

DISS. ETH NO. 27335

FULLY WEARABLE POWERED WRIST EXOSKELETON
FOR REHABILITATION TRAINING AFTER STROKE

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
CHARLES OLIVIER LAMBELET

MSc in Microengineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

born on 08.08.1988
citizen of Forel (Lavaux) VD

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Nicole Wenderoth (examiner)
Prof. Dr. Roger Gassert (co-examiner)
Dr. Walter Karlen (co-examiner)

2021

Abstract

The human wrist is to the hand, as what the pen is to the poet. The latter cannot work without the former. The wrist not only serves to orientate the hand before a grasp, but also to stabilize it during a grasp. These two functions of the upper limb are inseparable, and a disorder of the wrist joint negatively affects dexterity and grip strength of the hand. Upper limb paresis is the most common impairment following neurological disorders such as stroke, and affects more than 3'700 individuals in Switzerland each year. Stroke survivors often suffer from abnormal muscle tone such as spasticity, tremors, and pain, which affects wrist function and negatively impacts independence and quality of life.

The rehabilitation of these functions is possible during conventional therapy and can be enhanced through high dose and intensive movement-based training delivered by robotic systems. Robot-assisted therapy promotes active participation combined with proprioceptive feedback that reinforces motor learning and somatosensory recovery. By quantitatively assessing the recovery and providing a motivating environment, robot-assisted therapy stands as an adequate candidate to supplement conventional therapy. Nevertheless, therapy administered via robotic devices remains in the minority of treatments and many patients after discharge from the hospital suffer from persistent wrist and hand impairments. Therefore, novel and accessible technologies that empower the patient to self-initiate and continue rehabilitation training must be developed and made commonplace.

Home-based rehabilitation using robotic technologies is a promising and growing field that has triggered the development of many devices. In addition to promoting independent rehabilitation training, powered wearable devices have the potential to provide assistance during functional everyday tasks. However, besides meeting the requirements for supporting a given motor function, the development of such solutions must strike a balance between functionality, usability and wearability. In particular, the ease to mount and unmount (don and doff) is an essential aspect that has so far been rarely addressed in many projects targeting home-based therapy.

The aim of this thesis was to develop, characterize and evaluate a fully wearable wrist exoskeleton - the *eWrist* - that actively supports extension and flexion movements. Envisioned as a tool for assistance during daily tasks, the development focused on usability and wearability of the device. Furthermore, this thesis aimed at implementing a robust and intuitive control scheme on a wearable exoskeleton that promotes voluntary effort using physiological signals. To achieve this goal, existing technologies targeting the upper limb were reviewed and requirements for a wearable wrist exoskeleton were determined. Weight, size, actuation torque,

angular velocity, range of motion, and most importantly ease of implementation were aspects considered when choosing an appropriate transmission type that meets the requirements. With the goal of building a device for independent use, a mechanism to don the *eWrist* with a single hand was implemented. Moreover, the development of the first prototype and subsequent iterations prioritized the selection of widespread and affordable components, and the use of 3D printing techniques and open-source software that would facilitate potential integration into maker communities. The non-backdrivability of the transmission imposed the implementation of an admittance control scheme that allowed smooth and stable interactions between the user and the robot. To investigate the feasibility of intuitive control promoting voluntary effort, an sEMG-based controller was implemented and evaluated on a single healthy subject. The results showed that the fastening system enabled quick and easy donning and doffing, and a firm attachment to the forearm and hand. Moreover, the sEMG controller proved to drive the assistance support in accordance with the intention of the user. To further improve functionality and wearability, a new iteration of the *eWrist* was characterized and evaluated in fifteen healthy participants and two stroke survivors. Shortcomings of the previous iteration were addressed by: reducing weight and physical profile, increasing durability, improving interaction with the device, and further improving the donning procedure. A novel fastening system including electronics and battery was developed that enabled donning of the entire exoskeleton using one hand. Standardized human-robot interaction metrics and impedance planes were used to characterize and evaluate the various behaviours that can render the device. Based on the established requirements, the developed solution fulfilled or even outperformed expectations. The time required to mount the *eWrist* revealed that after a few practice trials participants could don it independently in about 1 min. In addition, standardized usability questionnaires completed by the participants showed that they all embraced the device and found its attachment system efficient and simple to use.

The non-backdrivability of the transmission combined with a stiffening of the wrist joint generates instabilities in the physical human-robot interaction (pHRI) that were assessed in a goal-directed visuomotor task. A variable admittance control scheme was implemented to detect and dampen these disturbances, and was evaluated in ten healthy participants and six stroke survivors performing the task. In addition, an improved sEMG-based controller, together with a gravity compensation controller were implemented to promote voluntary effort and support wrist weakness. The stability and transparency of the pHRI, characterized by metrics such as jerk, interaction force, and angular velocity/acceleration, was used to assess the effectiveness of the variable admittance scheme. In the context of the visuomotor task, the variable admittance controller proved to significantly reduce instabilities in the human-robot interaction with healthy participants. Additionally, both controllers could enhance wrist functionality of stroke survivors, especially in the most extreme angular positions and more impaired patients.

After many iterations, the latest version of the *eWrist* exoskeleton has resulted in a solution that combines lightweight, low physical profile, ease of donning, and intuitive control to support extension and flexion wrist function in patients with neuromotor impairment. Furthermore, the portability of the *eWrist* makes it suitable for deployment in various environments whether

in a clinic or at an individual's home. Finally, thanks to a focus on accessibility and simplicity throughout the design process, the *eWrist* meets an optimal trade-off between complexity and functionality to increase access to affordable orthoses for stroke rehabilitation.

Résumé

Le poignet humain est à la main, ce que la plume est au poète. Ce dernier ne peut pas fonctionner sans le premier. Le poignet sert non seulement à orienter la main avant une prise, mais également à la stabiliser pendant une prise. Ces deux fonctions du membre supérieur sont indissociables, et un trouble de l'articulation du poignet péjore la dextérité et la force de préhension de la main. La parésie du membre supérieur est la déficience la plus fréquente à la suite de troubles neurologiques tels qu'un accident vasculaire cérébral (AVC), et elle touche chaque année plus de 3'700 personnes en Suisse. Les personnes ayant subi un AVC souffrent souvent d'un tonus musculaire anormal tel que la spasticité, de tremblements, et de douleurs, qui affecte la fonction du poignet et a un impact négatif sur l'autonomie et la qualité de vie.

La réhabilitation de ces fonctions est possible durant une thérapie conventionnelle et peut être intensifiée à travers une thérapie à forte dose et à base de mouvements répétitifs délivrée par des systèmes robotiques. La thérapie assistée par robot favorise la participation active du patient combiné à un retour proprioceptif qui renforce l'apprentissage moteur et la restauration somatosensorielle. En évaluant quantitativement la rémission et en fournissant un environnement motivant, la thérapie assistée par robot s'avère être une méthode adaptée pour compléter la thérapie conventionnelle. Néanmoins, ce type de thérapie reste minoritaire et de nombreux patients, après leur sortie de l'hôpital, souffrent de déficiences persistantes du poignet et de la main. Il faut donc développer et démocratiser des technologies nouvelles et accessibles qui permettent au patient d'initier et de continuer lui-même sa réhabilitation.

La réhabilitation à domicile à l'aide de technologies robotiques est un domaine prometteur et en pleine croissance qui a déclenché le développement de nombreux appareils. En plus de promouvoir une réhabilitation autonome, les appareils portables motorisés peuvent fournir une assistance lors de tâches fonctionnelles du quotidien. Cependant, en plus de répondre aux exigences de soutien d'une fonction motrice donnée, le développement de telles solutions doit trouver un équilibre entre fonctionnalité, facilité d'utilisation et portabilité. En particulier, la facilité pour revêtir et dévêtir l'appareil est un aspect essentiel qui, jusqu'à présent, a rarement été abordé dans de nombreux projets ciblant la thérapie à domicile.

Le but de cette thèse a été de développer, caractériser et évaluer un exosquelette du poignet entièrement portable - le *eWrist* - qui soutient activement les mouvements de flexion et d'extension. Conçu comme un outil d'assistance pour les tâches quotidiennes, le développement s'est concentré sur la facilité d'utilisation et de port de l'appareil. En outre, cette thèse a visé à mettre en œuvre un contrôle robuste et intuitif d'un exosquelette portable qui promeut l'effort volontaire en utilisant des signaux physiologiques.

Pour atteindre cet objectif, les technologies existantes ciblant le membre supérieur ont été passées en revue et les exigences relatives à un exosquelette portable du poignet ont été déterminées. Le poids, la taille, le couple d'actionnement, la vitesse angulaire, l'amplitude de mouvement et, surtout, la facilité de mise en œuvre ont été des aspects pris en compte lors du choix d'un type de transmission répondant aux exigences. Afin de construire un dispositif qui peut s'utiliser de manière indépendante, un mécanisme permettant de revêtir l'*eWrist* d'une seule main a été mis en place. De plus, le développement du premier prototype et les itérations ultérieures ont donné la priorité à des choix de composants répandus et abordables, et à l'utilisation de techniques d'impression en 3D et de logiciels libres qui faciliteraient une intégration potentielle dans des communautés de maker. L'unidirectionalité de la transmission a imposé la mise en place d'un système de contrôle d'admission qui a permis des interactions douces et stables entre l'utilisateur et le robot. Pour étudier la faisabilité d'un contrôle intuitif favorisant l'effort volontaire, un contrôleur basé sur le signal électromyographique de surface a été mis en place et évalué sur un seul sujet sain. Les résultats ont montré que le système de fixation permettait de revêtir et de dévêtir rapidement et facilement l'exosquelette, et offrait une fixation solide à l'avant-bras et à la main. De plus, le contrôleur basé sur le signal électromyographique de surface s'est avéré capable de piloter l'assistance conformément à l'intention de l'utilisateur.

Pour améliorer encore la fonctionnalité et la portabilité, une nouvelle itération de l'*eWrist* a été caractérisée et évaluée avec quinze participants sains et deux survivants d'un AVC. Les lacunes de la version précédente ont été comblées en réduisant le poids et l'encombrement, en augmentant la durabilité, en améliorant l'interaction avec l'appareil et en simplifiant encore la procédure pour revêtir l'exosquelette. Un nouveau système de fixation, comprenant l'électronique et la batterie, a été mis au point, afin de pouvoir revêtir l'exosquelette complet d'une seule main. Des mesures standardisées évaluant l'interaction homme-machine et des rendus d'impédance ont été utilisés pour caractériser et évaluer les différents comportements dynamiques que peut rendre l'appareil. Sur la base des exigences établies, la solution développée a répondu aux attentes, voire les a dépassées. Le temps nécessaire pour revêtir l'*eWrist* a révélé qu'après seulement quelques essais, les participants pouvaient le revêtir de manière autonome en 1 minute environ. De surcroît, les réponses aux questionnaires standardisés remplis par les participants ont mis en exergue la simplicité d'utilisation de l'appareil ainsi que l'efficacité de son système de fixation.

L'unidirectionalité de la transmission combinée à un raidissement de l'articulation du poignet génère des instabilités dans l'interaction homme-machine qui ont été évaluées dans une tâche visuomotrice où des cibles doivent être atteintes. Un système de contrôle d'admission variable a été mis en place pour détecter et réduire ces perturbations. Il a été évalué avec dix participants sains et six survivants d'AVC. De plus, une amélioration du contrôleur basé sur le signal électromyographique de surface, ainsi qu'un contrôleur de compensation de la gravité ont été mis en place pour promouvoir l'effort volontaire et soutenir les faiblesses du poignet. La stabilité et la transparence de l'interaction homme-machine, caractérisée par des mesures telles que les saccades dans l'interaction, la force d'interaction et la vitesse/accélération angulaire, ont été utilisées pour évaluer l'efficacité du système d'admission variable. Dans

le contexte de la tâche visuomotrice, le contrôleur d'admission variable a réduit de manière significative les instabilités dans l'interaction homme-machine avec les participants sains. Les deux contrôleurs ont par ailleurs pu améliorer la fonctionnalité du poignet des survivants d'AVC, en particulier dans les positions angulaires les plus extrêmes et chez les patients présentant des déficiences plus importantes.

Après plusieurs itérations, la dernière version de l'exosquelette *eWrist* a abouti à une solution qui combine légèreté, peu d'encombrement, facilité à revêtir et contrôle intuitif afin de soutenir les fonctions d'extension et de flexion du poignet chez les patients atteints de troubles neuromoteurs. D'autre part, la portabilité de l'exosquelette *eWrist* le rend adapté à un déploiement dans de nombreux environnements, que ce soit dans une clinique ou au domicile. Enfin, grâce à l'effort mis sur l'accessibilité et la simplicité tout au long du processus de conception, l'*eWrist* répond à un compromis optimal entre complexité et fonctionnalité visant à accroître l'accès à des orthèses abordables pour la réhabilitation après un AVC.