

**Aachener Beiträge zur Medizintechnik**

**10**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

**Hong Ying**

---

**Distributed Intelligent Sensor Network for  
Neurological Rehabilitation Research**

Ein Beitrag aus dem Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik  
(Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt).

---

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

---

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0566-0

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Zusammenfassung

der von Frau Dipl.-Ing. Hong Ying vorgelegten Dissertation

### **Distributed Intelligent Sensor Network for Neurological Rehabilitation Research**

Das Projekt stellt ein verteiltes Netzwerk intelligenter Sensoren für die neurologische Rehabilitationsforschung vor. Das System ist für die klinische Anwendung an Parkinson Patienten entworfen.

Häufige Symptome des Morbus Parkinson (Parkinson's Disease: PD) sind der Ruhetremor, Muskelsteifigkeit, verlangsamte Bewegungen und instabile Körperhaltung. Eine weitere Begleiterscheinung des Parkinsons ist die verringerte Koordination zwischen Atmung und Bewegung. Während beim Gesunden die Schrittfolge und die Atmung unbewusst koordiniert werden, ist diese Koordination beim Parkinson Patienten gestört oder ggf. nicht vorhanden. Die Überwachung und Beurteilung dieser Koordination kann wichtige Erkenntnisse bezüglich folgender Fragen liefern: kann die Koordination als Maß für den Gesundheitszustand oder den Rehabilitationsfortschritt des Parkinson Patienten dienen? Kann die Verbesserung der Koordination die Rehabilitation von Parkinson Patienten unterstützen? Für die Bearbeitung dieser Fragen ist ein mobiles Sensornetzwerk für die Langzeiterfassung der physiologischen Signale sowie für die Echtzeitanalyse der Schritt-Atmungskoordination während der Rehabilitation erforderlich. Mit diesem Sensornetzwerk könnte der therapeutische Effekt der Rehabilitation und der Gesundheitszustand des Parkinson Patienten identifiziert werden.

Das zu entwickelnde System sollte die folgenden Anforderungen erfüllen: durch kleine Abmessungen den Tragekomfort für den Patienten sicherstellen; geringer Energieverbrauch um lange Messzeiten ohne Batteriewechsel zu ermöglichen; verlustfreie Datenerfassung und -speicherung auf dem Sensorknoten; Echtzeit-Datenverarbeitung der Schritterkennung und Bestimmung der Atemphase; Kommunikation zwischen den Sensorknoten sowie Datenaustausch mit einem PC/PDA zur Systemkonfiguration, Datenvisualisierung und weitere Datenverarbeitung.

Eine Reihe laufender Projekte haben bereits zur Schaffung proaktiver und unauffälliger Body Sensor Systeme beigetragen. Beispielsweise wurde eine Vielzahl von medizinischen Sensorplattformen auf Basis des gängigen Betriebssystems TinyOS entwickelt. Allerdings erschwert der stark eingeschränkte Zugang manch kommerziell erhältlicher Systeme die Anpassung an projektspezifische Aufgaben. Die Vorzüge von tragbaren Analysesystemen haben zu einer Vielzahl von Prototypen integriert in Textilsensoren geführt. Diese Systeme beinhalten einen Datenlogger zur Speicherung von Rohdaten, welche dann zu dem entsprechenden zentralen Expertenteam zur Auswertung transferiert werden können. Dennoch ist die sensorseitige Datenverarbeitung für zukünftige Bio-Feedback Anwendungen unabdingbar.

Gemäß der Forschungsziele und der oben beschriebenen Anforderungen wurde ein verteiltes Netzwerk drahtlos kommunizierender intelligenter Sensorknoten entwickelt. Bei diesem liegt der Fokus auf der Langzeiterfassung und Analyse der respiratorisch-lokomotorischen Koordination von Parkinsonpatienten. Das Netzwerk besteht aus portablen elektronischen mikrokontrollerbasierten Sensoren mit hohem Tragekomfort für den Patienten. Die Sensorknoten (intelligent Network Operating Devices, iNODE) beinhalten die Schaltungen für die analoge Signalaufbereitung. Verlustfreie Datenerfassung und -speicherung, sowie Echtzeitdatenverarbeitung werden auf dem miniaturisierten Sensorknoten realisiert. Eine drahtlose Lösung, basierend auf dem IEEE802.15.4. Standard ist für den Datenaustausch innerhalb dem Netzwerk sowie die drahtlose Verknüpfung zwischen den Sensorknoten und PC entwickelt. Der iNODE kann zu einem kompakten Würfel der Grundfläche 20\*20 mm<sup>2</sup> gefaltet werden. Die miniaturisierte Bauform, die flexible Konnektoren und die drahtlose Vernetzung der Sensoren garantieren einen maximalen Tragekomfort für den Patienten. Die Verwendung von extrem sparsamen Komponenten in Kombination mit ultraleichten Li-Ionen Akkus ermöglichen Aufzeichnungen rund um die Uhr. Das modulare Systemdesign ermöglicht es verschiedene Sensortypen an das iNODE System anzuschließen. Dies erlaubt eine entsprechende Erweiterung des Messsystems für zukünftige Anwendungen.

Diese Dissertation beschreibt den Entwurf einer Systemlösung in Kooperation mit klinischen Partnern, der Suche nach geeigneten Sensoren in Abhängigkeit der vorgegebenen Spezifikationen, den Prozess der Integration der Sensoren in das iNODE System, der Entwicklung der Signalaufbereitung, das Design eines Algorithmus zur echtzeitigen Signalverarbeitung zur Merkmalsextraktion und der Implementierung der

Algorithmen auf dem mikrokontrollerbasierten iNODE System. Darüber hinaus wurden erste Tests des Systems im klinischen Umfeld erfolgreich durchgeführt.

Die Dissertation ist in sechs Kapiteln aufgliedert:

- 1) Einleitung: klinischer Kontext (einschließlich der Pathologie der PD), klinische Anwendungen des Sensor-Netzwerkes, klinische- und System-Design-Anforderungen und die Konzeption des iNODE-Systems.
- 2) Methode für die Schrittdetektion: Diskussion gängiger Methoden für die Schrittdetektion und die theoretischen Grundlagen der automatischen Schrittdetektion.
- 3) Methode für die Atmungsmessung: Diskussion der nichtinvasiven Atmungsregistrierung und die Berechnung der Atmungsphase und der Phasenkoordination zwischen Schritten und Atmung.
- 4) iNODE System: Vorstellung der Hardware Plattform, der drahtlosen Kommunikation, des Software-Konzepts und der Fixed-Point-Algorithmen für die echtzeitige Signalverarbeitung.
- 5) Ergebnisse: Beschreibung der Ergebnisse bezüglich der klinischen Daten, der Implementierung der echtzeitigen Schrittdetektion sowie die Berechnung der Atemphasen.
- 6) Zusammenfassung und Perspektive: Darstellung der Zusammenfassung der Arbeit, der maßgeblichen Schlussfolgerungen und der Perspektiven für die weitere Forschung.

Die Dissertation umfasst ein breites Spektrum an technischen Fachrichtungen: Sensorik, elektronische Schaltungstechnik, Signalverarbeitung, Embedded Systems (einschließlich Software und Hardware) sowie drahtlose Kommunikation. Sie beschreibt Schrittdetektion und Phasenbestimmung aus theoretischen und praktischen Gesichtspunkten. Wichtige Komponenten und Prozesse der Entwicklung des Sensor-Netzwerk-Systems für klinische Anwendungen sind ausführlich in der Dissertation beschrieben.

Der nächste Schritt ist der klinische Einsatz des Systems während der Bewegungstherapie auf einem Laufband. Anschließend soll das mobile drahtlose Sensornetzwerk für die Langzeiterfassung der Schritt-Atmungs-Koordination während der Rehabilitation unter Alltagsbedingungen eingesetzt werden.

Aachen, September 16 November 2011

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

## Summary

of dissertation submitted by Dipl.-Ing. Hong Ying

### **Distributed Intelligent Sensor Network for Neurological Rehabilitation Research**

This project introduces a distributed intelligent sensor network for neurological rehabilitation, designed to address clinical needs of patients with Parkinson's Disease (PD).

Frequently, PD patients suffer from tremor at rest, rigidity, bradykinesia, and postural instability. Furthermore, there is often reduced coordination between respiration and locomotion, i.e., footsteps are in coordination with respiration in healthy subjects, whereas this coordination is disordered or even absent in PD patients. Monitoring and assessment of the coordination provides interesting insight into PD neurological rehabilitation: can the level of this coordination be an index for which the health status or rehabilitation progress of PD patients is gauged? Can improving this coordination promote rehabilitation of PD patients? Resolution of these issues requires a mobile sensor network system, which allows long-term monitoring of these vital signals, along with real-time analysis of the respiration-locomotion coordination during rehabilitation. This system may facilitate the assessment of therapeutic effects for PD, as well as the patients' health status.

This system should satisfy the following requirements: ensure patient comfort through miniature form-factor; low-power operation to allow for an extended period of operation without battery exchange; continuous monitoring of vital signals and autonomous measurement; lossless continuous data acquisition and storage on sensor; real-time signal processing, including detection of step events and determination of respiratory phase; communication between devices, as well as data exchange with a PC for the system configuration, data visualization and further analysis.

A number of ongoing projects have contributed to establishing proactive and unobtrusive body sensor network systems. For example, a range of wireless medical sensors has been developed based on the popular TinyOS hardware platforms. However, physical access to the commercial system can be extremely limited, thus hindering the adaptation of these systems for this project. Advances in wearable health systems have resulted in a variety of prototypes integrated with textile sensors. These systems integrate a data-logger to acquire raw data, which can then be sent to a remote expert center. Nevertheless, on-sensor processing is required to allow bio-feedback applications in the future.

To meet the needs stated above, a distributed wireless communicating network of sensor nodes composed of intelligent Network Operating Devices (iNODE) has been developed. It focuses on the long-term monitoring and analysis of the respiration-locomotion coordination for PD patients. The sensor network system incorporates portable and patient-comfortable electronic sensors for sensing the vital signals with sensor nodes based on a microcontroller. The iNODEs include analog signal conditioning circuits connected with the sensors, thus allowing for lossless data acquisition, storage, and real-time signal processing on the sensors. A wireless solution based on IEEE 802.15.4 standard has been developed for data transmission within the sensor network and communication between the sensor network and the PC. The prototype of iNODEs can be folded into a 20x20x20mm cube. The compact size, along with flex-PCB and wireless design helps improve patient comfort. Ultra low-power electronics in the system allow for 24/7 recordings with lightweight Li-Ion batteries. The modular system conception enables different physical sensors to be easily plugged into the iNODEs, thus extending the possibility of further applications to be developed for this system.

This dissertation describes the design of a system solution in cooperation with clinical partners, the search for suitable sensors according to the specifications, the process of integration of the sensors into the iNODE system, the development of the signal-conditioning circuits, the design of the real-time signal processing algorithms for feature extraction, and implementation of the algorithms on the iNODE-platform based on the microcontroller. In addition, preliminary tests of the system have been carried out in clinical setting successfully.

The dissertation is divided into six chapters:

- 1) Introduction: clinical context (including pathology of PD), clinical applications of the sensor network, clinical and system design requirements and the conceptual design of the iNODE system.

- 2) Methods for step detection: review of frequently-used methods for step detection and its theoretical background.
- 3) Methods for respiratory monitoring: review of techniques for non-invasive assessment of respiration with sections on calculation of respiratory phase and coordination between steps and respiratory phase.
- 4) The iNODE system: hardware platform, wireless communication, software structures and fixed-point algorithms for real-time signal processing.
- 5) Results: evaluation of signal-processing algorithms using clinical data and results of real-time implementation of the algorithms.
- 6) Summary and perspectives: conclusions and recommendations for future research.

The dissertation encompasses a wide scope of technical disciplines: sensor technology, electronic circuit design, signal processing algorithms, embedded system (including both software and hardware), as well as wireless communication. It explains step detection and phase determination from theoretical and practical standpoints. Major components and processes of the development of the sensor network system for the clinical application are described in detail in the dissertation.

In the next stage, this system will be tested in a clinical setting of occupational therapy involving PD patients on a treadmill. After the evaluation of this stage, further studies using this mobile wireless system will be conducted for long-term recording during daily life.

Aachen, September 16 November 2011

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt