

Untersuchung anthropomorpher Geschwindigkeitsprofile von Roboterbewegungen zur Erhöhung der Arbeitssicherheit bei der Mensch-Roboter-Interaktion

Henning PETRUCK, Sinem KUZ,
Alexander MERTENS, Christopher M. SCHLICK

*Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen
Bergdriesch 27, D-52062 Aachen*

Kurzfassung: In sozio-technischen Systemen mit Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) sind das Verständnis der Handlungen des Roboters, die Sicherheit der Arbeitsperson und die mentale Beanspruchung von essentieller Bedeutung. Durch Anthropomorphismus können Akzeptanz und das Vertrauen in ein technisches System erhöht werden. Im diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer Probandenstudie vorgestellt, bei der der Einfluss unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile (konstant und anthropomorph) bei Roboterbewegungen auf die mentale Beanspruchung des Menschen sowie die Vorhersage von angesteuerten Positionen untersucht wurde. Durch den Gebrauch des anthropomorphen Geschwindigkeitsprofils kann die Vorhersagegenauigkeit erhöht werden.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Kooperation, Anthropomorphismus, Arbeitssicherheit

1. Einleitung

Durch die hohe Variantenvielfalt in der Produktion kommt es immer wieder zu Montageschritten deren Automatisierung bei kleiner Losgröße nicht wirtschaftlich umsetzbar ist. Zudem gibt es Montageschritte, die gar nicht oder nur sehr schwer zu automatisieren sind. Dennoch wird die automatisierte Produktion auch für diese Produkte angestrebt. Die Montageschritte, die nicht automatisiert durchgeführt werden können, werden in diesem Fall an einem Mensch-Roboter-Kooperations (MRK)-Arbeitsplatz durchgeführt, der an eine automatisierte Montagezelle angegliedert ist. Die Aufgabe des Roboters besteht in diesem Szenario im Anreichen der benötigten Bauteile und Werkzeuge. Wichtige Fragestellungen sind hierbei neben Sicherheitsaspekten die Akzeptanz des Roboters im Arbeitssystem und die Beanspruchung der Arbeitsperson. Ein vielversprechender Ansatz, um die Akzeptanz zu erhöhen, ist die anthropomorphe Gestaltung des Roboters (Duffy 2001). Kuz & Schlick (2015a, 2015b) untersuchten im Rahmen einer virtuellen Simulationsstudie den Effekt von anthropomorphen und konstanten Geschwindigkeitsprofilen auf die Vorhersage der Zielposition bei menschlichen Platzierungsbewegungen eines Portalroboters auf ein schachbrettähnliches Feld. Dabei führte die Verwendung des anthropomorphen Geschwindigkeitsprofils zu signifikant niedrigeren Prädiktionszeiten und Fehlerraten. In einer weiteren von Kuz et al. (2015) durchgeführten Studie wurden menschliche Gelenkwinkel auf eine Robotersimulation bei Platzierungsbewegungen übertragen und mit herkömmlichen Point-to-Point (PTP) Roboter-

bewegungen verglichen. Hierbei wurde die Aktivierung der Spiegelneuronen, welche auf eine Intentionserkennung hindeutet, bei Betrachtung der Simulation gemessen. Es konnte eine stärkere Aktivierung der Spiegelneuronen bei der Betrachtung anthropomorpher Bewegungen nachgewiesen werden.

Als Weiterführung dieser Studien wurde im Rahmen dieses Beitrags der Effekt des Geschwindigkeitsprofils bei PTP-Bewegungen auf die Prädiktionszeit, Fehlerrate und die mentale Beanspruchung untersucht. Als Geschwindigkeitsprofil wurden wie auch bei Kuz & Schlick (2015a, 2015b) anthropomorphe und konstante Profile untersucht. Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse dieser Simulationsstudie zusammen.

2. Methodik

2.1 Übertragung der Geschwindigkeitsprofile auf PTP-Bewegungsbahnen

Da diese Untersuchung eine Weiterführung der durch Kuz & Schlick (2015a, 2015b) durchgeführten Studie ist, dienen auch die in dieser Studie verwendeten Bewegungsbahnen als Grundlage für die hier durchgeführte Studie. Die Bewegungsbahnen unterscheiden sich grundsätzlich von denen in der bereits durchgeführten Studie, in der anthropomorphe Bewegungsbahnen verwendet wurden. Diese wurden durch ein Infrarot-Motion-Tracking System bei Platzierungsbewegungen an einem menschlichen Probanden aufgenommen. In der hier vorgestellten Studie werden PTP-Bewegungen betrachtet. Um aus einer anthropomorphen Bewegung eine PTP-Bewegung zu generieren, müssen lediglich Start- und Zielposition übernommen werden. Durch das Umstellen der Robotergelenke von den Gelenkwinkeln der Start- zu denen der Zielposition wird eine PTP-Bewegung durchgeführt. Die anthropomorphe und PTP-Bewegungsbahnen haben beide einen parabelförmigen Verlauf, allerdings hat die Parabel der PTP-Bewegungsbahn anders als die der anthropomorphen eine positive Steigung, was dazu führt, dass sich der Roboter der Zielposition von unterhalb des Feldes annähert (Abb. 1). Praktisch ist diese Bewegung also aufgrund von Kollisionen mit dem Feld nicht durchführbar. Wenn die Arbeitsfläche allerdings so weit abgesenkt wird, dass sich kein Punkt der Bewegungsbahn unterhalb der Zielposition befindet, können Kollisionen mit der Arbeitsfläche vermieden werden. Deshalb wurde die Arbeitsfläche im Vergleich zu den vorherigen Studien um 200 Höheneinheiten nach unten versetzt (Abb. 1).

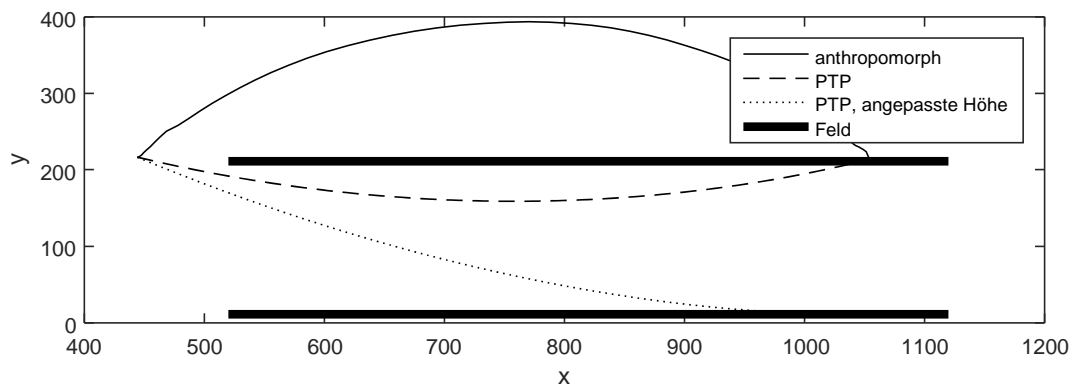


Abbildung 1: Anthropomorphe und PTP-Bewegungsbahnen mit ursprünglicher und angepasster Höhe des Feldes

Nachdem die Bewegungsbahnen eindeutig definiert wurden, wurde das Geschwindigkeitsprofil angepasst. Die hierfür verwendeten Geschwindigkeitsprofile wurden ebenfalls aus der vorangehenden Studie übernommen (Abb. 2). Da diese numerisch berechnet wurden, liegen sie in diskreter Form mit einer endlichen Anzahl an Samples vor. Bei dem anthropomorphen Geschwindigkeitsprofil fällt nach 60 Samples, nachdem die Geschwindigkeit erst zu- und dann wieder abgenommen hat, ein Rauschen in dem Signal auf. Dieses ist durch das „Ruckeln“, welches während der Feinpositionierung durch das Infrarot-Motion-Tracking System aufgenommen wurde, zu erklären. Bei der Feinpositionierung werden allerdings Korrekturen durchgeführt, d.h. die Hand wird erst ein Stück in die eine und dann wieder in die andere Richtung bewegt. Da die PTP-Bewegungsbahn keine Feinpositionierung enthält, sondern zielgerichtet auf die Zielposition zugeht, wurde der Feinpositionierungsanteil des Geschwindigkeitsprofils für die PTP-Bewegungsbahnen ignoriert und nur der erste Teil des Profils verwendet. Die Trennlinie ist durch die gestrichelte Linie bei 60 Samples angegeben.

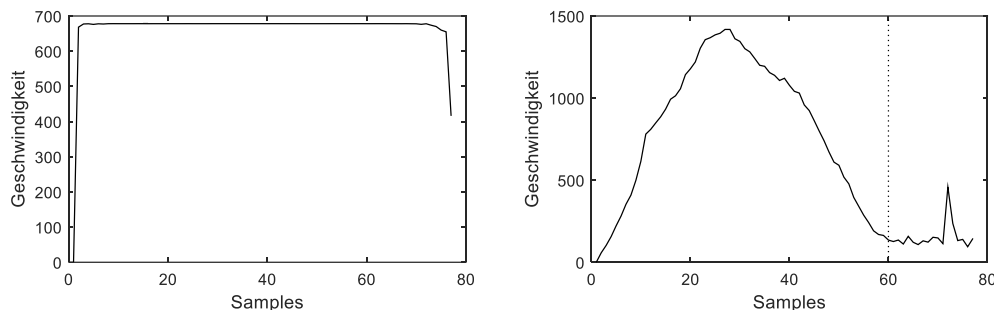


Abbildung 2: Konstantes (links) und anthropomorphes (rechts) Geschwindigkeitsprofil der Roboterbewegungen.

Der Verlauf der PTP-Bahnen wird durch die Positionsdaten beschrieben. Diese liegen in den Vektoren $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$, $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n)$ und $\mathbf{z} = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n)$ der Länge n vor, das Geschwindigkeitsprofil im Vektor $\mathbf{v} = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_N)$ der Länge N . Die Weglänge der Bewegungsbahn bis zur j -ten Koordinate wird durch die Formel

$$s_{PTP,j} = \sum_{i=1}^{j-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \quad 1 \leq j \leq n$$

berechnet. Die Gesamtbewegungsdauer orientiert sich an der Bewegungsdauer T aus der vorangegangenen Studie. Das Geschwindigkeitsprofil gibt die Geschwindigkeit in äquidistanten Zeitschritten vor. Durch die festgelegte Bewegungsdauer T und die Anzahl der Samples im Geschwindigkeitsprofil ergibt sich für die Zeitschritte des Geschwindigkeitsprofils die Dauer

$$\Delta t = \frac{T}{N-1}.$$

Mithilfe dieser Dauer lässt sich durch numerische Integration über die Trapez-Regel die zurückgelegte Wegstrecke eines beliebigen Geschwindigkeitsprofils $\xi \in \mathbb{R}^{1 \times M}$, $M \in \mathbb{N}$ bis zum j -ten Sample berechnen:

$$s_{Profil,j}(\xi) = \Delta t \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\xi_{i+1} + \xi_i}{2}, \quad 1 \leq j \leq M.$$

Mithilfe des Skalierungsfaktors

$$\alpha = \frac{S_{PTP,n}}{S_{Profil,N}(\mathbf{v})},$$

dem Quotienten aus Gesamtlänge der Bewegungsbahn und Geschwindigkeitsprofil, lässt sich ein skaliertes Geschwindigkeitsprofil \mathbf{w} berechnen, bei dem die zurückgelegte Strecke identisch mit $S_{PTP,n}$ ist:

$$\mathbf{w} = (w_1 w_2 \dots w_N) = \alpha \cdot \mathbf{v}.$$

Die Bewegungsbahn mit skaliertem Geschwindigkeitsprofil wird über anzusteuern Positionen in äquidistanten Zeitschritten der Länge $\delta t = 16 \text{ ms}$ definiert. Diese Aufteilung der Zeitschritte begünstigt einen ruckelfreien Ablauf der Bewegungen in der virtuellen Simulation. Die erste Position $\mathbf{p}_1 = (x_1 y_1 z_1)^T$ wird mit den Anfangskoordinaten der PTP-Bahn initialisiert. Für alle weiteren Zeitschritte folgen iterativ die Schritte Berechnen des zurückgelegten Wegs nach j Zeitschritten mithilfe des Geschwindigkeitsprofils und der Position auf der Bewegungsbahn, die dieser Strecke entspricht. Die aktuelle Zeit t_j beim j -ten Zeitschritt beträgt $t_j = (j - 1) \cdot \delta t$. Für die Berechnung des zurückgelegten Wegs wird zwischen den beiden zeitlich nächstgelegenen Punkten des Bewegungsprofils interpoliert:

$$s(t_j, \mathbf{w}) = S_{Profil,k-1}(\mathbf{w}) + \left(S_{Profil,k}(\mathbf{w}) - S_{Profil,k-1}(\mathbf{w}) \right) \cdot \frac{t_j - (k - 1) \cdot \Delta t}{\Delta t}$$

mit $k = \min_{1 \leq k \leq N} \{k \cdot \Delta t > t_j\}$. Durch Interpolation zwischen den Punkten der Bewegungsbahn wird die Position berechnet, an der die Strecke $s(t_j)$ zurückgelegt wurde:

$$\mathbf{p}_j = \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix} + \left(\begin{pmatrix} x_{l+1} \\ y_{l+1} \\ z_{l+1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix} \right) \cdot \frac{s(t_j, \mathbf{w}) - S_{PTP,l}}{S_{PTP,l+1} - S_{PTP,l}}$$

mit $l = \min_{1 \leq l \leq n} \{S_{PTP,l+1} > s(t_j)\}$. Somit sind Positionen und Zeitpunkte der Bewegungsbahn eindeutig definiert.

2.2 Versuchsdurchführung

Insgesamt werden 20 verschiedene Positionen auf einem 4 x 5 – Feld angesteuert. Durch die zwei verschiedenen Geschwindigkeitsprofile je Position ergeben sich somit 40 verschiedene Bewegungen. Diese Bewegungen wurden 20 männliche Probanden im Alter von 18 bis 46 ($\bar{x} = 24,15$, $s = 6,44$) in einer Simulation, bestehend aus einem KUKA KR30 Portalroboter und einem davor positionierten Ablagefeld (Abb. 3), in Echtzeit dargestellt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zu erkennen welche Position auf dem Feld durch den Roboter angesteuert wird und die Bewegung des Roboters mittels der Leertaste zu stoppen, sobald diese Position erkannt wurde. Anschließend wurde dem Versuchsleiter die erkannte Position und die wahrgenommene mentale Beanspruchung nach der Rating Scale of Mental Effort (RSME-Skala) genannt. Als unabhängige Variablen ergeben sich somit die angesteuerte Position (20

Ausprägungen) und das Geschwindigkeitsprofil (konstant, anthropomorph), als abhängige Variablen die prädizierte Position, die Prädiktionszeit und die mentale Beanspruchung. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Bewegungen für jeden Probanden permutiert.

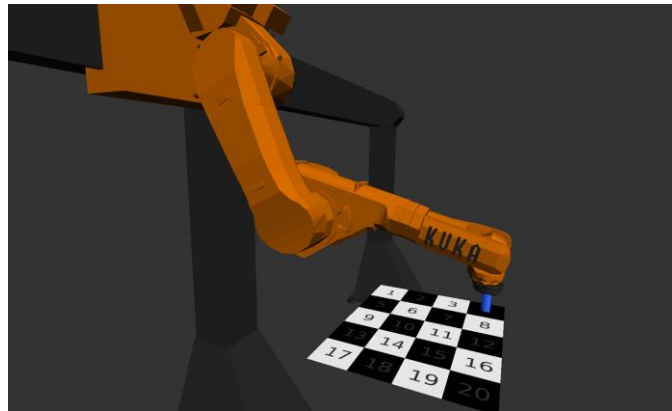


Abbildung 3: Virtueller Aufbau der Versuchsszene

3. Ergebnisse

Bei der Auswertung der Versuche wurden zunächst die Prädiktionszeiten und die mentale Beanspruchung betrachtet. Diese sind für die korrekten Prädiktionen über alle Felder zusammengefasst in Abbildung 4, differenziert nach Geschwindigkeitsprofil dargestellt. Die Prädiktionszeit ist für das anthropomorphe Geschwindigkeitsprofil ($\bar{x} = 1951 \text{ ms}$, $s = 761,86 \text{ ms}$) höher als beim konstanten Profil ($\bar{x} = 1811 \text{ ms}$, $s = 678,58 \text{ ms}$). Auch die mentale Beanspruchung ist beim anthropomorphen Profil ($\bar{x} = 17,31$, $s = 15,74$) höher als beim konstanten ($\bar{x} = 14,47$, $s = 11,78$). Allerdings ist auch die Standardabweichung hoch, und durch eine Anova mit Messwiederholung kann weder für die Prädiktionszeit ($p = 0,214$) noch für die mentale Beanspruchung ($p = 0,189$) ein Effekt des Geschwindigkeitsprofils nachgewiesen werden. Für die Prädiktionszeit kann ein signifikanter Effekt durch die Feldposition nachgewiesen werden ($F(19,361) = 99,836$, $p = 0,0$). Wegen einer disordinalen Interaktion zwischen Bewegungsprofil und Feld ($F(19,361) = 9,977$, $p = 0,0$) können die Effekte allerdings nicht interpretiert werden. Gleiches gilt auch für die Feldposition ($F(19,361) = 6,205$, $p = 0,0$) und Interaktion ($F(19,361) = 1,730$, $p = 0,03$) bei der mentalen Beanspruchung.

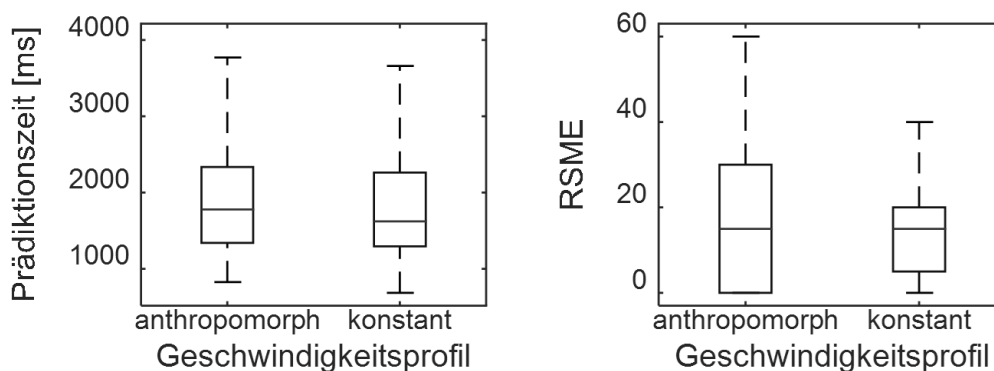


Abbildung 4: *Prädiktionszeiten (links) und mentale Beanspruchung nach RSME-Skala (rechts) für korrekte Prädiktionen bei anthropomorphem und konstantem Geschwindigkeitsprofil.*

Beim anthropomorphen Geschwindigkeitsprofil werden die angesteuerten Felder zu 58,75 % korrekt prädiziert, 36 % der Prädiktionen sind fehlerhaft und 5,25 % fehlen. Beim konstanten Profil wurden 42,5 % korrekt und 48 % fehlerhaft prädiziert, 9,5 % der Prädiktionen fehlen. Über einen Chi-Quadrat Test wurde die Signifikanz dieser Unterschiede zum Niveau von $\alpha = 5\%$ belegt.

4. Diskussion

Die Ergebnisse der Probandenstudie belegen einen eindeutigen Effekt des Bewegungsprofils auf die Vorhersagegenauigkeit, hierbei konnte eine höhere Genauigkeit bei Anwendung des anthropomorphen Geschwindigkeitsprofils erzielt werden. Aufgrund der Beschleunigung und Entschleunigung bei dieser Bewegung ist erwartungsgemäß besser zu erkennen, welches Feld angesteuert wird, wohingegen der Roboter mit konstantem Profil bei Erreichen des Zielfeldes abrupt stoppt. Die Prädiktionszeiten und mentale Beanspruchung sind im Mittel geringer bei Bewegungsdurchführung mit konstantem Geschwindigkeitsprofil. Dieser Effekt ist jedoch statistisch nicht signifikant. Zusammengefasst mit den durch Kuz et al. (2015a) erarbeiteten Ergebnissen bedeutet dies, dass die Bewegungsbahn des Roboters den größten Einfluss auf Prädiktionszeiten und mentale Beanspruchung hat. Bei einer anthropomorphen Bewegungsbahn konnten diese Werte durch den Einsatz eines anthropomorphen Geschwindigkeitsprofils im Vergleich zu einem konstanten reduziert werden, bei einer PTP-Bewegungsbahn ist diese Reduktion allerdings nicht zu erreichen. Lediglich die Genauigkeit kann hier gesteigert werden.

5. Literatur

- Duffy B (2003) Anthropomorphism and the social robot, In: Robotics and autonomous systems, 42(3), 177-190
- Kuz S, Petruck H, Heisterüber M, Patel H, Schumann B, Schlick C, Binkofski F (2015) Mirror Neurons and Human-Robot Interaction in Assembly Cells, In: Procedia Manufacturing, 3, 402-408.
- Kuz S, Schlick C (2015a). Anthropomorphic motion control for safe and efficient human-robot cooperation in assembly system. In: Proceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA (Vol. 9, p. 14)
- Kuz S, Schlick C (2015b) Neuroergonomische Ansätze in der Gestaltung der Mensch-Roboter-Kooperation zur Erhöhung der Arbeitssicherheit. 61. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, GfA-Press, Dortmund 2015

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), welche im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ die vorgestellten Arbeiten fördert.