

DISS. ETH NO. 22038

Biomimetic Stiffness for Transfemoral Prostheses

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SERGE MANUEL PFEIFER

MSc ETH in Electrical Engineering and
Information Technology, ETH Zurich

born on 16.11.1983

citizen of Zurich

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. Robert Riener, examiner
Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery, co-examiner
Prof. Dr. Eric J. Perreault, co-examiner

2014

Abstract

The loss of a lower limb is a life-altering event, giving rise to both physical and psychological challenges. The main causes of amputation in developed nations are vascular diseases, often with a diabetes comorbidity. Trauma or tumors are other reasons that can lead to the amputation of a lower limb. The use of prostheses can restore mobility and participation of the affected people in daily life to some extent and can increase quality of life in general. However, most amputees remain severely limited in mobility compared to able-bodied people. Therefore, it is necessary to find ways to improve prosthetic functionality, which could include improving actuation technology and control strategies. A promising approach to tackling this challenge is to mimic physiological function. During physiological locomotion, humans modulate their knee stiffness continuously and subconsciously according to the demands of the activity and terrain. Given modern actuator technology, powered transfemoral prostheses could, in principle, provide a similar function. However, quantitative information of how humans modulate knee stiffness during gait is lacking.

The goals of this thesis are to quantify such physiological stiffness modulation, to determine requirements for the design of a biomimetic transfemoral prosthesis, to realize such a device, and finally to experimentally assess the feasibility of using such a device as a prosthesis.

Quantifying physiological joint stiffness commonly involves perturbing the respective joint in a controlled manner through an actuated orthosis and measuring the resulting displacement and moment at the joint. This is challenging during natural gait without impeding it substantially. In this thesis, a model-based approach is developed to estimate joint stiffness in a less disruptive manner using electromyography (EMG) combined with kinetic and kinematic measurements. The approach includes a musculoskeletal model, and it estimates muscles forces based on measurements of knee moment, kinematic configuration and EMG; a model of muscle and tendon stiffness depending on muscle force allows estimation of joint stiffness. The approach is evaluated in isometric conditions, in which experimental measurements are more practical than during gait. The validation shows that model-based estimates of knee joint stiffness coincide well with experimental data obtained using conventional perturbation techniques. The model-based approach is also applied to estimate stiffness during gait.

Based on this approach, stiffness requirements for knee prostheses are derived, and a suitable actuation concept is proposed. The idea is to express stiffness and moment requirements as functions of joint angle and then to combine a series elastic actuator (SEA) with an optimized nonlinear transmission and parallel springs to reproduce the profiles. This ANGLE-dependent ELAstic Actuator (ANGELAA) is realized in a prototypal knee prosthesis that uses rubber cords as series elastic elements, effectively making it a series visco-elastic actuator (SVA). The incorporated mechatronic principles may pave the way for cheaper and lighter actuators in artificial legs and in other applications where stiffness requirements depend on kinematic configuration.

The developed prototype is tested during treadmill walking with an amputee subject. Two different control strategies employing different stiffness profiles are tested, with one of the control strategies being based on the stiffness estimated using the model-based approach. In the familiarization phase, this stiffness was required to be lowered in order to enable comfortable ambulation for the amputee. Following this adjustment, the amputee was able to walk comfortably with near-natural gait kinematics. The second control strategy was developed using manual tuning of parameters, rather than using physiological stiffness estimates; it also enabled the amputee to walk with kinematics similar to physiological gait, even though stiffness profiles deviated substantially from the profiles used in the first control strategy. The findings presented in this thesis may ultimately help to improve the quality of life of amputees.

Kurzfassung

Der Verlust eines Beins ist ein lebensveränderndes Ereignis, und ist sowohl eine physische als auch psychische Belastung für die Betroffenen. Die Hauptursachen für Amputationen in Industrieländern sind arterielle Verschlusskrankheiten, oft als Begleiterkrankung von Diabetes. Aber auch Verletzungen oder Tumore können zu Beinamputationen führen. Die Verwendung von Prothesen kann die Mobilität und Teilnahme der Betroffenen am täglichen Leben erleichtern, und die Lebensqualität verbessern. Dennoch sind die meisten Amputierten in der Mobilität stark eingeschränkt, verglichen mit Nichtbehinderten. Deshalb müssen Wege gefunden werden, um die Funktionalität von Prothesen zu verbessern. Dies könnte die Verbesserung von Aktuatortechnologien oder Regelungsstrategien beinhalten. Ein vielversprechender Ansatz um diese Herausforderung anzugehen besteht darin, physiologische Funktionen zu imitieren. Während des physiologischen Gehens passen Menschen die Steifigkeit der Kniee kontinuierlich und unterbewusst an, je nach Aktivität und Gelände. Mit moderner Aktuatortechnologie könnten Oberschenkelprothesen theoretisch ähnliche Funktionen übernehmen. Allerdings gibt es keine quantitativen Informationen wie Menschen ihre KniestEIFigkeit während des Gehens verändern.

Die Ziele dieser Arbeit sind solch physiologische Steifigkeitsvariation zu quantifizieren, Anforderungen für die Konstruktion von biomimetischen Oberschenkelprothesen herzuleiten, ein solches Gerät zu realisieren, und schliesslich die Verwendbarkeit eines solchen Geräts als Prothese experimentell zu untersuchen.

Um die Gelenksteifigkeit zu bestimmen wird das Gelenk normalerweise über eine aktuierte Orthese kontrolliert gestört, und die resultierende Auslenkung und Moment am Gelenk werden gemessen. Dies ist schwierig zu bewerkstelligen während des natürlichen Gehens, ohne den Gang empfindlich zu stören. In dieser Arbeit wird ein modellbasierter Ansatz entwickelt, um Gelenksteifigkeit mit einer weniger störenden Methode zu schätzen, mit Hilfe von Elektromyographie (EMG), kombiniert mit Kinematik- und Kinetik-Messungen. Der Ansatz beinhaltet ein Muskel-Skelett-Modell und schätzt Muskelkräfte aus Messungen von Kniemoment, Kinematik und EMG. Ein Modell für Muskel- und Sehnensteifigkeit in Abhängigkeit von Muskelkraft ermöglicht die Schätzung von Gelenksteifigkeit. Der Ansatz wird im isometrischen Fall evaluiert, wo experimentelle Messungen besser möglich sind als während des Gangs. Die Validierung zeigt, dass die modelbasierten Schätzungen für die Kniege-

lenkssteifigkeit gut mit den experimentellen Daten übereinstimmen, welche mit konventionellen Perturbations-Techniken erhoben wurden. Der modellbasierte Ansatz wird auch auf Steifigkeitsschätzungen während des Gangs angewendet.

Basierend auf dieser Methode werden Steifigkeitsanforderungen für Knieprothesen hergeleitet und ein passendes Aktuierungskonzept vorgeschlagen. Die Idee ist es, die Steifigkeits- und Momentenanforderungen in Funktion des Gelenkwinkels auszudrücken, und dann einen seriell-elastischen Aktuator (SEA) mit einer optimierten nichtlinearen Über-setzung und parallele Federn zu verbinden, um diese Profile nachzubilden. Das Konzept wird in einem Prototyp einer Knieprothese realisiert, welche Gummibänder als seriell-elastische Elemente verwendet, was ihn zu einem seriell visko-elastischem Aktuator (SVA) macht. Der Prototyp wird ANGE-LAA genannt (ANGLE-dependent ELAstic Actuator). Die eingebauten Prinzipien der Mechatronik könnten den Weg für günstigere und leichtere Aktuatoren in künstlichen Beinen ebnen, oder auch in anderen Anwendungen bei denen Steifigkeitsanforderungen von der Konfiguration der Kinematik abhängen.

Der entwickelte Prototyp wird beim Gehen auf dem Laufband von einem amputierten Probanden getestet. Zwei verschiedene Regelungsstrategien mit unterschiedlichen Steifigkeitsprofilen werden untersucht, von denen eine auf den Steifigkeitsschätzungen vom physiologischen Gang basiert. In der Gewöhnungsphase musste die Steifigkeit verringert werden, um dem Amputierten ein angenehmes Gehen zu ermöglichen. Nach dieser Anpassung konnte der Proband bequem und mit einem fast natürlichen Gangbild gehen. Die zweite Regelungsstrategie wurde mittels manueller Parameteranpassung entwickelt, und nicht mit physiologischen Steifigkeitsschätzungen. Sie erlaubte dem Amputierten ebenfalls mit einer ähnlich natürlichen Kinematik zu gehen, obwohl die Steifigkeitsprofile deutlich von den Profilen der ersten Regelungsstrategie abwichen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit könnten in Zukunft dazu beitragen um die die Lebensqualität von Amputierten zu verbessern.