

**4. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
26. bis 27. März 2003 in
Karlsruhe**



**„VirtualPatient - Neuromuskuläre, biomechanische
Simulation menschlicher Fortbewegung mit einer
Neuroprothese“**

T. Fuhr, J. Schneider, R. Riener, G. Schmidt
Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, München, Deutschland
E-Mail: thomas.fuhr@ieee.org

Copyright: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Band: AUTOMED 2003 - 4 . Workshop "Automatisierungstechnische Methoden
und Systeme für die Medizin"
Editors: U. Voges, G. Bretthauer
ISSN: 0947-8620
Pages: 18-19

VirtualPatient – Neuromuskuläre, biomechanische Simulation menschlicher Fortbewegung mit einer Neuroprothese

T. Fuhr, J. Schneider, R. Riener, G. Schmidt

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik,
Technische Universität München, 80290 München

thomas.fuhr@ieee.org

EINLEITUNG

Gang-Neuroprothesen versetzen querschnittgelähmte Patienten in die Lage, sich auf eigenen Beinen fortzubewegen, indem sie die gelähmte Muskulatur durch funktionelle Elektrostimulation (FES) künstlich aktivieren. Experimentelle Untersuchungen sind etwa zur Erprobung und Validierung neuer Regelungsverfahren für Gang-Neuroprothesen unbedingt notwendig, jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden [Fuhr2002].

Mit Simulationen können virtuelle Experimente durchgeführt werden, die Aufwand, Risiko und die nicht zu vernachlässigende Belastung der Patienten in realen Experimenten deutlich verringern, Einblicke in nicht oder nur schwer messbare physiologische Phänomene gewähren sowie den Entwurf von Regelungsverfahren beschleunigen. Voraussetzung für die realistische Simulation FES-induzierter Bewegungen ist die mathematische Modellierung aller Systemkomponenten des Bewegungsapparates, die bei der Bewegungserzeugung relevant sind. Detaillierungsgrad und Komplexität der eingesetzten Modelle sind an die jeweilige Aufgabenstellung anzupassen, um die Anforderungen an Modellidentifikation und Rechenzeit so gering wie möglich zu halten. Dazu ist in der Regel eine vollständige Rekonfiguration des Patientenmodells erforderlich und setzt fundierte Kenntnisse der zugrundeliegenden Neurophysiologie, Biomechanik und Mehrkörperdynamik voraus, die jedoch zur Bearbeitung vieler Fragestellungen nicht notwendig sind.

Um diesen Aufwand zu reduzieren ist eine Simulationsumgebung notwendig, die die einfache und schnelle Erstellung und Simulation komplexer Patientenmodelle mit beliebiger Anzahl von Freiheitsgraden und Muskelgruppen erlaubt. Da kommerzielle Werkzeuge, die den spezifischen Anforderungen von Neuroprothesen genügen, nicht verfügbar sind, wurde *VirtualPatient* entwickelt, eine modulare, objekt-orientierte Modellbibliothek und Simulationsumgebung, für deren Anwendung lediglich grundlegende Programmierkenntnisse in C++ vorausgesetzt werden.

METHODEN

VirtualPatient ist eine Modellbaustein-Bibliothek und Simulationsumgebung, die alle zur Simulation des

menschlichen Bewegungsapparates mit einer Neuroprothese erforderlichen Modellkomponenten zur Verfügung stellt. Die Bibliothek ist als objekt-orientierte Klassenbibliothek in C++ implementiert und besteht aus Klassen für die zu modellierenden Segmente des Skelettmodells, die FES-aktivierbaren Muskeln [Riener1998] und Reflexe sowie die Gelenke. Für die Interaktion des virtuellen Patienten mit seiner Umwelt sind Modellbausteine für Umgebungsmodelle, externe Kräfte sowie ein Intentionsmodell zur Nachahmung des Beitrags des nichtgelähmten Oberkörpers des Patienten an der Bewegungserzeugung vorhanden. Ebenso sind die technischen Komponenten einer Neuroprothese (Neurostimulator, Regelungssystem, Sensoren) modelliert.

Da mit Ausnahme der Bausteine *Intentionsmodell* und *Flexorreflex* die Struktur aller übrigen Modellbausteine unabhängig vom resultierenden Gesamtmodell sind, ist eine flexible, aufgabenspezifische Modellsynthese, wie in Bild 1 angedeutet, überhaupt erst möglich, ohne weitere Struktur Anpassungen der Klassendefinitionen vornehmen zu müssen. Aufgrund des objekt-orientierten Designs sind Erweiterungen und Modifikationen bestehender Modellklassen ohne Auswirkungen auf die Struktur der übrigen Bausteine einfach möglich. Die Bewegungsgleichungen des Skelettmodells werden nach Newton-Euler [Lutzenberger2001] implizit berechnet, daher können beliebige, baumartig strukturierte Mehrkörpermodelle synthetisiert werden.

Die Simulationsumgebung bietet neben der Aufzeichnung aller berechneten Größen auch die Möglichkeit der online-Animation. *VirtualPatient* wurde mit der Entwicklungsumgebung MS Visual C++ unter Verwen-

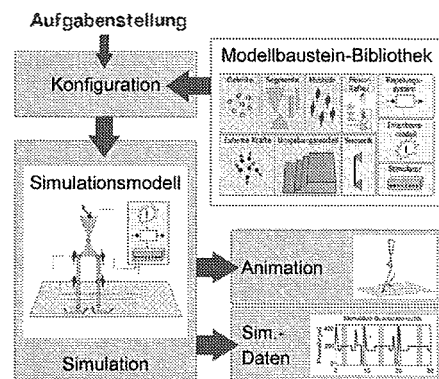


Bild 1: Aufgabenspezifische Modellsynthese

derung der Matlab C++ Math Library entwickelt.

ERGEBNISSE

Zur Simulation des ebenen Gehens wurde ein dreidimensionales Skelettmodell erzeugt, das aus den Segmenten Oberkörper, Becken, linker und rechter

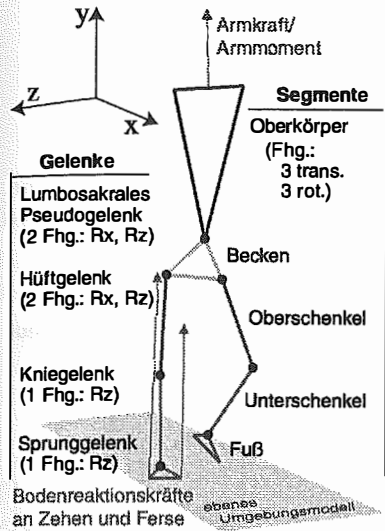


Bild 2: 3D Skelettmodell des menschlichen Bewegungsapparates.

Der ungelähmte Oberkörper einschließlich Kopf und Armen steht unter Kontrolle des Patienten und wird zu einem Segment zusammengefasst. Das Skelettmodell des virtuellen Patienten hat insgesamt 16 kinematische Freiheitsgrade und ist in Bild 2 skizziert. Je Bein sind fünf Muskelgruppen und der Flexorreflex modelliert, die über vier Reizkanäle aktiviert werden können. Die Modellparameter sind der Literatur entnommen [Riener1998]. Der Fußboden ist als ebene Fläche modelliert. Der Fuß besitzt an Ballen und Ferse je einen Kontaktpunkt, dessen Bodenreaktionskraft mit einem Feder-Dämpfer-Modell berechnet wird. Gleiten der Füße ist dabei mitberücksichtigt. Der gleichgewichterhaltende Armeinsatz und die Intention des Patienten zur Ausführung eines Schrittes wird durch ein Intentionsmodell nachgeahmt. Die Wirkung der

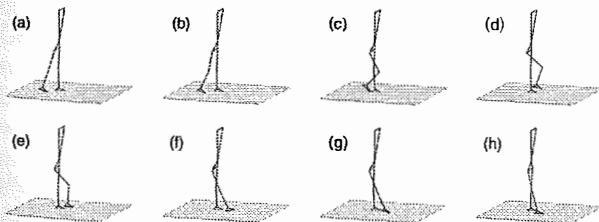


Bild 3: Simulation eines Schrittes mit *VirtualPatient*

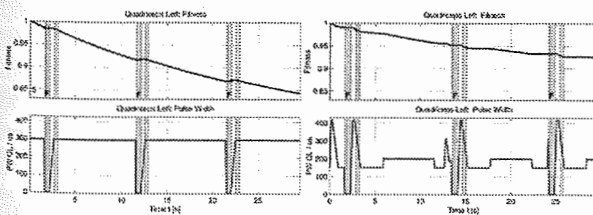


Bild 4: Kniestrecker *M. quadriceps*. *Links:* Gesteuerte Muskelaktivierung. *Rechts:* Geregelte Muskelaktivierung mit Knieextensionsregler KEC. *Oben:* Muskelfitness. *Unten:* Stimmulationsintensität über der Zeit (30s).

zwei Arme wird durch eine Kraft und ein Moment dargestellt, deren Angriffspunkt sich in Höhe des Genicks am Oberkörper befindet. Mit diesem Patientenmodell wurde die Aktivierung der Kniestreckermuskulatur während des Stehens und Gehens mit und ohne Knieextensionsregler KEC [Fuhr2002] näher untersucht. In Bild 3 ist ein simulierter Schritt in 8 Momentaufnahmen dargestellt. Während die Muskelermüdung nicht messbar ist und nur aus den in Experimenten aufgezeichneten Stimmulationsintensitäten abgeschätzt werden kann, liefert die Simulation genaueren Aufschluss. Tatsächlich kann die Muskelermüdung, wie in [Fuhr2002] postuliert, mit KEC um 50% reduziert werden. Die Abnahme der Muskelfitness ist in den oberen Grafen von Bild 4 abgebildet.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der Entwicklung der Simulationsumgebung *VirtualPatient* ist es gelungen, ein mächtiges Werkzeug zu entwickeln, mit dem neue Verfahren schnell implementiert werden können, ohne mit allen Aspekten der verwendeten Modelle vertraut sein zu müssen. Damit kann die Reglerentwicklung und die Fortentwicklung biomechanischer und neuromuskulärer Modelle vereinfacht und beschleunigt werden.

Da die Modellparameter der Literatur entnommen sind und nicht an einen Patienten angepasst wurden, gestatten die hier vorgestellten Ergebnisse nur qualitative oder, wie im Fall der Muskelermüdung, vergleichende Aussagen. Qualitativ zeigen die simulierten Gehbewegungen im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen gute Übereinstimmung mit der Realität. Obwohl Identifikationsmessungen große Anforderungen an Patienten und Messaufbau stellen, sind sie für den computergestützten Entwurf von Regelungsverfahren mit *VirtualPatient* dringend notwendig.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Sensormotorik“ (SFB 462), Teilprojekt A1, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

LITERATURHINWEISE

[Fuhr2002]

T. Fuhr, G. Schmidt, „Neue Ansätze zur Steuerung und Regelung einer kooperativen Gang-Neuroprothese“, *at-Automatisierungstechnik*, Vol 50: pp 307-316, 2002

[Lutzenberger2001]

C. Lutzenberger, *Dynamik des menschlichen Ganges*, Fortschrittberichte VDI: Reihe 17, Biotechnik 218, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001

[Riener1998]

R. Riener, T. Fuhr, „Patient-Driven Control of FES-Supported Standing Up: A Simulation Study“, *IEEE Trans. Rehab. Eng.* Vol 6: pp 113-124, 1998