

Pôle des Etudes Doctorales
Centre des Etudes Doctorales Sciences et Techniques et Sciences Médicales

AVIS DE SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT

Monsieur EL BAJI Otman

Présentera ses travaux de recherche en vue de l'obtention du Doctorat



Formation Doctorale : Sciences et Techniques de l'Ingénieurs

Discipline : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique & Mécatronique

**Le 29/11/2025 à 10H00 à la Salle de de conférence Feu Othman El Filali
Meknassi, Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tanger, UAE**

Sous le thème

**Contributions aux Formalismes Dynamiques des
Robots : Développement et Intégration dans les
Stratégies de Commande**

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Etablissement	Qualité
Pr. BRITEL Mohammed Réda	ENSA de Tanger, UAE	Président
Pr. EL ALAJI Rachid	ENSA de Tanger, UAE	Rapporteur
Pr. EL MAMOUNI Anass	ENSA de Tanger, UAE	Rapporteur
Pr. LAMRHARI Mohammed	ENSAM de Meknès, UMI	Rapporteur
Pr. EL JANATI EL IDRISSE Aziz	ENSA de Tanger, UAE	Examineur
Pr. SEFIANI Naoufal	FST de Tanger, UAE	Examineur
Pr. BEN SAID AMRANI Nabil	ENSA de Tanger, UAE	Co-Directeur
Pr. SARSRI Driss	ENSA de Tanger, UAE	Directeur

Structure de recherche d'accueil : Laboratoire de Technologies Innovantes (LTI)

Résumé



Dans cette thèse, un nouveau formalisme est appliqué pour la première fois à la dérivation des équations du mouvement de systèmes mécaniques poly-articulés, comprenant notamment les manipulateurs sériels, les manipulateurs parallèles et les manipulateurs mobiles. L'idée principale de ce formalisme est de fournir la forme finale des modèles dynamiques explicites de ces systèmes au moyen d'une procédure directe, claire et systématique, nécessitant moins d'étapes et de termes. Plus précisément, les expressions analytiques des termes liés aux effets dynamiques — à savoir le tenseur d'inertie généralisé, le tenseur centrifuge et de Coriolis, ainsi que les forces environnementales — sont obtenues directement à partir des paramètres physiques du système et des coordonnées généralisées, sans recourir aux calculs intermédiaires complexes et fastidieux couramment employés dans les approches conventionnelles, tels que ceux liés aux énergies potentielle, cinétique ou d'accélération, ainsi qu'à leurs dérivées. En outre, le modèle dynamique obtenu, entièrement fondé sur la théorie des tenseurs, peut être appliqué aussi bien à la dynamique inverse qu'à la dynamique directe. Par conséquent, cette approche facilite la modélisation et le contrôle des manipulateurs complexes tout en réduisant la charge computationnelle.

Dans cette approche, l'analyse cinématique repose sur les matrices jacobiniennes et hessiennes, issues d'une part des équations de contrainte des chaînes cinématiques fermées pour les manipulateurs parallèles, et d'autre part des équations cinématiques de l'effecteur pour les manipulateurs sériels ou mobiles. Ces matrices sont également déterminées directement à partir des paramètres physiques du système et des coordonnées généralisées, sans recourir au calcul explicite des dérivées partielles. Cela permet d'implémenter l'algorithme de manière entièrement numérique. Elles permettent ensuite d'intégrer les contraintes holonomiques au modèle dynamique, évitant ainsi le recours aux multiplicateurs de Lagrange; ou de réaliser les transformations entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel. Quant aux contraintes non-holonomiques, leurs effets sont directement intégrés dans les équations cinématiques et dynamiques du système, contribuant ainsi à réduire la complexité du problème.

L'exactitude et l'efficacité computationnelle de la méthode proposée sont ensuite démontrées par des simulations des équations dynamiques réalisées pour différentes architectures robotiques, notamment un robot SCARA à 5 DDL, une plateforme Stewart à 6 DDL et un manipulateur mobile à 8 DDL. Les simulations sont réalisées à l'aide de bibliothèques Python telles que NumPy, SymPy, SciPy et PyDy. Les performances de la méthodologie proposée sont ensuite comparées à celles de techniques bien établies dans la littérature. Les résultats confirment la précision et l'efficacité du nouveau formalisme. En effet, la formulation proposée est considérée comme la plus rapide parmi les méthodes existantes pour générer des équations dynamiques explicites et détaillées. De plus, elle montre des performances compétitives — y compris face à des formulations implicites — pour certaines structures de manipulateurs.

Enfin, afin d'illustrer l'intérêt de la formulation proposée pour des applications de commande, les modèles obtenus sont intégrés dans une architecture de commande fondée sur le modèle dynamique. Les résultats montrent que l'ensemble d'algorithme peut être calculé numériquement à chaque pas d'intégration, sans recourir à des calculs symboliques intermédiaires, souvent trop lourds pour les systèmes à grand nombre de DDL, ce qui le rend particulièrement adapté à une implémentation en temps réel. Par ailleurs, pour faire face aux incertitudes et aux perturbations externes, le modèle dynamique proposé est utilisé pour estimer ces effets, contribuant ainsi à réduire la complexité globale du système de commande. En conclusion, ce travail constitue un guide détaillé, simple et rapide pour l'implémentation de cette méthode sur différents types de manipulateurs.

Mots-clés : Nouveau formalisme, modèle dynamique explicite, approche directe, Coût computationnel, manipulateur série, manipulateur parallèle, manipulateur mobile, matrices Jacobian-Hessien, contraintes holonomiques et non-holonomiques.

