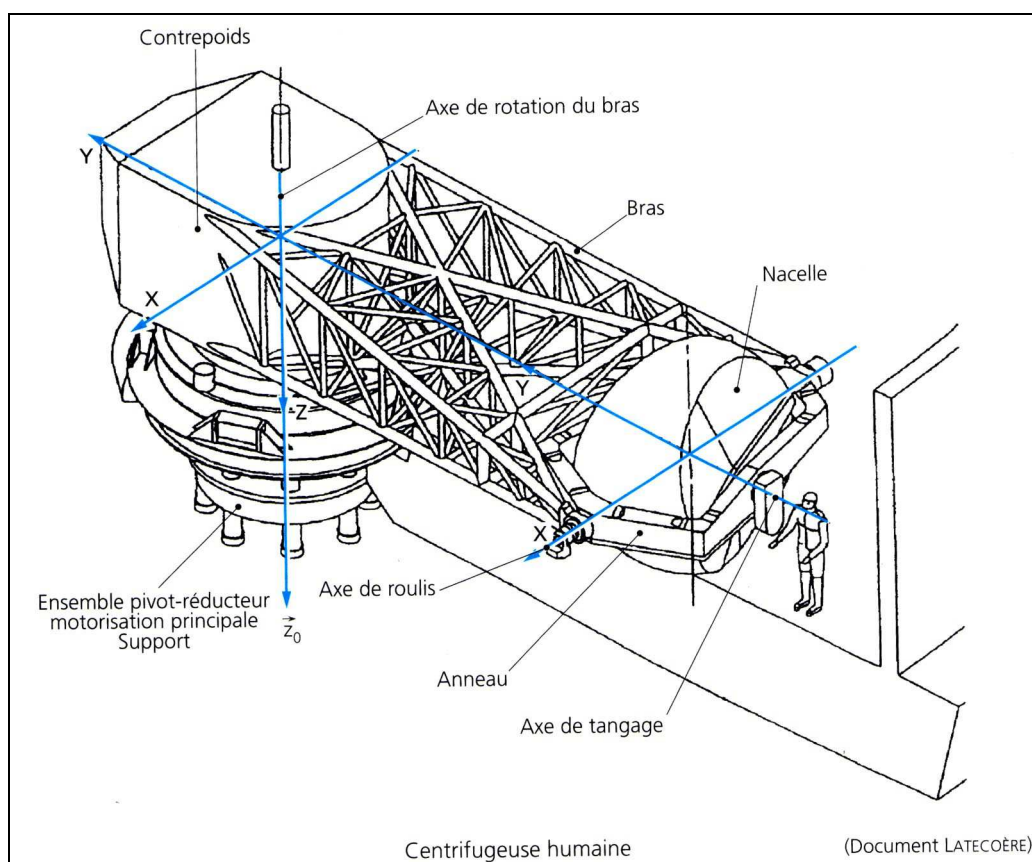


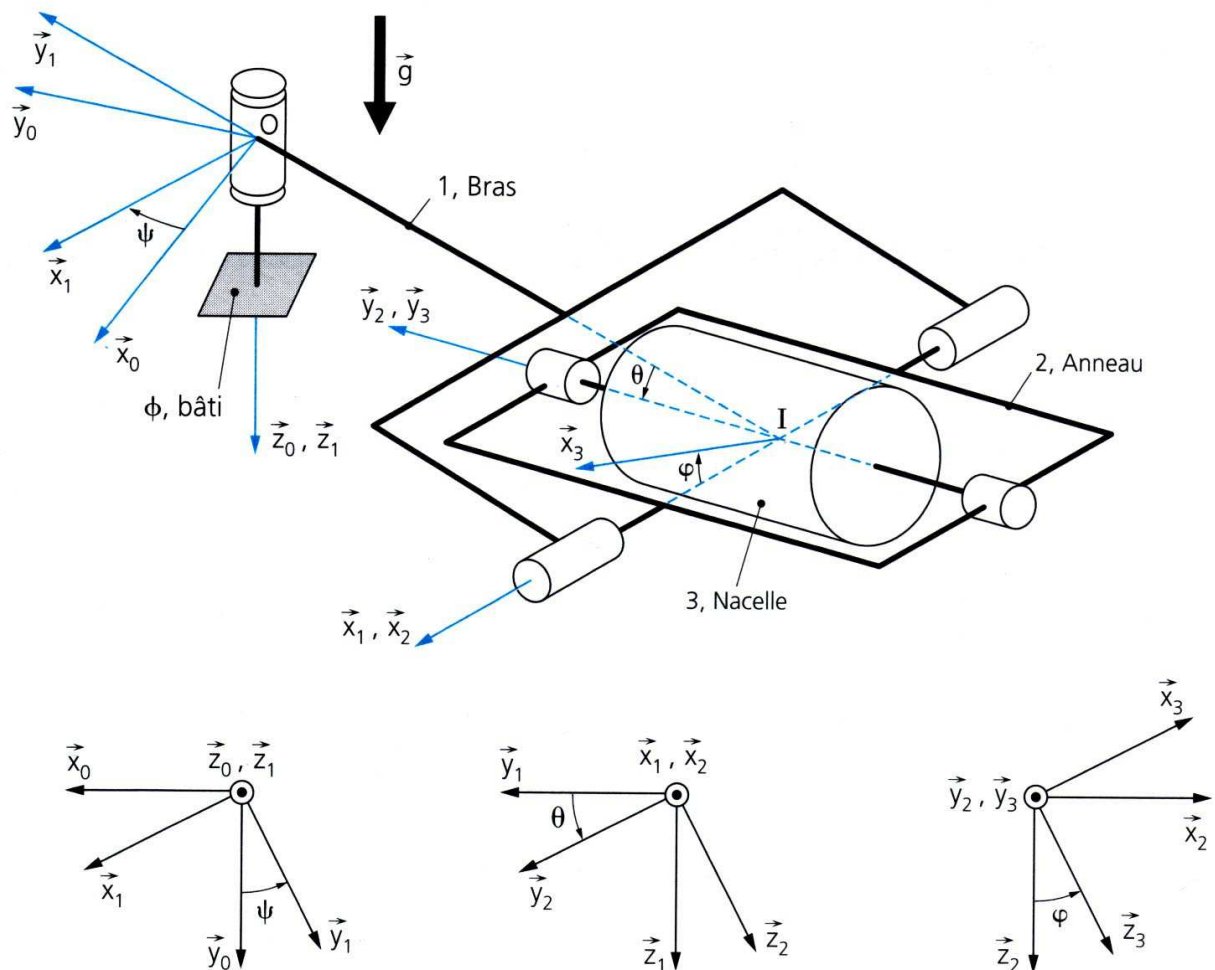
Figure 1

Cette conception permet de lier de façon univoque, les profils de position (ou de vitesse) relative engendrés au niveau de chaque liaison, à l'évolution temporelle des trois composantes d'accélération. Ainsi, les consignes de position ou de vitesse à appliquer aux liaisons sont directement déduites de l'accélération à reproduire. Chaque liaison est alors motorisée par un actionneur qui doit être asservi à la consigne correspondante et insensible aux perturbations (couple de pesanteur, couplages inertiels, frottements aux liaisons...). La vitesse de rotation du bras ($\omega = \dot{\psi}$) détermine l'intensité de l'accélération imposée au pilote. L'orientation de la nacelle en roulis (θ) et tangage (φ) fixe la direction de l'accélération imposée au pilote.

La **figure 2** représente le modèle de la centrifugeuse à étudier. Elle est constituée :

- d'un bras **1** de longueur $OI = R$, en liaison pivot d'axe $(O, \vec{z}_0)$ par rapport à un bâti Φ , sa position est paramétrée par l'angle ψ .
- d'un anneau **2** en liaison pivot d'axe $(I, \vec{x}_1)$ et de paramètre θ par rapport à l'axe $(O, \vec{y}_1)$ lié au bras **1**, θ est appelé l'angle de roulis.
- d'une nacelle **3** dans laquelle prend place le pilote, en liaison pivot d'axe $(I, \vec{y}_2)$ et de paramètre φ par rapport à l'axe $(I, \vec{x}_2)$ lié à l'anneau **2**, φ est appelé angle de tangage.

L'actionneur de tangage est essentiellement dimensionné par les couples qu'il doit fournir durant les phases d'accélération du bras. La vitesse du bras sera donc considérée comme variable.



Nota : les angles sont représentés positifs et les différents repères sont orthonormés directs.

Figure 2

3. Energetique

Soit $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, le repère lié au bâti Φ . Ce repère sera considéré comme galiléen.

Soit $I(I,3) = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}_{B_2}$ la matrice d'inertie en I de la nacelle **3**, exprimée dans la base $B_2 = (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$.

La nacelle **3** de masse m a son centre d'inertie en I .

Soit C_{23} le couple suivant l'axe $(I, \vec{y}_3)$ fourni à la nacelle **3** par le moteur d'asservissement installé sur l'anneau **2**.

On donne également le torseur d'actions transmissibles de la liaison pivot 23 : $\{T_{2 \rightarrow 3}\}_I = \begin{Bmatrix} X_{23} & L_{23} \\ Y_{23} & 0 \\ Z_{23} & N_{23} \end{Bmatrix}_{B_2}$

- Calculer l'énergie cinétique du solide 3 dans son mouvement par rapport au repère galiléen R_0 .
- Ecrire le théorème de l'énergie cinétique appliqué au solide 3 dans son mouvement par rapport au repère galiléen R_0 .
- En utilisant les résultats de la méthode consistant à appliquer le principe fondamental de la dynamique, vérifier la validité de cette équation obtenue en b) en montrant que l'équation découlant du théorème de l'énergie cinétique est une combinaison linéaire des équations découlant du PFD.

Réponses :

a)

$$T(3/R_0) = \frac{1}{2} m \vec{V}(I \in 3/0)^2 + \frac{1}{2} \vec{\Omega}(3/0) \cdot \mathbb{I}_I(3) \cdot \vec{\Omega}(3/0) = \frac{1}{2} m R^2 \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} \vec{\Omega}(3/0) \cdot \vec{\sigma}_{I(3/R_0)}$$

$$T(3/R_0) = \frac{1}{2} [m R^2 \dot{\psi}^2 + A (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta) + B (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta)^2]$$

b) Théorème de l'énergie cinétique appliqué à **3** dans son mouvement par rapport à R_0 :

$$\frac{dT(3/R_0)}{dt} = P(\text{moteur} \rightarrow 3/R_0) + P(\text{pes} \rightarrow 3/R_0) + P(2 \rightarrow 3/R_0)$$

$$P(\text{moteur} \rightarrow 3/R_0) = C_{23} \vec{y}_2 \cdot \vec{\Omega}(3/R_0) = C_{23} \vec{y}_2 \cdot (\dot{\psi} \cos \theta \vec{z}_2 + \dot{\psi} \sin \theta \vec{y}_2 + \dot{\theta} \vec{x}_2 + \dot{\phi} \vec{y}_2) = C_{23} (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta)$$

$$P(\text{pes} \rightarrow 3/R_0) = m g \vec{z}_0 \cdot \vec{V}_{I \in 3/0} = m g \vec{z}_0 \cdot R \dot{\psi} \vec{x}_1 = 0$$

$$P(2 \rightarrow 3/R_0) = \begin{Bmatrix} X_{23} & L_{23} \\ Y_{23} & 0 \\ Z_{23} & N_{23} \end{Bmatrix}_I \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\theta} & R \dot{\psi} \\ \dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta & 0 \\ \dot{\psi} \cos \theta & 0 \end{Bmatrix}_I = R \dot{\psi} X_{23} + L_{23} \dot{\theta} + N_{23} \dot{\psi} \cos \theta$$

$$\frac{dT(3/R_0)}{dt} = m R^2 \dot{\psi} \ddot{\psi} + A (\dot{\theta} \ddot{\theta} + \dot{\psi} \ddot{\psi} \cos^2 \theta - \dot{\psi}^2 \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta) + B (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta)(\ddot{\phi} + \ddot{\psi} \sin \theta + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta)$$

$$C_{23} (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta) + R \dot{\psi} X_{23} + L_{23} \dot{\theta} + N_{23} \dot{\psi} \cos \theta = m R^2 \dot{\psi} \ddot{\psi} + A (\dot{\theta} \ddot{\theta} + \dot{\psi} \ddot{\psi} \cos^2 \theta - \dot{\psi}^2 \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta) + B (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta)(\ddot{\phi} + \ddot{\psi} \sin \theta + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta)$$

Cette équation est une combinaison linéaire des équations déduites du pfd.