
Komputationale Modelle für die Bewegungsplanung

Thorsten Stein, Christian Simonidis, Andreas Fischer, Wolfgang Seemann & Hermann Schwameder

Universität Karlsruhe (TH)

Einleitung

Das Ziel des DFG-Sonderforschungsbereiches 588 „Humanoide Roboter“ ist die Entwicklung eines humanoiden Serviceroboters, der sich möglichst menschenähnlich bewegen soll, um die Mensch-Maschine-Interaktion zu erleichtern. Die Basis für die Übertragung menschlicher Bewegungen auf die Maschine bildet eine komputationale Analyse menschlicher Bewegungen. Die Leichtigkeit, mit der sich gesunde Menschen im Alltag bewegen, verdeckt häufig die komplizierten physikalischen Probleme, die das Zentralnervensystem (ZNS) bei der Kontrolle eines hochredundanten Bewegungssystems zu lösen hat. Die Bewegungssteuerung wird in komputationalen Ansätzen durch eine Kombination zweier Instanzen modelliert. Ein Planer berechnet auf der Grundlage des Bewegungsziels sowie der aktuellen Randbedingungen eine Trajektorie. Inverse interne Modelle, die als Controller fungieren, bestimmen die erforderlichen motorischen Kommandos, die für die Ausführung der geplanten Trajektorie nötig sind (Kawato, 1999). Obwohl es bei der Bewegungssteuerung für eine gegebene Bewegungsaufgabe aufgrund der hohen Redundanz des menschlichen Bewegungssystems keine eindeutige Bewegungslösung gibt, bevorzugen Menschen bei einfachen zielgerichteten Bewegungen stereotype Trajektorien mit festen invarianten Eigenschaften (Abend, Bizzi & Morasso, 1982). Optimierungsmodelle sind in der Lage, invariante Eigenschaften menschlicher Bewegungen auf verschiedenen Ebenen (z. B. Handtrajektorien oder Gelenkwinkel) zu reproduzieren (Todorov, 2004). Das Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, anhand von menschlichen Zeigegesten zu untersuchen, ob sich Prozesse der Bewegungsplanung im ZNS mit Optimierungsansätzen modellieren lassen. Konkret wird geprüft, ob ein Minimum Hand Jerk Modell (MHJM), ein Minimum Angle Jerk Modell (MAJM) (Flash & Ho-

gan, 1985), ein Minimum Torque Modell (MTM) oder ein Minimum Torque Change Modell (MTCM) (Uno, Kawato & Suzuki, 1989) real gemessene Trajektorien am besten reproduzieren kann. Obwohl die genannten Optimierungsmodelle seit längerem in der Literatur bekannt sind, sind mehrgelenkige Bewegungen im 3D-Raum bisher kaum untersucht worden (Flash, Hogan & Richardson, 2003).

Methode

An der Studie nahmen N = 20 Probanden teil, die jeweils fünfmal auf vier verschiedene Ziele zeigen mussten. Die Bewegungen waren in normaler Geschwindigkeit und Präzision durchzuführen. Mit einem Vicon IR-Tracking-System wurde der ganze Körper der Probanden abgetastet. Die Marker wurden mit Hilfe der Vicon Workstation Software 3D-rekonstruiert und mit quintischen Splines geglättet. Die Markertrajektorien bilden die Grundlage für die biomechanische Modellierung. Dabei wird auf ein von Stelzner (2007) entwickeltes biomechanisches Ganzkörpermodell mit 38 Freiheitsgraden zurückgegriffen. Die Bewegungsgleichungen werden nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit bestimmt. Auf der Grundlage der experimentell gemessenen Daten werden für feste Start- und Endposen sowie vorgegebene Bewegungszeiten diejenigen Trajektorien berechnet, die die oben genannten Optimierungskriterien minimieren. Hierzu wird auf einen direkten Ansatz (Eriksson, 2007) zur Lösung des optimalen Steuerungsproblems in Verbindung mit den bereits vorhandenen dynamischen Modellgleichungen zurückgegriffen. Zur Prüfung des MAJM, MTM und MTCM erfolgt ein Vergleich der Daten beginnend mit einem Bewegungsfreiheitsgrad bis hin zu vier Bewegungsfreiheitsgraden in allen möglichen Kombinationen (Schulterabduktion, Schultererelevation, Ellbogenflexion und Thoraxrotation).

Ergebnisse und Diskussion

Die kinematische Analyse der Zeigegesten zeigt u. a., dass alle Probanden bei allen vier Zielen gekrümmte Bewegungsbahnen der Hand mit eingipfligen, annähernd glockenförmigen Geschwindigkeitsprofilen bevorzugen. Gekrümmte Trajektorien können mit dem MHJM nicht reproduziert werden,

da eine Minimierung des Rucks zu geraden Trajektorien führt. Dies schließt eine Planung in extrinsischen Handkoordinaten allerdings nicht grundsätzlich aus, da die Möglichkeit besteht, dass der Planer gerade Trajektorien plant, diese virtuellen Trajektorien aber z. B. durch Wechselwirkungen von Drehmomenten im Arm gestört werden (Flash et al., 2003). Die ersten Resultate der Simulationen zeigen, dass das entwickelte Simulationsframework funktioniert, d. h. plausible Ergebnisse liefert. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse der ersten Simulationen für jeweils einen Bewegungsfreiheitsgrad daraufhin, dass das MTCM dem MTM auf Gelenkwinelebene überlegen ist, d. h. die experimentell ermittelten Daten besser reproduzieren kann.

Literatur

- Abend, W., Bizzi, E. & Morasso, P. (1982). Human Arm Trajectory Formation. *Brain*, 105, 331–348.
- Eriksson, A. (2007). Temporal Finite Elements for Target Control Dynamics of Mechanisms. *Computers and Structures*, 85, 1399–1408.
- Flash, T. & Hogan, N. (1985). The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model. *Journal of Neuroscience*, 5, 1688–1703.
- Flash, T., Hogan, N. & Richardson, M. (2003). Optimization Principles in Motor Control. In M. Arbib (Ed.), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (2. ed.) (pp. 827–831). Cambridge: MIT Press.
- Kawato, M. (1999). Internal Models for Motor Control and Trajectory Planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718–727.
- Stelzner, G. (2007). Zur Modellierung und Simulation biomechanischer Mehrkörpersysteme (unveröffentlichte Dissertation). Universität Karlsruhe (TH): Institut für Technische Mechanik.
- Todorov, E. (2004). Optimality Principles in Sensorimotor Control. *Nature Neuroscience*, 9, 907–915.
- Uno, Y., Kawato, M. & Suzuki, R. (1989). Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement. *Biological Cybernetics*, 61, 89–101.