LOGICIEL DE SIMULATION POUR LA CARACTERISATION CINEMATIQUE DE ROBOTS SPATIAUX.

Charles Pinto(1), Erik Macho(2), Victor Petuya(3), Oscar Altuzarra(4), Alfonso Hernández(5)
(1) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 014 089, Fax: +34 946 014 215, e-mail: charles.pinto@ehu.es
(2) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 017 399, Fax: +34 946 014 215, e-mail: erik.macho@ehu.es
(3) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 014 091, Fax: +34 946 014 215, e-mail: victor.petuya@ehu.es
(4) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 014 174, Fax: +34 946 014 215, e-mail: oscar.altuzarra@ehu.es
(5) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 014 222, Fax: +34 946 014 215, e-mail: a.hernandez@ehu.es

Résumé:

Les différents modules d'un programme informatique pour la caractérisation cinématique de mécanismes en général et de robots en particulier sont présentés dans cet article, aussi bien pour manipulateurs planaires comme spatiaux. Tous ces modules sont intégrés dans un logiciel de caractère général pour des tâches de recherche et du domaine de la formation et de l'éducation. Grâce à ce logiciel, les principaux problèmes de cinématique peuvent être abordés pour l'analyse et la synthèse de mécanismes. Le système de fenêtres et l'interface graphique permettent de visualiser les résultats de façon très intuitive, aussi bien pour les étudiants comme pour les chercheurs. Afin d'illustrer les capacités du logiciel plusieurs exemples plans et tridimensionnels sont présentés avec un spécial intérêt aux manipulateurs ou robots parallèles.

Mots clés: logiciel, simulation, cinématique, manipulateur, 2D, 3D.

1 Introduction

Durant les dernières années, il s'est produit un grand saut au niveau du développement de logiciels dans le domaine de la simulation cinématique de mécanismes. Ces logiciels aident les chercheurs et les étudiants à comprendre avec précision le comportement cinématique de certains robots et mécanismes spatiaux. Á l'heure d'aborder l'étude ou la synthèse d'un mécanisme, une possibilité est l'utilisation de programmes commerciaux complets tels que ADAMS® [1], DADS® [2] ou Working Model® [3]. Ces programmes, à des fins généraux, ont comme avantages leurs capacités de résolution de problèmes complexes et leur fiabilité. Cependant, leur caractère général fait que la définition de la géométrie des mécanismes soit un processus complexes, spécialement dans le cas des mécanismes spatiaux [4]. Dans le cas de Working Model®, il s'agit d'un outil d'analyse et non pas de synthèse. Les programmes commerciaux basés sur la technique multicorps sont eux laborieux à manier due à leur tendance généraliste, ce qui fait que la base géométrique de la Théorie des Machines résulte un outil mathématique sombre dans la formulation de problèmes cinématiques. De plus, ces programmes ne sont pas ouverts, ce qui ne permet pas l'implémentation de nouveaux modules pour le calcul et la représentation de différentes entités cinématiques spécifiques d'un mécanisme. Par conséquent, le groupe de recherche Compmech du laboratoire de Mécanique de l'Université du Pays Basque a

développé un logiciel de simulation pour aider les étudiants et les chercheurs dans le domaine des mécanismes complexes spatiaux du point de vue cinématique. Aujourd'hui, les mécanismes planaires et spatiaux peuvent se trouver dans de nombreuses machines industrielles. Pour leur synthèse, les chercheurs ont du réaliser plusieurs types d'analyses cinématiques, tels que la résolution des problèmes de positions, l'analyse des vitesses et accélérations, l'identification des différents modes d'assemblage et de fonctionnement, l'étude des singularités dans l'espace de travail, etc. Le travail présenté dans cet article propose un nouvel outil pour l'analyse et la simulation de mécanisme planaires et spatiaux. Ce logiciel a été implémenté sous Visual C#® avec une librairie graphique Open GL® pour représenter les résultats avec différents formats. La simulation permet aux concepteurs de visualiser le mouvement virtuel du mécanisme sans la nécessité immédiate d'un prototype.

2 Architecture du logiciel

L'étude de la cinématique regroupe différents types d'analyse. Le logiciel propose une structure modulaire, avec quatre modules. Le premier, le préprocesseur, se charge de la définition de la géométrie du mécanisme, et les trois autres gèrent les calculs:

- Géométrie (*geometry*). L'utilisateur peut définir le schéma cinématique d'un mécanisme planaire ou spatial. Il s'agit d'un module de base nécessaire pour la définition de la géométrie et topologie du mécanisme ou robot à analyser dans les autres modules.
- Mouvement (*motion*). Une fois définis les actionneurs du mécanisme et le pas, le problème de position incrémental se résout, permettant une visualisation du mouvement. De plus, la trajectoire de chaque point du mécanisme peut être tracée.
- Espace de travail (*workspace*). Dans ce module, différents espaces de travail sont calculés ainsi que les régions libres de singularités.
- Vitesses (*velocity*). Ce module, de caractère plus général, permet le calcul des degrés de liberté, les vitesses linéaires et angulaires, les matrices jacobiennes, la proximité aux singularités, l'ellipsoïde de vitesses, etc.

Le logiciel décrit jusqu'ici est en constante évolution, et c'est pour cela que peuvent apparaitre de nouveaux modules, et grâce à cette structure modulaire les développements sont rapidement et facilement incorporables.

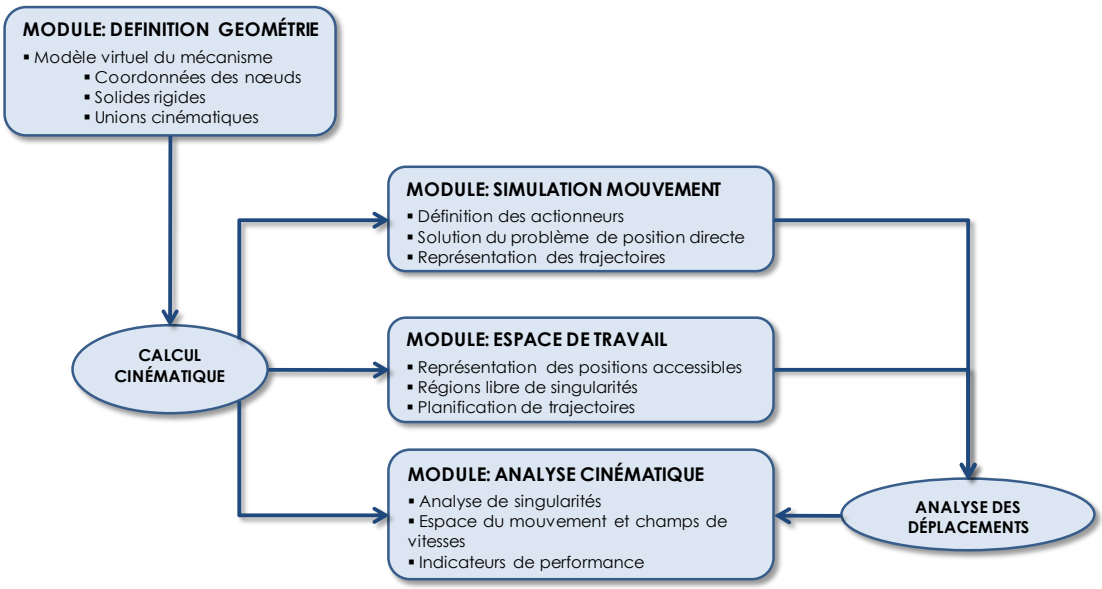


Figure 1. Structure modulaire du logiciel.

3 Module de définition de la géométrie du mécanisme

Avant l'étude cinématique du mécanisme, l'utilisateur doit définir sa structure géométrique [5]. Cette étape peut être complexe, surtout dans le cas de mécanismes spatiaux [4] et requière généralement d'un temps élevé avant de lancer l'analyse cinématique. Compte tenu de cela, un nouveau préprocesseur et postprocesseur a été développé et implémenté avec une interface capable de modéliser la géométrie de mécanismes complexes spatiaux et de plusieurs degrés de liberté. Une fois définie la topologie, celle-ci est stockée dans une base de données qui sera utilisée dans les différents modules de résolutions des problèmes cinématique décrit antérieurement.

Si l'on considère un mécanisme comme un ensemble d'éléments indéformables unis les uns aux autres par des joints cinématiques, il est nécessaire de définir des entités de base tels que les nœuds et les éléments. Un nœud définit la position d'un point dans l'espace tridimensionnel. Généralement, ce point correspond avec la position des joints cinématiques du mécanisme. C'est à dire, que plusieurs éléments se connectent à ce point. Il existe deux types de nœuds, les nœuds libres et les nœuds glissants. Les premiers possèdent 3 degrés de liberté et nécessitent donc trois paramètres pour définir leur position. Les nœuds glissants se définissent par rapport à une ligne droite, et ont donc seulement un degré de liberté. Il est possible de définir des nœuds libres qui ne fassent pas partie du mécanisme mais représentent des points d'intérêt, comme c'est le cas lorsque l'on désire matérialiser un outil.

Une fois les nœuds définis, les éléments peuvent à leur tour être construit avec l'aide d'une souris en cliquant les extrémités des éléments ou avec un clavier. La figure 2 représente une série d'éléments.

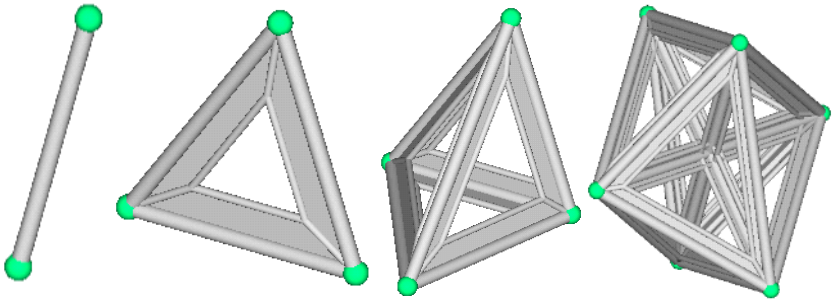


Figure 2. Modélisation de différents éléments.

Finalement, pour définir les joints cinématiques, il suffit de choisir le genre d'union et de l'associer au nœud correspondant. Une union sphérique se définit donc comme un nœud libre, alors que le cas cylindrique et prismatique on s'appuie sur des nœuds glissants car ils ont besoin de l'axe de rotation ou de glissement, respectivement (voir Figure 3).

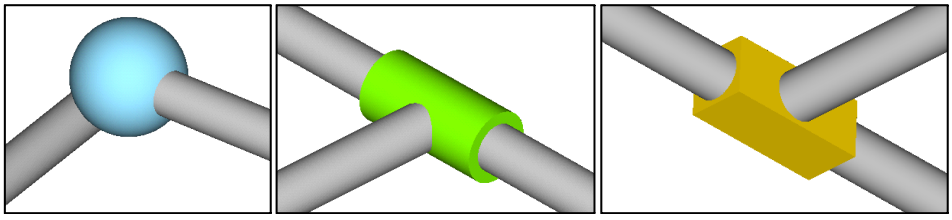
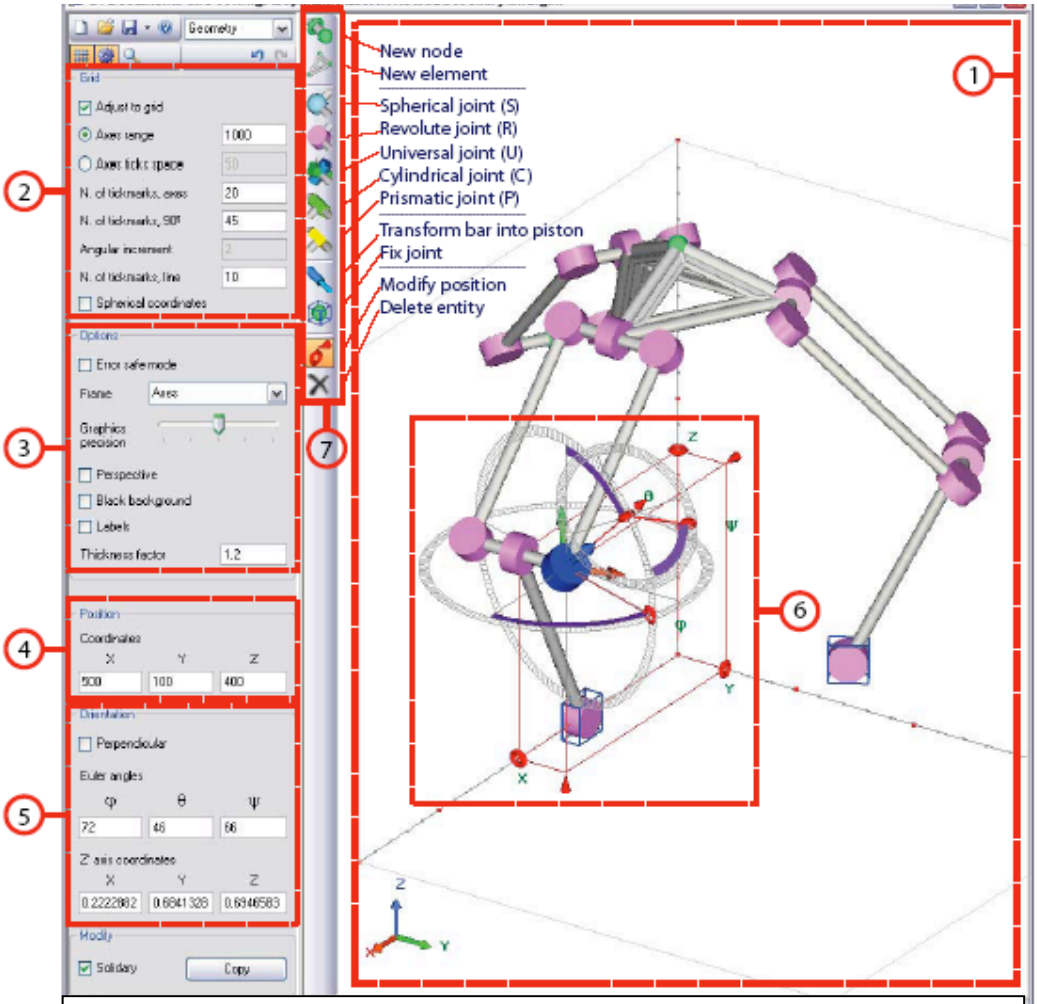


Figure 3. Modélisation des joints sphérique, cylindrique et prismatique.

La figure 4 montre une vue générale du module de géométrie avec les sept parties principales.



1. Fenêtre de représentation du mécanisme
2. Panneau de configuration graphique et choix du système de coordonnées
3. Panneau avec les options générales de visualisation
4. Panneau de position. Coordonnées avec le clavier
5. Panneau d'orientation. Angles d'Euler avec clavier et vues spéciales
6. Fenêtre de position et orientation avec souris
7. Barre avec les icônes géométriques

Figure 4. Interface du préprocesseur – cas du robot Maryland.

4 Module de mouvement

Pour l'utilisateur, chercheur ou concepteur, une des options les plus intéressantes est la possibilité de visualiser l'animation du mécanisme pour un mouvement donné des actionneurs. La méthode de résolution implémentée est celle développée par les auteurs [6], la Méthode Géométrique Itérative ou *Geometrical-Iterative Method*, d'où le nom du logiciel *GIM*. Ainsi, les trajectoires des nœuds du mécanisme peuvent être tracées, comme apparait dans la figure 5, pour le robot parallèle 3-PRS.

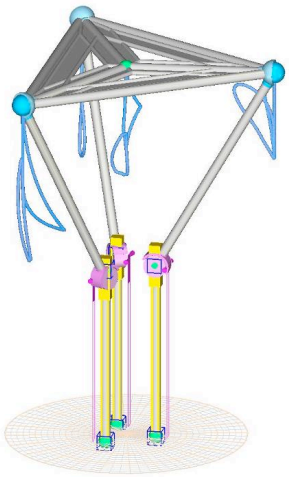
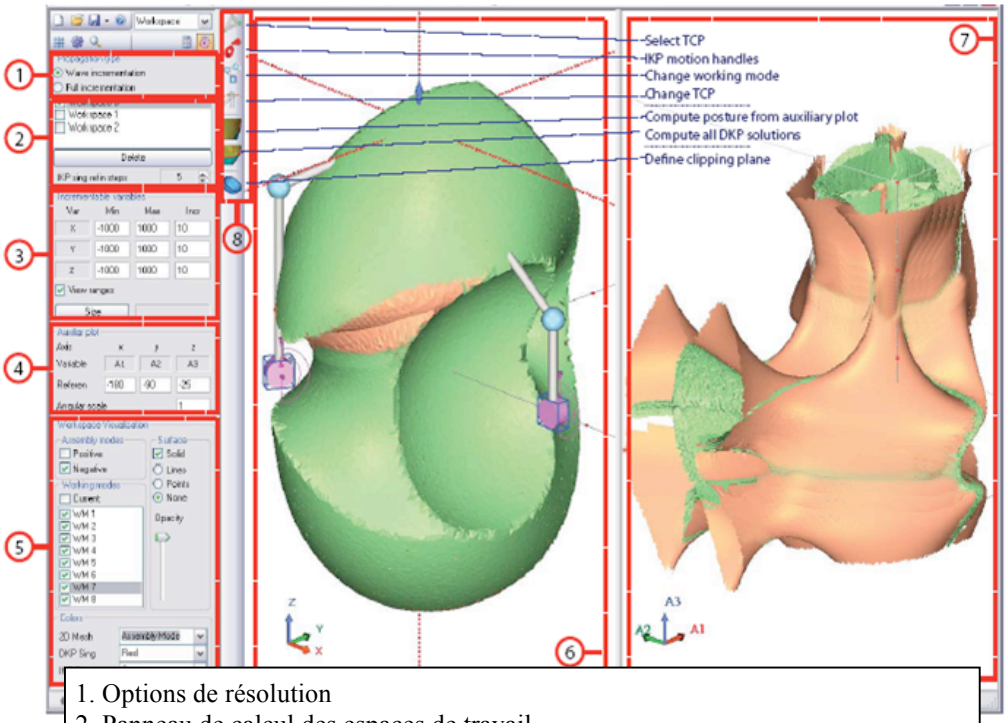


Figure 5. Trajectoires des rotules d'un manipulateur parallèle 3-PRS.

5 Module de l'espace de travail

Le module d'espace de travail permet la résolution et représentation des différents espaces de travail et lieu de singularités pour des mécanismes spatiaux avec n degrés de liberté. L'espace de travail complet est une entité de degré 6 pour un mécanisme spatial, donc impossible de représenter sur un écran d'ordinateur. Pour les robots parallèles de plus de 3 degrés de liberté, uniquement des représentations partielles sont possibles [7,8].



1. Options de résolution
2. Panneau de calcul des espaces de travail
3. Panneau des variables incrémentales
4. Options de représentation
5. Panneau des options des espaces de travail
6. Fenêtre de représentation cartésienne
7. Fenêtre de représentation dans l'espace des coordonnées de fonctionnement
8. Barre des icônes du module espace de fonctionnement

Figure 6. Module espace de travail

Dans ce module, les différents espaces de travail représentables sont les proposés dans [9], et sont l'espace de travail à orientation constante, l'espace de travail maximum, l'espace de configuration, l'espace des actionneurs, l'espace cartésien et l'espace opérationnel [10]. La figure 6 représente un aperçu général de l'interface du module espace de travail. La figure 7 représente l'espace de travail à orientation constante du robot parallèle de trois degrés de liberté, 3-RRR.

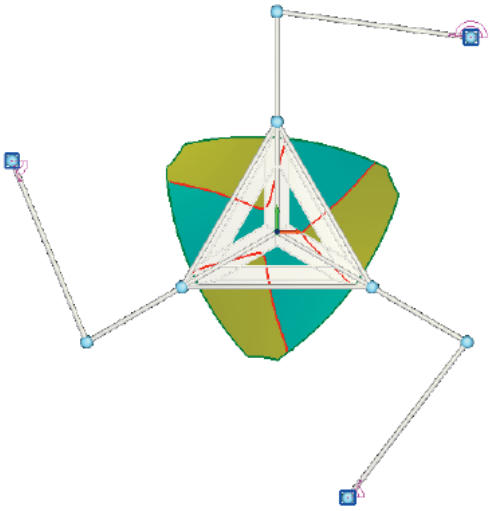
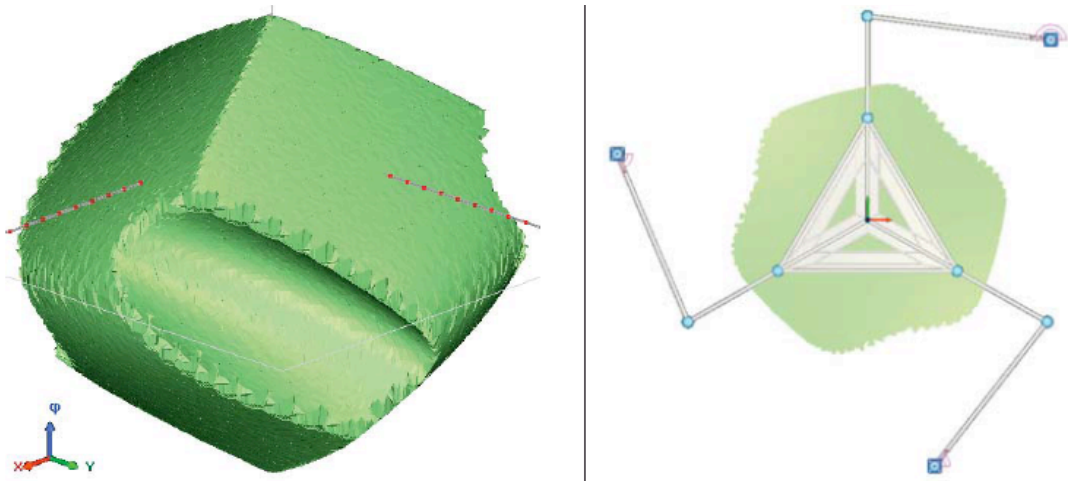


Figure 7. Espace de travail à orientation constante du 3-RRR.

L'espace de travail peut être représenté dans le domaine des actionneurs ou dans celui des variables de fonctionnement. Comme exemple, pour le robot planaire parallèle 3-RRR, l'espace de travail maximum est représenté (Figure 8) dans le système de coordonnées de fonctionnement et celui des variables de sortie cartésiennes.



a) coordonnées de fonctionnement b) coordonnées cartésiennes

Figure 8. Espaces de travail maximal du manipulateur 3-RRR.

6 Module d'analyse des vitesses

À partir des données du préprocesseur, le module des vitesses modélise le mécanisme avec les points définis dans le système de référence fixe, qui définissent la position de tous les éléments aux travers de conditions de distance, vue l'hypothèse de solides rigides adoptée. En dérivant les contraintes de positions en fonction du temps, les équations de vitesses absolues des points sont

obtenues. Ensuite, une opération détaillée dans [11] permet de séparer les vitesses linéaires des points et les vitesses angulaires des solides. Ainsi un système d'équations est obtenu aux travers de relations de vitesse entre toutes les variables du mécanisme, et non seulement entre les paramètres d'entré et de sortie. La matrice Jacobienne obtenue est une matrice carrée sans unité, c'est-à-dire, très utile pour identifier la proximité des positions singulières.

La figure 9 indique l'espace du mouvement de base de l'élément terminal du robot Tripod. Une fois définies les données de vitesse des actionneurs, les champs de vitesses des points, et les vitesses angulaires des solides sont obtenus et représentés.

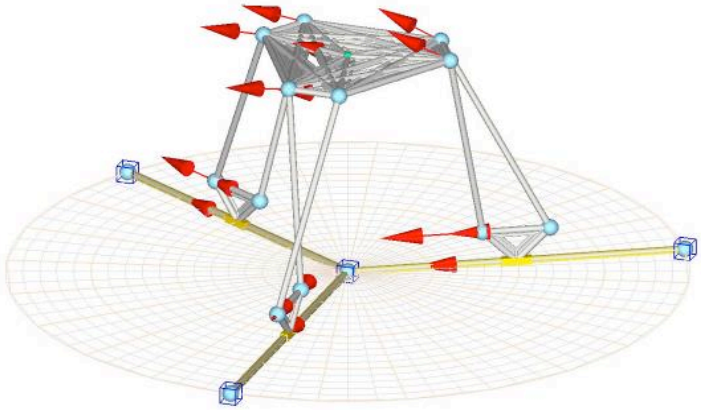


Figure 9. Espace du mouvement instantané de base du manipulateur Tripod.

6.1 Indicateurs de vitesses

Pour éviter de s'approcher des positions singulières, et afin de penser à une planification de trajectoire utile, l'utilisateur du logiciel peut lancer l'étude de l'espace de travail libre de singularité à partir de l'analyse des vitesses décrit auparavant. Cette caractérisation est liée au conditionnement des matrices Jacobiennes des problèmes direct et inverse de position.

La représentation des surfaces de singularités des problèmes direct et inverse doit être réalisée séparément, vu que chaque mode de fonctionnement a son lieu de singularité propre. La méthode de calcul est présentée dans [12] permettant une évaluation effective des déterminants des matrices Jacobiennes inverse et directe, $\mathbf{J}_{IKP}$ et $\mathbf{J}_{DKP}$. La figure 10 représente le déterminant de $\mathbf{J}_{IKP}$ grâce auquel on peut identifier les poses proches des singularités du problème inverse pour le mécanisme plan 5R.

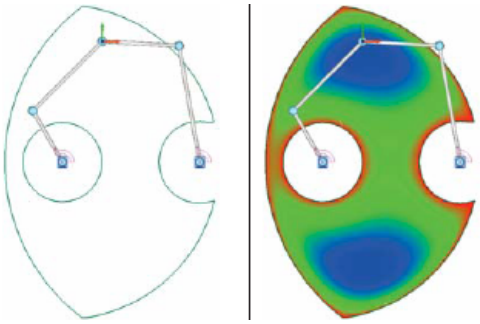


Figure 10. Lieu de singularité du problème inverse et son indicateur.

En ce qui concerne le problème direct, la représentation du déterminant de $\mathbf{J}_{DKP}$ dans l'espace de travail du mécanisme 5R, permet d'identifier les poses de singularité du problème direct et cela pour chaque mode de fonctionnement (Figure 11).

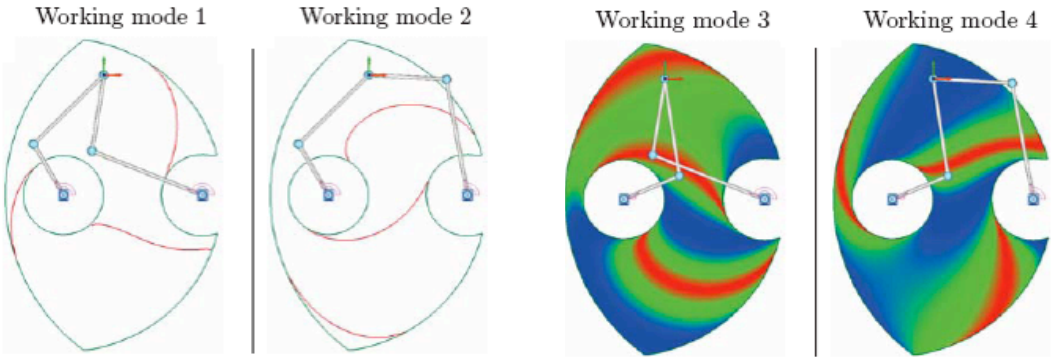


Figure 11. Locus de singularité du problème direct et indicateur pour 2 modes de fonctionnement.

Du point de vue pratique, un robot est conçu pour réaliser une tâche dans une zone sûre de son espace de travail. Une autre capacité du logiciel est qu'il permet d'identifier ces zones et d'évaluer des indicateurs de performance [13]. Par exemple, il peut représenter l'ellipsoïde de vitesse d'un élément pour ainsi visualiser l'amplification du mouvement entre l'entrée et la sortie du mécanisme, concept aussi bien applicable aux vitesses comme aux efforts. La figure 12 montre un exemple de représentation d'ellipsoïde de vitesse.

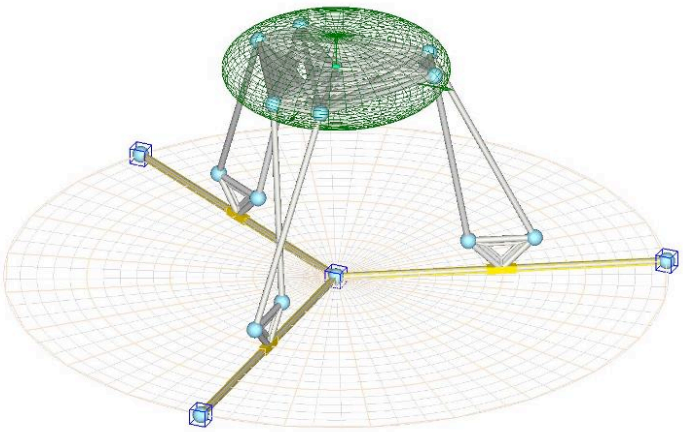
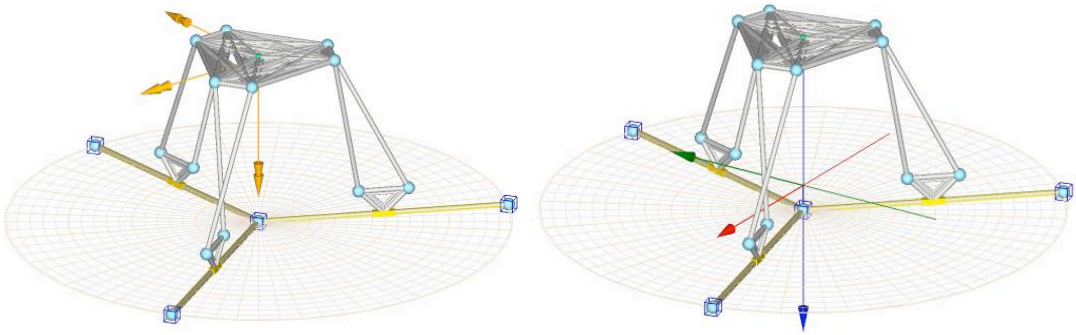


Figure 12. Ellipsoïde de vitesse du point de référence du robot parallèle représenté.

6.2 Caractérisation de la vitesse de sortie

Le patron du mouvement (*the motion pattern*) exprime la mobilité d'un élément et se définit comme le nombre et la nature des degrés de liberté, c'est à dire, rotation ou translation. Cette idée est fondamentale lorsque l'on étudie des nouvelles architectures de manipulateurs. Avec cet outil, l'utilisateur du logiciel peut rapidement obtenir ou vérifier les données de capacité de mouvement d'un manipulateur dans tout son espace de travail. Certes, dans le programme présenté, le patron du mouvement est calculé de façon instantanée pour chaque pose du manipulateur. La figure 13a montre les trois degrés de liberté de rotation (doubles flèches) du manipulateur ci-dessus. De plus, il est possible d'obtenir automatiquement le torseur cinématique principal (*principal screw)*, comme le montre la figure 13b de droite.



a) b)

Figure 13. Patron du mouvement et axe principal instantanés de la plateforme mobile.

7 Intégration du programme de simulation dans le projet thinkMOTION

Le projet européen thinkMOTION [14] comme partie de Europeana [15] représente la plus grande librairie numérique du Monde, d'accès libre, dans le domaine des systèmes mobiles. Le projet thinkMOTION prêtant améliorer et agrandir cette base de données en apportant qualité au contenu numérique avec un caractère technique contrasté. Dans ce projet, le matériel recueillis sera analysé et présenté dans un domaine web virtuel interactif multilingue via Europeana. Le patrimoine techno-culturelle et les développements actuels de la science des mécanismes sera préservé et rendu accessible à un large groupes d'utilisateurs européens comme les ingénieurs, scientifiques, enseignants, étudiants, etc. Dans la bibliothèque du futur, de nouvelles façons de représentation du contenu, de recherche d'information et de réticulation seront pris en charge. C'est précisément dans ce contexte que le logiciel présenté dans cet article a un rôle fondamental au sein de ce projet. Il vise, à travers l'utilisation des différents modules du logiciel, la caractérisation détaillée du comportement des mécanismes du point de vue cinématique. Ces modules, qui seront convenablement liées aux mécanismes étudiés, sont d'une valeur indéniable pour les chercheurs, les étudiants et les ingénieurs de conception qui sont parmi les utilisateurs les plus proches de la bibliothèque numérique en phase de développement.

8 Conclusions

Le logiciel et les modules présentés dans ce document permettront l'élaboration de modèles d'une manière rapide et simple de mécanismes complexes spatiaux et en particulier de manipulateurs parallèles. L'approche utilisée dans la mise en œuvre du logiciel est basé sur une analyse purement cinématique de calcul qui unifie toutes les analyses cinématiques pour toute topologie de manipulateur (c'est à dire, sériel, parallèle, hybrides, redondant ou non- redondant). Une fois l'équation de vitesse résolue, l'espace de travail du manipulateur est obtenue, couvrant tous les mouvements autorisés dans les limites du manipulateur. Cet espace de travail est utile pour visualiser le type de mouvement dans une planification de trajectoire. De plus, le module de l'espace de travail présenté dans cet article, permet à l'utilisateur de visualiser les espaces de travail et lieux de singularité de mécanismes spatiaux de n degrés de liberté. Par conséquent, le concepteur est en mesure de procéder à une analyse détaillé de la performance cinématique de l'ensemble du mécanisme.

9 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le soutien financier de l'Union Européenne. (thinkMOTION project, *FP7*-CIP-ICT-PSP-2009-3), du gouvernement espagnol à travers le Ministerio de Educación y Ciencia (Project DPI2008-00159) et le gouvernement régional du Pays-Basque (Project GIC10/91).

10 Références

[1] ADAMS, www.mscsoftware.com, MSC Software Corporation.
[2] DADS, www.lmsintl.com, LMS International NV.

[3] Working Model, www.design-simulation.com, Design Simulation Technologies, Inc.
[4] J. GARCIA DE JALON, M. A. SERNA, R. AVILES, "Computer method for kinematic analysis of lower-pair mechanisms, velocities and accelerations, position problems", Mechanism and Machine Theory, Vol. 16(5), 1981, pp. 543-566.
[5] P. FANGHELLA, C. GALLETTI, E. GIANNOTTI, "Computer-aided modelling and simulation of mechanisms and manipulators", Computer-Aided Design, Vol. 21, No. 9, 1989, pp. 577-583.
[6] V. PETUYA, A. ALONSO, CH. PINTO, O. ALTUZARRA, A. HERNANDEZ, "A New General-Purpose Method to Solve the Forward Kinematic Problem in Parallel Manipulators", Advanced Robotics, Vol 22(4), 2008, pp. 395-409.
[7] C. GOSSELIN, E. LAVOIE, P. TOUTANT, "An efficient algorithm for the graphical representation of the three dimensional workspace of parallel manipulators", 22nd Biennial Mechanisms Conference, 1992.
[8] J.P. MERLET, "Determination of 6D workspaces of Gough-type parallel manipulator and comparison between different geometries", The International Journal of Robotics Research, Vol. 18, 1999, pp. 902-916.
[9] V. KUMAR, "Characterization of workspaces of parallel manipulators", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 114, 1992, pp. 368-375.
[10] E. MACHO, O. ALTUZARRA, C. PINTO, A. HERNANDEZ, "Workspaces associated to assembly modes of the 5R planar parallel manipulator", Robotica, Vol. 26(3), 2008, pp. 395-403.
[11] O. ALTUZARRA, O. SALGADO, V. PETUYA, A. HERNANDEZ, "Computational kinematics for robotic manipulators: Jacobian problems". Engineering Computations, Vol. 25, 2008, pp. 4-27.
[12] E. MACHO, O. ALTUZARRA, E. AMEZUA, A. HERNANDEZ, "Obtaining configuration space and singularity maps for parallel manipulators". Mechanism and Machine Theory, Vol 44(11), pp 2110-2125, 2009.
[13] L. ZLAJPAH, "Dexterity measures for optimal path control of redundant manipulators". Proceedings of 5th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Budapest, Hungary, 1996, pp. 85-90.
[14] THINKMOTION project web page, www.thinkmotion.eu
[15] EUROPEANA web site, www.europeana.eu