

Modellbasierte Regelung der Oberarmbewegung unter Elektrostimulation der Schultermuskulatur

Christian Klauer, Thomas Schauer, Jörg Raisch
TU Berlin, Fachgebiet Regelungssysteme
klauer@control.tu-berlin.de

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Strategie zur Regelung von künstlich erzeugten Oberarmbewegungen untersucht, die durch Elektrostimulation der Schultermuskulatur hervorgerufen werden. Die entworfene Regelungsstrategie stellt im Rahmen des EU Projektes MUNDUS einen Beitrag zur Entwicklung einer Neuro-Prothese für Patienten mit muskulären Lähmungen dar, die es den Betroffenen ermöglichen soll Greifbewegungen auszuführen. Referenztrajektorien für das Regelsystem werden vor jeder Bewegung durch einen Algorithmus zur Trajektorienplanung berechnet.

1 Motivation

Multiple Sklerose, Friedreich-Ataxie und Amyotrophe Lateralsklerose – all dies sind Erkrankungen des Nervensystems, welche motorische Einschränkungen bzw. Lähmungen hervorrufen können. Sie können auch die oberen Extremitäten betreffen, sodass die Patienten dort willentlich keine oder nur sehr schwache Muskelkontraktionen erzeugen können. Ähnliches gilt auch für Querschnittlähmungen mit hoher Läsionshöhe.

Für Patienten mit noch vorhandener Restaktivität existieren mechanisch realisierte Lösungen (Exoskelette), die die auf den Arm wirkende Schwerkraft kompensieren, sodass die Betroffenen weniger Kraft aufbringen müssen.

Für komplett gelähmte Personen ist dies allerdings etwas schwieriger. Dieser Fall wird in diesem Artikel aufgegriffen: Es sollen die Voraussetzungen zur Entwicklung einer Neuro-Prothese geschaffen werden. Ziel ist es, die oberen menschlichen Extremitäten durch künstliche, elektrische Aktivierung der gelähmten Muskulatur bei Vorhandensein einer passiven Gewichtskompensation zu bewegen.

2 Methoden

Zur Unterstützung der durch die Elektrostimulation hervorgerufenen Muskelkräfte wird eine passive Gewichtsentlastung in Form eines Exoskelettes (ArmeoSpring, Hocoma, Zürich) verwendet, sodass durch den verminderten muskulären Kraftaufwand einer schnellen

Ermüdung der beteiligten Muskeln vorgebeugt werden kann. Eine Sensorfusion aus zwei Inertialsensoren, die jeweils am Unter- und Oberarm befestigt sind, mit den Winkelsensoren des Exoskelettes als Referenzmessung, ermöglicht die Schätzung der Schulter- und des Ellenbogengelenkwinkels.

Durch eine Positionsregelung, welche die Intensitäten der elektrischen Stimulation als Stellgrößen verwendet, sollen definierte Bewegungen des Arms, beispielsweise die Führung der Hand zu einem greifbaren Objekt, realisiert werden. Vorher werden hierzu die Trajektorienverläufe der verschiedenen Gelenkwinkel durch einen Algorithmus berechnet, welcher die benötigte Zeitdauer der Trajektorie zwischen einem Start- und Endpunkt unter der Bedingung einer betragsmäßig konstanten Beschleunigung der Hand minimiert. Die Zielposition der Bewegung, die in der Praxis meist ein Objekt darstellt, wird durch ein Umgebungssensorsystem eines Projektpartners ermittelt.

2.1 Regelung der Schultergelenkwinkel

Die Regelung selbst ist durch zwei Teilregler realisiert: Für den Ellenbogengelenkwinkel wird eine Kaskadenregelung mit Beschleunigungs- und Winkelrückführung verwendet, wie sie bereits in [1] beschrieben wurde.

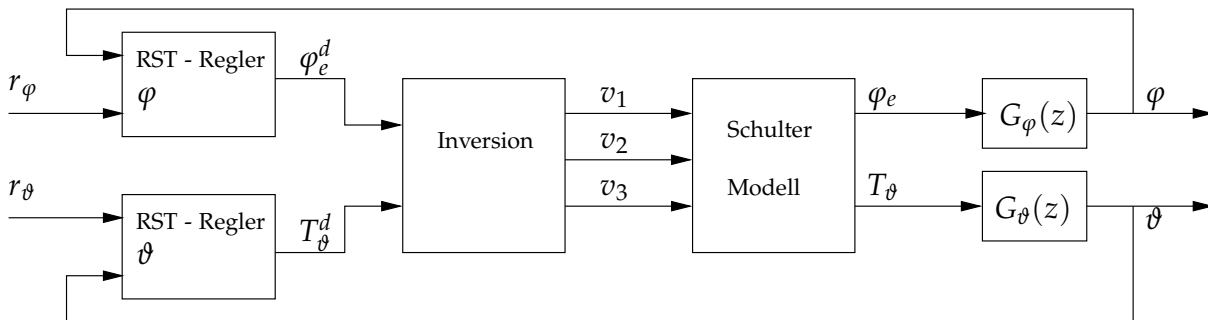


Abbildung 1: Struktur zur Regelung der beiden Schultergelenkwinkel φ und ϑ über die Stimulationsintensitäten v_1 , v_2 und v_3 .

Zur Regelung der Schultergelenkwinkel für die Oberarmhebung ϑ sowie der für die horizontale Bewegung φ findet die in Abb. 1 dargestellte entkopplungsbasierte Mehrgrößenregelung Anwendung.

Hierzu wird zunächst ein statisches Modell angenommen, welches das Verhalten von drei Stimulationsintensitäten v_1 , v_2 und v_3 auf das resultierende Moment für die Aufwärtsbewegung T_ϑ sowie auf den sich stationär einstellenden Winkel φ_e beschreibt. Offene Parameter werden durch ein Identifikationsexperiment und anschließender Schätzung mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Aus diesem Modell wird eine Inversion berechnet, welche – wie in Abb. 1 auf das System angewendet – die Einstellung eines gewünschten Momentes T_ϑ^d und eines gewünschten Winkels φ_e^d für den stationären Fall ermöglicht und der Entkopplung beider Freiheitsgrade dient. Da die Inversion überbestimmt ist, wird eine weitere, physiologisch sinnvolle, Nebenbedingung herangezogen.

Die dynamischen Komponenten $G_\varphi(z)$ und $G_\vartheta(z)$ des biomechanischen Systems werden durch ein zweites Identifikationsexperiment ermittelt, bei dem die Inversion auf das reale

System angewendet wurde. Das System wurde durch sprungförmige Testsignale angeregt, welche auf die Eingänge T_{θ}^d und φ_e^d der Inversion gegeben werden.

Anschließend wird für beide Freiheitsgrade jeweils ein RST-Regler [2] mit integrativem Anteil und einer Anti-Reset-Windup Strategie entworfen. Beide Regler verwenden jeweils die Eingänge T_{θ}^d und φ_e^d als virtuelle Stellgrößen.

Das gesamte Regelsystem wurde zeitdiskret auf einem PC unter Linux mithilfe von OpenRTDynamics¹ implementiert. Die Sensoren und das Gerät zur muskulären Stimulation (RehaStim 2, HASOMED GmbH, Magdeburg) sind über USB-Schnittstellen mit dem PC verbunden.

3 Ergebnisse und Zusammenfassung

Die entwickelte Regelstrategie wurde experimentell mit gesunden Probanden erfolgreich erprobt. Die Identifikation der Modellparameter und die Einstellung der Regler müssen zu Beginn jeder experimentellen Untersuchung durchgeführt werden, da u.a. die Elektrodenpositionen nicht exakt reproduzierbar sind. Aufgrund der vereinfachten Modelle lässt sich dieser „Tuning“-Schritt jedoch innerhalb von wenigen Minuten bewerkstelligen.

4 Diskussion

Die im Vergleich zur Komplexität des Systems einfache Regelungsstruktur für die Schulter ermöglicht bereits eine gute Positionierung des Arms. Testläufe der Regelung zeigen allerdings eine eingeschränkte Erreichbarkeit und horizontale Positioniergenauigkeit im Bereich geringer Armhebung. Die prinzipielle Machbarkeit einer Gelenkwinkelregelung für die Schulter wird jedoch gezeigt.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten im Projekt MUNDUS durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 248326.

Literatur

- [1] C. Klauer, T. Schauer, J. Raisch: *Gelenkwinkelregelung durch Elektrostimulation eines antagonistischen Muskelpaares*, eingereicht bei at – Automatisierungstechnik, 2011.
- [2] B. Wittenmark: *Computer-controlled Systems: Theory and Design*, Prentice-Hall International Editions, 1990.

¹<http://openrtdynamics.sf.net>