

A Smart Wearable Sensing Platform for Gait Monitoring and Real-Time Haptic Feedback

Doctoral Thesis

Author(s):

Wu, Jiaen

Publication date:

2022

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000574976>

DISS. ETH NO. 28596

A SMART WEARABLE SENSING PLATFORM FOR GAIT MONITORING AND REAL-TIME HAPTIC FEEDBACK

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

presented by
JIAEN WU

M.Sc., Eindhoven University of Technology
born on 03.07.1994
citizen of Ningbo, China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bradley J. Nelson
Prof. Dr. Hamdi Torun
Prof. Dr. Salvador Pané Vidal

2022

A Smart Wearable Sensing Platform for Gait Monitoring and Real-Time Haptic Feedback

SUMMARY

Gait disorders, which can be caused by neurological or orthopedic diseases, are affecting approximately one-third of the elderly population and significantly influence their quality of life. The deterioration of gait can be used as a biomarker for aging and neurological/orthopedic diseases. Therefore, continuous gait changes monitoring and analysis provide important insights into the overall health status of both healthy subjects and patients, and show effectiveness in early deficit detection, treatment evaluation and intervention, surgical decision-making, and post-operative rehabilitation.

Currently, clinical gait analysis mainly relies on the qualitative observations by the physiotherapist and quantitative analysis with stationary and sophisticated instruments in the gait laboratory. Those methods are valuable but with limitations, such as the spatial constraints of the indoor walking environment and biased performance affected by people who are monitoring, which restrict their efficacy and reliability. The use of mobile and wearable systems has shown great potential for both clinical and remote gait monitoring and analysis. However, due to hardware limitations in mobile wearable devices (e.g., low memory and computation power), reliable real-time gait analysis remains a challenge, particularly for unsupervised daily walking assessments, which limits their wide applications in clinics.

In this thesis, a smart wearable sensing platform for real-time gait monitoring, analysis, and haptic feedback is introduced. This sensing platform consists of a pair of smart shoes that are embedded with inertial sensors and a vibratory motor. It can monitor and analyze users' gait patterns in various walking environments, including both indoor and more complex outdoor conditions. More importantly, unlike existing wearable gait analysis systems, the developed sensing platform is able to conduct real-time gait analysis by only exploiting the memory- and computation-limited embedded hardware in the shoes. The real-time gait analysis enables the smart sensing platform to deliver real-time haptic feedback to users based on their different gait characteristics. The haptic

feedback triggered based on gait patterns has the potential to restore the walking ability of patients with gait disorders and serve as a walking assist during their rehabilitation exercises.

The smart wearable sensing platform presented in this thesis has shown a significant promise as a powerful analytical and assistance tool for gait disorder diagnostics, treatments, and rehabilitation. It also broadens the clinical application of wearable gait analysis systems in remote healthcare.

ZUSAMMENFASSUNG

Gangstörungen, die durch neurologische oder orthopädische Erkrankungen verursacht werden können, betreffen etwa ein Drittel der älteren Bevölkerung und beeinträchtigen deren Lebensqualität erheblich. Die Verschlechterung des Gangbildes kann als Biomarker für das Altern und neurologische/orthopädische Erkrankungen verwendet werden. Die kontinuierliche Überwachung und Analyse von Gangveränderungen bietet daher wichtige Einblicke in den allgemeinen Gesundheitszustand sowohl von Gesunden als auch von Patienten und erweist sich als wirksam bei der frühzeitigen Erkennung von Defiziten, der Bewertung von Behandlungen und Eingriffen, der Entscheidungsfindung bei chirurgischen Eingriffen und der postoperativen Rehabilitation.

Derzeit stützt sich die klinische Ganganalyse hauptsächlich auf die qualitativen Beobachtungen des Physiotherapeuten und die quantitative Analyse mit stationären und hochentwickelten Geräten im Ganglabor. Diese Methoden sind wertvoll, haben aber ihre Grenzen, wie z. B. die beschränkte Verfügbarkeit von begehbarem Raum in Innenräumen und die subjektive Bewertung der Gehleistung durch die beobachtenden Personen, was ihre Wirksamkeit und Zuverlässigkeit einschränkt. Der Einsatz mobiler und tragbarer Systeme hat ein großes Potenzial für die klinische Überwachung und die Fernüberwachung sowie -analyse des Gehens gezeigt. Aufgrund der Hardwarebeschränkungen mobiler tragbarer Geräte (z. B. geringe Speicher- und Rechenleistung) ist eine zuverlässige Echtzeit-Ganganalyse jedoch nach wie vor eine Herausforderung, insbesondere bei der unbeaufsichtigten Bewertung des täglichen Gehens, was ihre breite Anwendung in Kliniken einschränkt.

In dieser Arbeit wird eine intelligente, tragbare Sensorplattform für die Echtzeitüberwachung und -analyse des Gangs sowie für haptisches Feedback vorgestellt. Diese Sensorplattform besteht aus einem Paar intelligenter Schuhe, die mit Inertialsensoren und einem Vibrationsmotor ausgestattet sind. Sie kann das Gangbild des Benutzers in verschiedenen Laufumgebungen überwachen und analysieren, sowohl in Innenräumen als auch unter komplexeren Außenbedingungen. Noch wichtiger ist, dass die entwickelte Sensorplattform im Gegensatz zu bestehenden tragbaren Ganganalysesystemen in der Lage ist, eine Ganganalyse in Echtzeit

durchzuführen, indem sie nur die speicher- und rechenbeschränkte eingebettete Hardware in den Schuhen nutzt. Die Echtzeit-Ganganalyse ermöglicht es der intelligenten Sensorplattform, dem Benutzer ein haptisches Feedback in Echtzeit zu geben, das auf seinen unterschiedlichen Gangmerkmalen basiert. Das haptische Feedback, das auf der Grundlage von Gangmustern ausgelöst wird, hat das Potenzial, die Gehfähigkeit von Patienten mit Gangstörungen wiederherzustellen und als Gehhilfe während ihrer Rehabilitationsübungen zu dienen.

Die in dieser Arbeit vorgestellte intelligente, tragbare Sensorplattform hat sich als leistungsfähiges Analyse- und Hilfsinstrument für die Diagnose, Behandlung und Rehabilitation von Gangstörungen erwiesen. Sie erweitert auch die klinische Anwendung von tragbaren Ganganalysesystemen in der medizinischen Fernversorgung.