

Die Bedeutung von Kostenfunktionen für die Steuerung der Bewegung des menschlichen Armes

The application of cost functions to the control of the movement of the human arm

E. WISCHMEYER, M. BRÜWER, P. BROCKFELD, H. CRUSE, Fakultät für Biologie, Fakultät für Mathematik, Universität Bielefeld, Postfach 8640, D-4800 Bielefeld 1

Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Mechanismen zu verstehen, die die Bewegungen des menschlichen Armes kontrollieren. Im Experiment hat die Versuchsperson die Aufgabe, mit einem an der Hand befestigten Zeiger Bewegungen zwischen verschiedenen Start- und Zielpunkten durchzuführen. Die Bewegungen sind auf eine horizontale Ebene beschränkt. In den zunächst geschilderten Versuchen können drei Gelenke, nämlich Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk frei bewegt werden. Da zwei freie Winkel ausreichen würden, um einen Zielpunkt in der Ebene zu erreichen, hat das System einen überzähligen Freiheitsgrad, es ist «redundant». Hier erhebt sich die Frage, auf welche Weise aus der Vielzahl der geometrisch möglichen Stellungen eine bestimmte Armstellung ausgewählt wird. In den statischen Untersuchungen werden nur die Gelenkwinkel am Ende der Bewegung, d.h. nach Erreichen des Zielpunktes, in den kinematischen Untersuchungen auch die Winkel während der Bewegung betrachtet.

Statische Untersuchungen (Cruse H 1986: *Biol Cybernetics* 54, 125) führten zu folgender Hypothese. Jedem der drei Gelenke ist eine Kostenfunktion zugeordnet. Die Kosten der Gelenkstellungen werden um so größer, je weiter das Gelenk von einer mittleren Stellung, die dem Kostenminimum entspricht, fortbewegt wird. Die zu einem vorgegebenen Zielpunkt gehörenden drei Winkelwerte werden so gewählt, daß die Gesamtkosten, d.h. die Summe der Kosten aller drei Gelenke, minimal werden. Diese Hypothese konnte erfolgreich auch auf die Beschreibung der Kinematik der Armbewegungen angewandt werden (Cruse H, Brüwer M 1987: *Biol Cybernetics* 57, 137).

Mit Hilfe eines mathematischen Näherungsverfahrens können zwar aus den statischen Werten rechnerisch Kostenfunktionen bestimmt werden. Dennoch blieb bisher offen, ob ein biologisches Korrelat für diese Kostenfunktionen existiert. Mit psychophysischen Methoden wurde ein Bequemheitsmaß für die einzelnen Gelenkstellungen bestimmt. Die Form dieser subjektiven Kostenfunktionen kann mit den rechnerisch bestimmten Funktionen verglichen werden. Dabei ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen den beiden für die jeweilige Versuchsperson bestimmten Kostenfunktionen (16 VP). Die Lage der Minima der einzelnen subjektiven Kostenfunktionen war nicht abhängig von der Stellung der anderen Gelenke (10 VP). Als im statischen Experiment die Länge des mit der Hand verbundenen Zeigers

verdoppelt wurde, konnten die Ergebnisse mit denselben Kostenfunktionen beschrieben werden (3 VP). Diese Ergebnisse unterstützen die Hypothese des Einsatzes von Kostenfunktionen. Zugleich zeigen sie, daß die subjektiv empfundene Bequemheit einer Gelenkstellung ein Maß für den jeweiligen Wert dieser Kostenfunktion darstellt.

Im Anschluß wurde geprüft, ob sich diese Hypothese auch auf einen Arm mit vier Gelenken ausdehnen läßt, bei dem also in unserer Versuchsanordnung zwei überzählige Freiheitsgrade vorliegen. Dazu wurde der an der Hand angebrachte Zeiger um ein weiteres Glied verlängert, dessen Gelenk über Bewegungen der Finger gesteuert werden kann. In zwei Vorversuchen wurde zunächst jeweils ein Gelenk, entweder das Schulter- oder das Fingergelenk steif gehalten. Damit konnte gezeigt werden, daß die Hypothese nicht nur auf den proximalen, sondern auch auf den distalen Drei-Gelenkarm angewandt werden kann. Die Untersuchung des Vier-Gelenkarmes ergab, daß die Resultate wesentlich schlechter reproduzierbar sind als beim Drei-Gelenkarm. Die Streuung der Winkelwerte war etwa doppelt so groß (8 VP). Dies zunächst unerwartete Ergebnis widerspricht allerdings nicht der Hypothese des Einsatzes von Kostenfunktionen auch im Fall des Vier-Gelenkarmes. Eine Modellrechnung zeigt nämlich, daß beim Übergang vom Drei- zum Vier-Gelenkarm die Minima der Gesamtkostenfunktion wesentlich flacher werden. Es entsteht ein breiter Bereich nahezu gleich teurer Stellungen. Eine entsprechend größere Streuung der Winkelwerte ist also zu erwarten.