



Université Claude Bernard



DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **13 octobre 2022**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur BONIS Thomas**

Titre de la thèse : « *Simulation direct prédictive de marches pathologiques* »



Résumé

Mon travail de recherche porte sur la modélisation et la simulation du système squelettique humain, et la conception et l'analyse d'un simulateur prédictif de marches pathologiques. Il s'organise en trois volets. Le premier est la conception d'un simulateur direct capable de générer un mouvement de marche similaire à celui d'un sujet réel. Le second a pour objectif d'analyser notre simulateur dans différentes configurations. Enfin, dans le dernier volet, l'objectif est de prédire le mouvement de marche réalisable par un sujet sous l'influence d'une pathologie. La qualité des prédictions est estimée en utilisant des données cliniques fournies par le Laboratoire de Biomécanique et de Biomatériaux (LBB) du CHU de Hanovre (Allemagne), partenaire du projet ANR PRCI OMEGA dans lequel s'est déroulée cette thèse.

Dans le domaine de la simulation directe, l'évolution rapide des méthodes de contrôle a permis au cours des dernières années de passer de la reproduction de mouvements peu naturels à la production de mouvements de sujets présentant une pathologie. L'intégration de réseau de neurones dans la stratégie de contrôle est une approche couramment utilisée dans les travaux les plus récents. Mais, à notre connaissance, peu de travaux ont été réalisés afin d'évaluer les caractéristiques des contrôleurs utilisés pour produire des mouvements en simulation directe. Comme nous disposons de données cliniques pour des mouvements de marche d'un sujet sain et avec une pathologie artificiellement induite, nous avons cherché à proposer une routine d'analyse.

La première étape a consisté à pouvoir reproduire un mouvement capturé dans un simulateur direct. Pour cela, un traitement est d'abord réalisé sur le mouvement afin de le préparer à la simulation. La simulation est réalisée dans un environnement suffisamment rapide pour réaliser l'entraînement d'un réseau de neurones utilisé dans la stratégie de contrôle.

Ensuite, la seconde étape a consisté à analyser les différentes configurations du simulateur. Cela a été fait dans le but d'estimer la précision, la robustesse aux perturbations extérieures et aux changements dans le mouvement de référence. Les résultats sont utilisés pour déterminer la configuration optimale pour faire nos prédictions et pour mieux interpréter les mouvements obtenus.

La dernière étape consiste à produire des prédictions en intégrant dans notre modèle les informations sur le(s) changement(s) subit(s) par le sujet. Les prédictions sont proposées en utilisant un algorithme d'optimisation de trajectoires articulaires. Une méthode permettant de réduire le nombre de variables à optimiser est aussi proposée, et elle utilise des connaissances a priori sur la pathologie simulée.

Le suivi des mouvements sains ou pathologiques est de qualité équivalente avec différentes configurations d'entraînement. Mais les configurations d'entraînement font varier les caractéristiques en matière de robustesse. La configuration correspondant à un entraînement réalisé avec plusieurs mouvements de

référence suivi d'un *curriculum learning* avec des perturbations extérieures est la plus robuste. Elle permet de suivre plusieurs mouvements de référence sains et sous l'influence de perturbations extérieures. Cependant, un ré-entraînement est nécessaire pour suivre un mouvement dans la condition pathologique. Les différentes prédictions réalisées ont permis de produire un mouvement qui respecte la contrainte imposée par la pathologie en un temps raisonnable. Cette prédiction est différente du mouvement capturé dans le cas où le respect de la contrainte causée par la pathologie est le seul objectif.

Mots clés : Simulation directe, suivi de mouvement, caractéristiques des contrôleurs, prédiction de mouvement, optimisation de trajectoires, réseau de neurones.