

Conception et analyse d'un robot Delta parallèle à 6 DDL

Problématique

- Les robots sériels ne sont pas adaptés aux tâches à grande vitesse comme l'inspection et le tri.
- Les robots parallèles présentent des singularités qui limitent leur fonctionnement et leur stabilité.
- L'espace de travail en orientation des robots Delta 6-DoF reste limité.
- Il existe un compromis complexe entre performance, simplicité mécanique et facilité de commande.

Objectifs

- Concevoir une nouvelle architecture de robot parallèle 6-DoF (type 3-RRRS).
- Développer un modèle cinématique complet (inverse analytique et direct numérique).
- Analyser les singularités pour améliorer l'espace de travail et les performances.
- Valider le concept par un prototype CAO et des simulations (trajectoires et pick-and-place).

Architecture proposée

- Le robot est un mécanisme parallèle de type 3-RRRS, composé de trois jambes identiques et disposées symétriquement, assurant une bonne rigidité et une stabilité globale du système.
- Chaque jambe comprend une articulation rotoïde passive à la base, un mécanisme à cinq barres avec deux actionneurs, et une articulation sphérique reliant la jambe à la plateforme mobile, permettant une bonne mobilité.
- Les actionneurs sont placés à la base, ce qui réduit la masse en mouvement et l'inertie, améliorant ainsi la vitesse et la précision du robot.
- Chaque jambe possède trois axes de rotation e_{i1}, e_{i2}, e_{i3} , où e_{i1} est l'axe de base et e_{i2}, e_{i3} sont parallèles entre eux et perpendiculaires à e_{i1} , garantissant une structure stable.
- Les angles articulaires $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$ commandent respectivement les articulations passive et actives, et permettent de contrôler la position et l'orientation de la plateforme mobile.

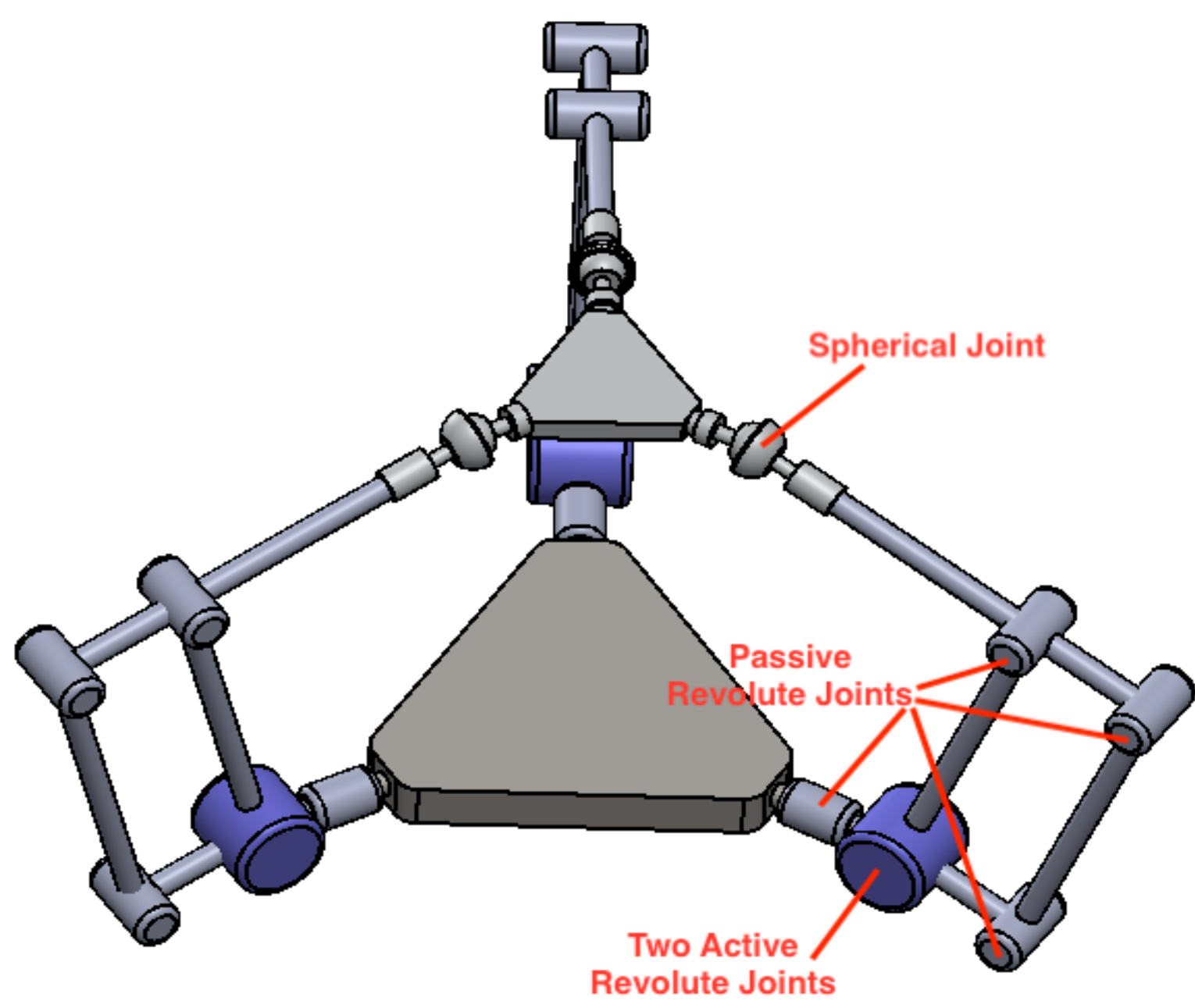


Figure 1: Architecture du mécanisme proposé

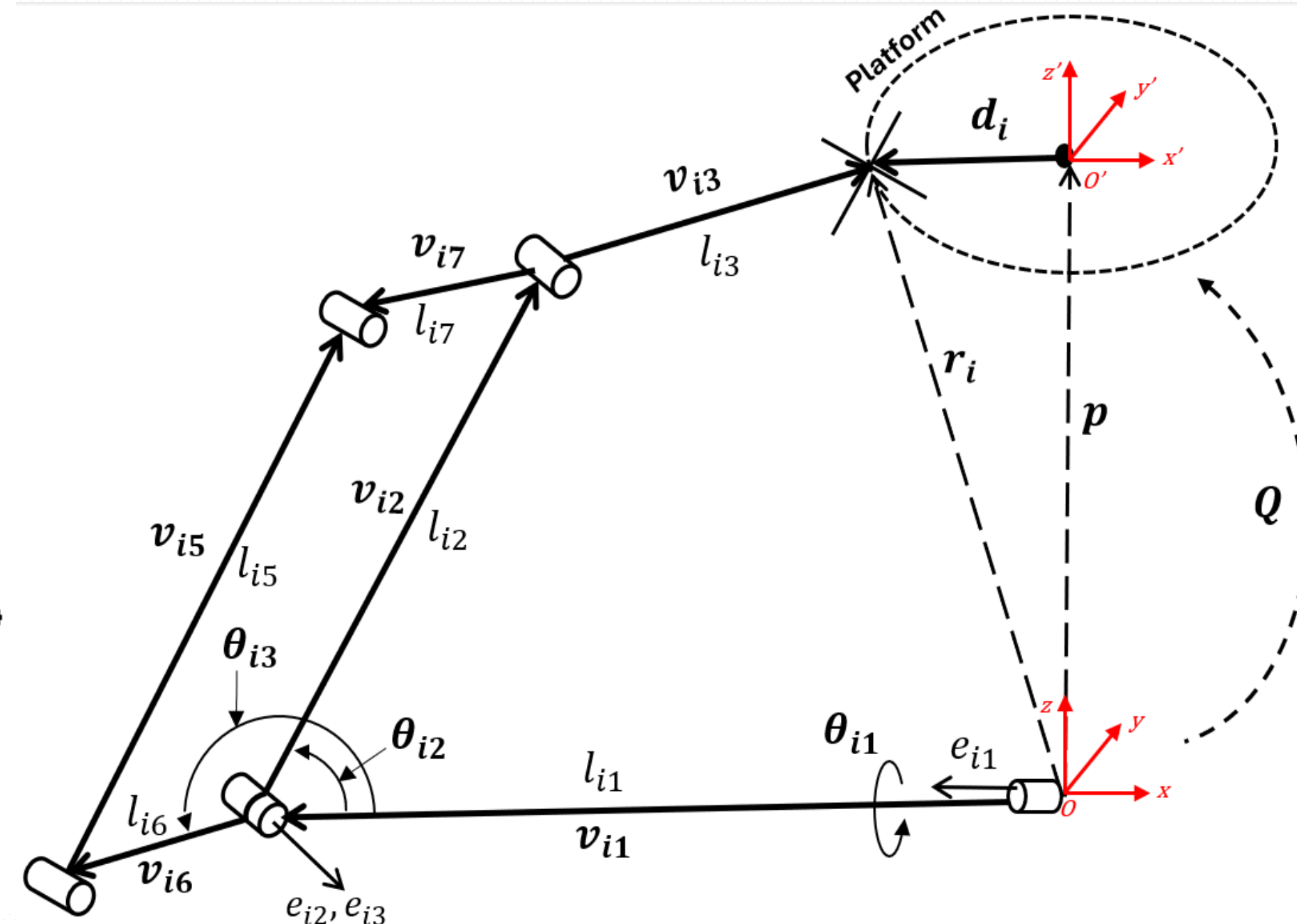


Figure 2: Définition des vecteurs et des paramètres d'une jambe.

Analyse cinématique

- **Équation de vitesse (jacobienne)** : établissement de la relation entre les vitesses articulaires et les vitesses de la plateforme (translation et rotation) à travers les matrices jacobiennes J et K , permettant l'analyse du mouvement et des performances dynamiques.

$$J \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{Q} \end{bmatrix} = K \dot{\theta} \quad (1)$$

- **Cinématique inverse (analytique)** : détermination des angles articulaires $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$ à partir de la position p et de l'orientation Q de la plateforme mobile, en utilisant des relations géométriques et trigonométriques.
- **Cinématique directe (numérique)** : calcul de la position et de l'orientation de la plateforme à partir des angles articulaires connus. Le problème étant non linéaire, il est résolu par une méthode itérative de type Newton-Raphson.

Analyse des singularités

Les singularités correspondent à des configurations particulières où le robot perd partiellement ou totalement sa mobilité ou devient instable. Elles limitent l'espace de travail et peuvent entraîner des comportements imprévisibles.

Singularités de type I (sérielles)

Elles apparaissent au niveau d'une jambe lorsque certaines articulations sont alignées ou en fin de course. Dans ce cas, la matrice K devient singulière, ce qui entraîne une perte de contrôle local. Elles peuvent être réduites par des contraintes mécaniques.

Singularités de type II (parallèles)

Elles sont liées à la configuration globale du robot et apparaissent lorsque la matrice jacobienne J devient singulière. Elles peuvent se produire à l'intérieur de l'espace de travail et provoquent une perte de contrôle globale de la plateforme

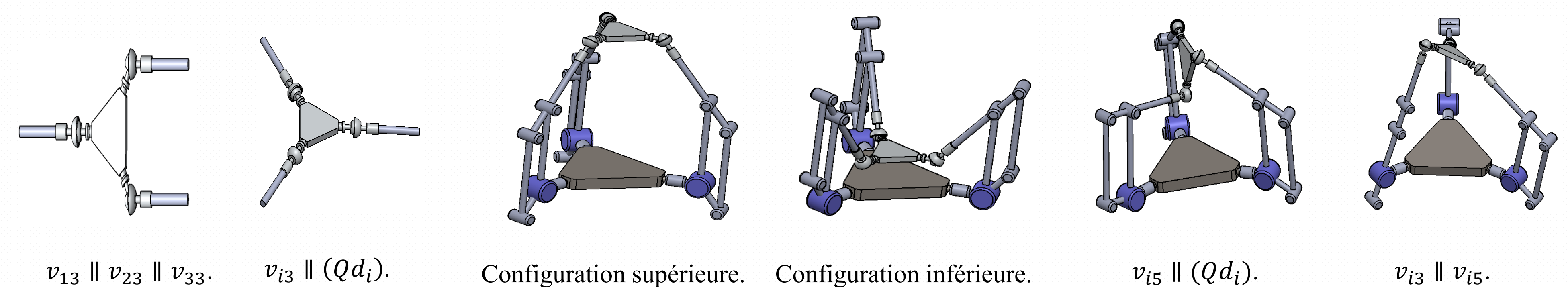


Figure 3: Singularités de type II du mécanisme proposé.

Figure 4: Singularités de type II du mécanisme proposé lorsque $v_{15} \parallel v_{25} \parallel v_{35}$.

Figure 5: Singularités de type II du mécanisme proposé (suite).

Prototype et fonctionnement

Réalisation du prototype

Un prototype a été conçu en CAO avec des paramètres géométriques choisis pour valider le concept, sans optimisation complète pour des applications industrielles.

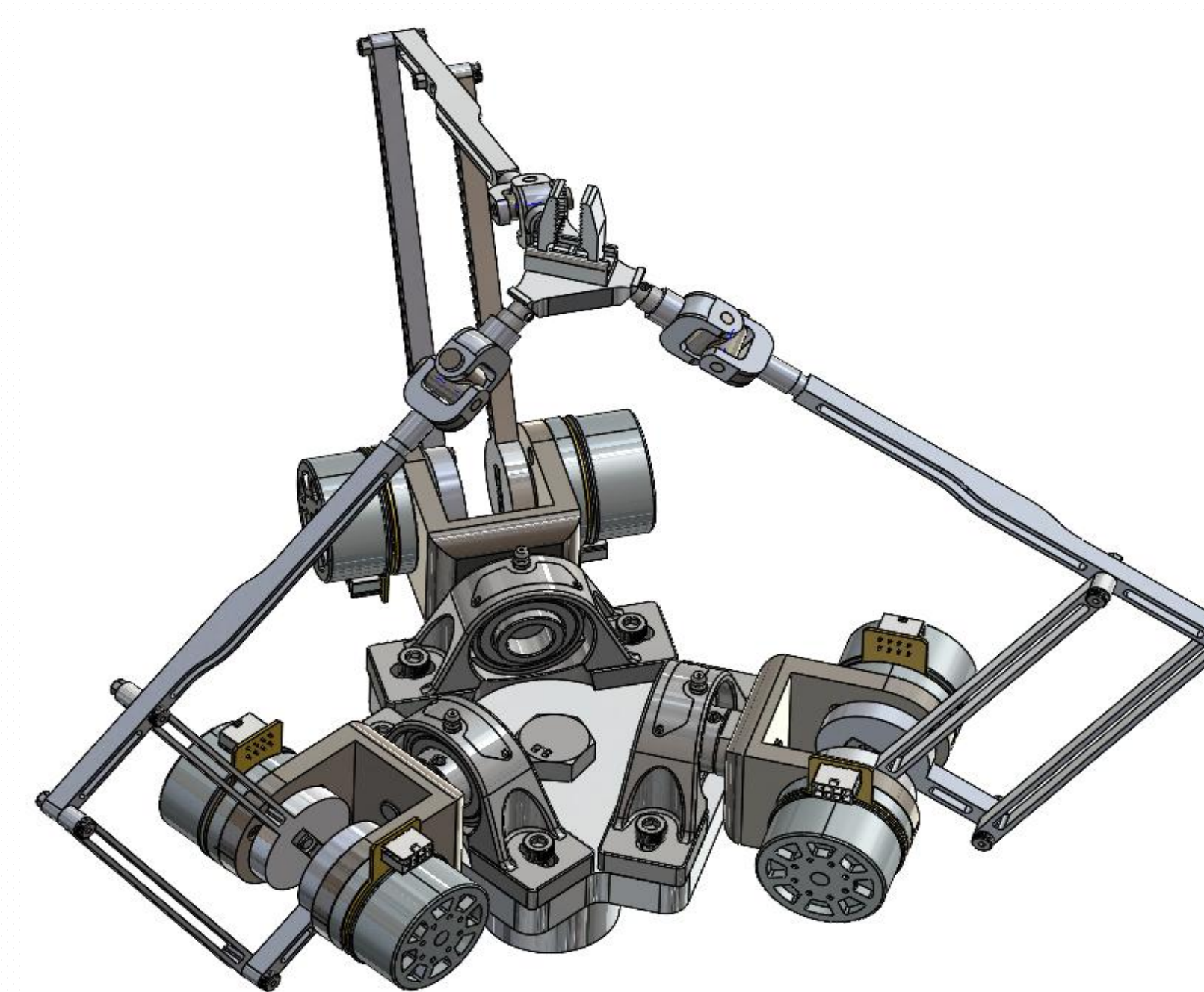


Figure 6: Conception CAO du prototype du robot.

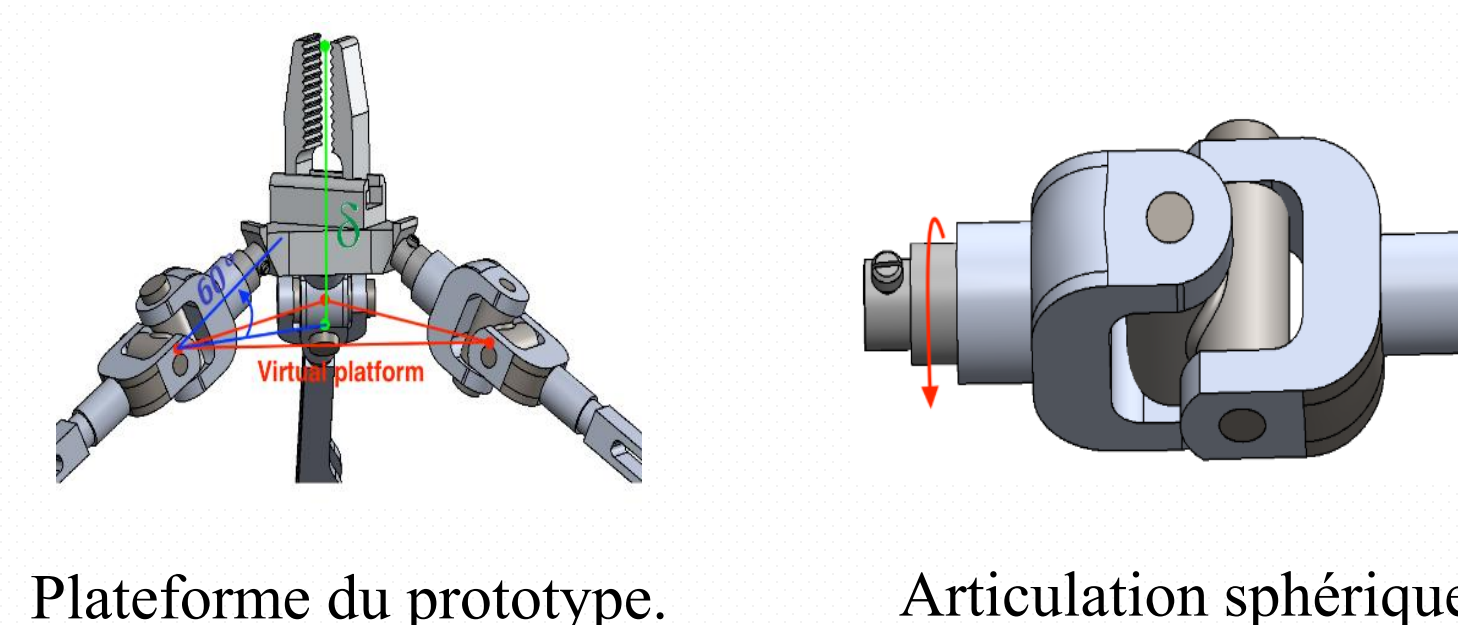


Figure 7: Conception CAO du prototype du robot.

Simulation et validation fonctionnelle

Des simulations ont été réalisées pour tester les mouvements du robot (translations et rotations) ainsi qu'une application de type **pick-and-place**, validant le comportement global du mécanisme.

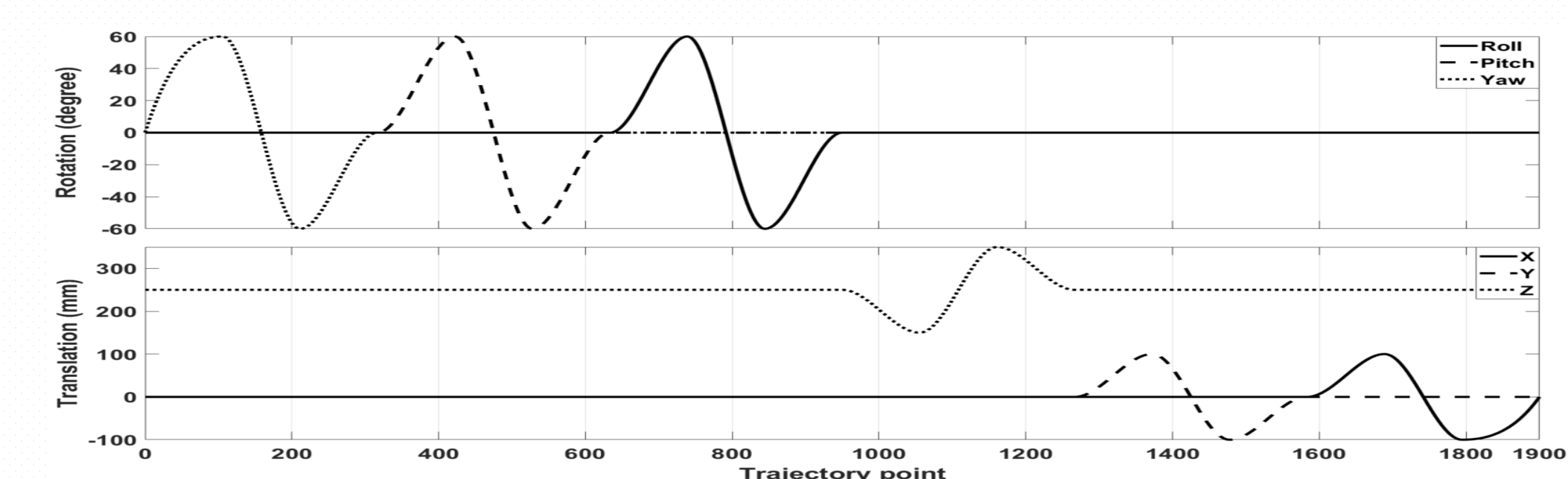


Figure 8: Trajectoire de démonstration dans l'espace cartésien

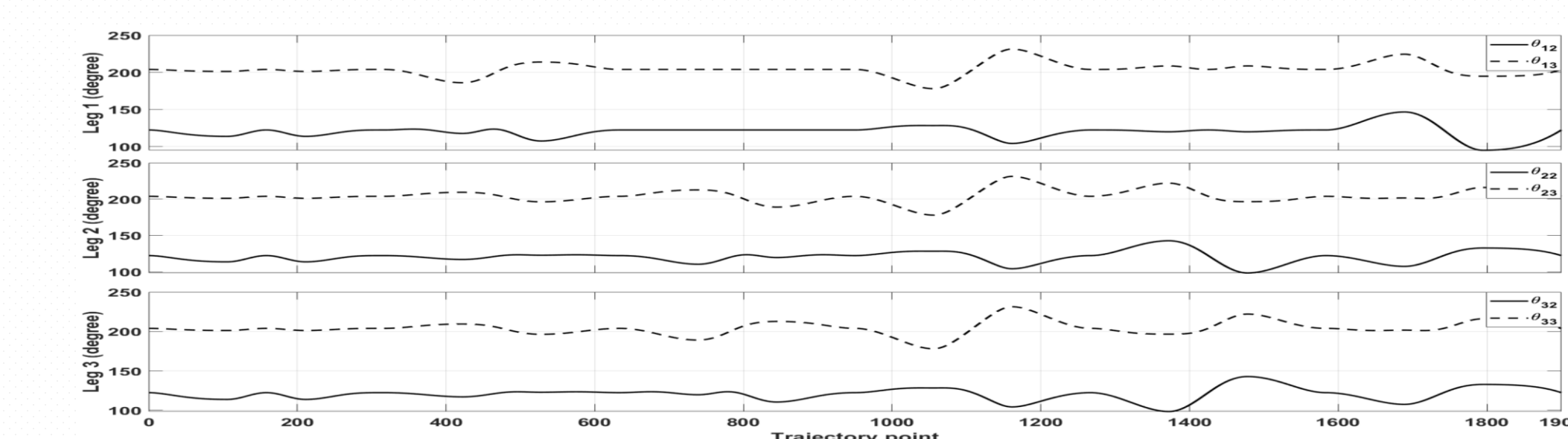


Figure 9: Angles articulaires θ_2 et θ_3 des trois jambes pendant la démonstration

Références

Siciliano B et Khatib O (éds.). Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

Nguyen TS, Harton D, Campeau-Lecours A et al. Motion control algorithms based on the dynamic modelling of kinematically redundant hybrid parallel robots. Mechatronics, 2021 ; 76 : 102555.

Wen K, Nguyen TS, Harton D et al. A Backdrivable Kinematically Redundant (6+3)-Degree-of-Freedom Hybrid Parallel Robot for Intuitive Sensorless Physical Human-Robot Interaction. IEEE Transactions on Robotics, 2021 ; 37(4) : 1222-1238.