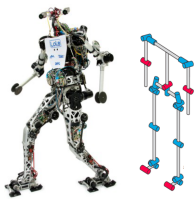


### Activation 3



#### Le robot humanoïde Lola

Concours Mines Ponts – PSI 2015

##### Savoirs et compétences :

- Mod2.C17.SF1 : déterminer le torseur dynamique d'un solide, ou d'un ensemble de solides, par rapport à un autre solide
- Res1.C2 : principe fondamental de la dynamique

#### Mise en situation

Le développement de robots à forme humaine est en croissance constante depuis quelques dizaines d'années. En robotique, il est difficile d'affirmer que tous les robots remplaçant l'homme dans ses tâches doivent être de forme humaine. Les véhicules autonomes, par exemple, ne sont pas anthropomorphes. Les tâches auxquelles sont destinées les robots définissent leur forme idéale. Si nous souhaitons un jour que les robots remplacent l'homme dans ses tâches ennuyeuses, ils devront s'intégrer au mieux à notre société, à notre environnement et à notre ergonomie.

Les dimensions d'une maison et la hauteur des meubles sont adaptées à notre forme humaine. L'avantage des robots humanoïdes devient alors économique : il n'est pas indispensable de modifier l'environnement quotidien pour les utiliser.

Le robot humanoïde LOLA, développé par l'Université de Munich, est un robot de forme humaine conçu pour un mode de marche rapide. LOLA possède une structure à 25 degrés de liberté lui permettant une flexibilité accrue. Chaque jambe possède 7 degrés de liberté, le haut du corps 8 et la tête 3. Le robot est équipé d'une caméra stéréoscopique haute définition afin de percevoir son environnement, d'une centrale inertielle équipée de 3 gyroscopes et de 3 accéléromètres. Chaque articulation possède un codeur angulaire absolu et chaque pied est muni d'un capteur d'effort 6 axes permettant d'obtenir l'effort de contact avec le sol. Les caractéristiques techniques de LOLA sont données dans le tableau suivant.

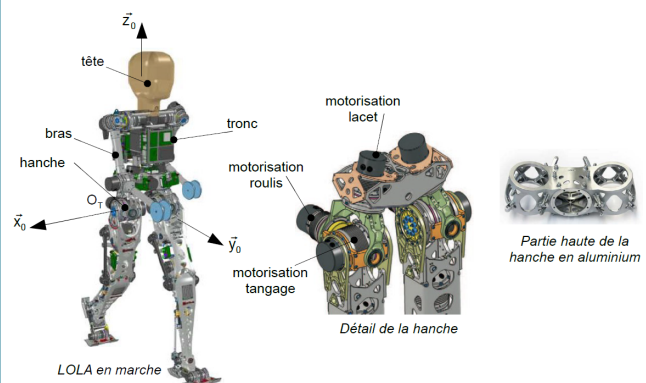
Caractéristiques	Valeurs
Hauteur	180 cm
Masse	55 kg
Nombre de degrés de liberté	25
Vitesse de marche	5 km.h <sup>-1</sup> maxi
Hauteur du centre de gravité	105 cm

#### Contrôle de la posture de LOLA

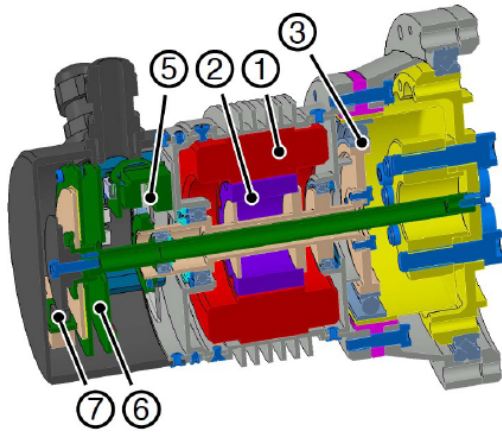
Pour assurer une marche rapide et stable de LOLA, la méthode choisie est le contrôle de la verticalité du tronc du robot (figure 5). Le haut du corps (tronc, bras, tête) sera maintenu vertical en réalisant un asservissement de position angulaire au niveau de l'articulation de la hanche.

L'action mécanique de redressement est développée par l'ensemble de motorisation de tangage autour de l'axe ( $O_T, \vec{x}_0$ ). Les performances à vérifier dans cette partie sont définies par les exigences suivantes.

Exigence 1.3 : le robot ne doit pas basculer lors de la marche	
Sous-exigence	Description
Id=1.3.2	La posture du robot est adaptée à la position du ZMP
Id=1.3.2.d	La performance dynamique de chaque axe permet de modifier la posture



La chaîne structurelle permettant de modifier la posture du haut du corps autour de l'axe de tangage est représentée sur la figure 6. Elle est composée d'un moteur électrique (1,2) synchrone à aimants permanents piloté par un variateur électronique, d'un réducteur Harmonic-Drive© (3) de rapport de réduction 1/100, d'un codeur incrémental (5) ainsi que d'un codeur angulaire absolu (6+7). Une centrale inertielle équipée d'un accéléromètre, d'un gyroscope et d'une unité de traitement permet d'obtenir en temps réel la valeur de l'angle d'inclinaison du haut du corps par rapport à la verticale.



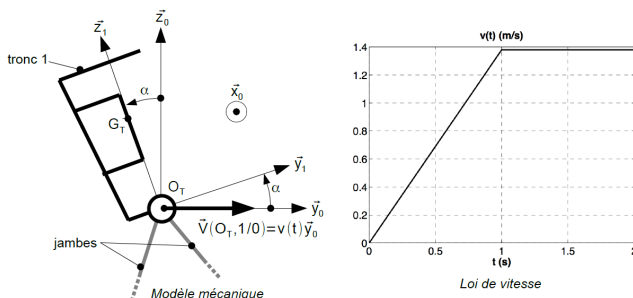
**Objectif** L'objectif de cette partie est de mettre en place un modèle du maintien vertical du tronc de LOLA et de déterminer une structure de commande permettant d'assurer les performances du cahier des charges de l'exigence 1.3.2.

Les performances dynamiques de l'axe de tangage doivent vérifier les critères suivants :

Sous-exigence 1.3.2.d : la performance dynamique de chaque axe permet de modifier la posture		
Critère	Niveau	Flexibilité
Marge de phase	$M_q = 50^\circ$	Mini
Erreur statique	$0^\circ$	$[-0.5^\circ; +0.5^\circ]$
Bande passante à 0 dB en boucle ouverte	$\omega_{bp} = 50 \text{ rad.s}^{-1}$	Mini
Temps de réponse à 5%	0,2 s	Maxi
Dépassement	$1^\circ$	Maxi

## Modèle de connaissance de la dynamique de tangage

Le modèle mécanique utilisé pour mener notre étude est donné sur la figure 7. L'association des liaisons entre le tronc et les jambes au niveau de la hanche est équivalente, dans le plan sagittal  $(O_T, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ , à une liaison pivot d'axe  $(O_T, \vec{x}_0)$ . Le tronc sera considéré comme un solide admettant le plan  $(O_T, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  comme plan de symétrie. Le cahier des charges stipule que LOLA doit pouvoir marcher à la vitesse de 5 km/h. Cette vitesse est atteinte en 1 s lors de la première foulée. La loi de commande en vitesse correspondante est représentée sur la figure 7.



Le mouvement de marche est imposé et modélisé par le torseur cinématique en  $O_T$  du mouvement du tronc 1

$$\text{par rapport au sol } 0 : \{\mathcal{V}(1/0)\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{d\alpha}{dt} \vec{x}_0 \\ v(t) \vec{y}_0 \end{array} \right\}_{O_T}.$$

Les caractéristiques d'inertie du tronc 1 de LOLA sont :

- la matrice d'inertie en  $O_T$   $I_{O_T}(1) = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & -D_1 \\ 0 & -D_1 & C_1 \end{pmatrix}_{B_1}$  ;
- position du centre de gravité :  $\vec{O_T G_T} = Z_G \vec{z}_1$  ;
- masse :  $m_1$  ;
- l'accélération de la pesanteur sera prise égale à  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

L'axe de sortie du réducteur exerce un couple de redressement sur le tronc 1 modélisé par le torseur couple suivant :  $\{\mathcal{T}(\text{hd} \rightarrow 1)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ C_R \vec{x}_0 \end{array} \right\}_{O_T}$ . L'angle  $\alpha$  sera supposé faible pendant le mouvement : ainsi  $\cos \alpha \simeq 1$  et  $\cos \alpha \simeq \alpha$ .

**Question 1** Proposer une démarche de résolution afin d'obtenir l'équation différentielle du mouvement reliant  $\alpha$  et ses dérivées successives aux données du problème. Effectuer un bilan des actions mécaniques extérieures au système matériel isolé.

**Question 2** Développer l'ensemble des calculs pour déterminer l'équation différentielle reliant  $\alpha$  et ses dérivées successives aux données du problème.

Le contrôle de l'angle s'effectue par l'intermédiaire du moteur asservi en position, suivi du réducteur Harmonic-Drive© de rapport de réduction  $r = \frac{1}{100}$ . Le moment d'inertie de l'arbre moteur suivant son axe de rotation est noté  $J_m$ , le couple moteur exercé sur l'arbre d'entrée du réducteur est noté  $C_m$ . Le réducteur Harmonic-Drive© sera considéré sans masse. La masse de l'arbre moteur est négligeable devant l'ensemble des autres grandeurs inertielles. Une étude dynamique a permis de montrer que :  $C_R = \frac{C_m}{r} - \frac{J_m}{r^2} \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2}$ . Ainsi, l'équation différentielle du mouvement devient :  $J_{eq} \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} - m_1 g Z_G \alpha(t) = m_1 Z_G \frac{dv(t)}{dt} + \frac{C_m(t)}{r}$ .

$J_{eq}$  est le moment d'inertie équivalent de l'ensemble du tronc ramené sur l'axe moteur.

## Modèle du contrôle actif de la position verticale

**Question 3**

**Question 4**

**Question 5**

**Question 6**

**Question 7**