

Vorhersagbarkeit der Zielposition einer Roboterbewegung in der Mensch-Roboter-Kollaboration

Sumona SEN¹, Lisanne KREMER², Hans-Jürgen BUXBAUM¹

¹ Hochschule Niederrhein, Labor Human Engineering und Robotik
Reinarzstraße 49, D-47805 Krefeld

² Hochschule Niederrhein, Fachbereich Gesundheitswesen
Reinarzstraße 49, D-47805 Krefeld

Kurzfassung: Anwendungen der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) finden immer mehr Verbreitung in der Industrie. Dabei stellt sich Einrichtern und Programmierern solcher Anlagen oftmals die Frage, welche der in einer Robotersteuerung typischerweise implementierten Bahnprofile für die Bewegung des Roboters im Kollaborationsraum zu verwenden sind, beispielsweise, um Risiken durch ungewollte Kollisionen zwischen Mensch und Roboter zu minimieren. In dem hier beschriebenen Pilotexperiment werden Probanden darauf getestet, ob und wann sie die Zielposition einer Roboterbewegung, abhängig von dem eingesetzten Bewegungsprofil, richtig vorhersagen können. Es kann dabei gezeigt werden, dass signifikante Unterschiede zwischen standardisierten Roboterbewegungen hinsichtlich dieser Vorhersagbarkeit bestehen.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Kollaboration, Vorhersagbarkeit, Erwartungskonformität, Bewegungsplanung, Flexibilität

1. Einleitung

Im Rahmen des Ladenburger Diskurses 2019 der Daimler und Benz-Stiftung zur MRK werden u.a. folgende Thesen zur zukünftigen Entwicklung genannt (Buxbaum & Häusler 2020):

- Flexibilisierung der Aufgabenverteilung, die den Menschen in den Mittelpunkt stellt und vermeidet, dass der Mensch einer von der Automation vorgegebenen Choreografie folgen muss.
- Sicherstellung der Erwartungskonformität, die fordert, dass die Aktionen des Roboters für den Menschen transparent und nachvollziehbar sind.

Die beiden Thesen sind teilweise divergent, es entsteht ein Zielkonflikt. Bei flexibler Aufgabenallokation, also ohne eine vorgegebene Choreografie, entstehen weniger Wiederholungen. Weniger Wiederholungen verzögern den Lerneffekt beim Menschen; die Erwartungskonformität wird reduziert. Erwartungskonformität ist laut ISO 9241-110 (2008) ein Kriterium der Ergonomie und ein Maß dafür, inwieweit ein System den Erwartungen eines Benutzers entspricht. Als Folge könnte z.B. die Wahrscheinlichkeit sicherheitsrelevanter Störungen ansteigen. Dieser Zielkonflikt lässt sich nur lösen, wenn der Mensch im Prozess erkennen kann, was der Roboter als nächstes tun wird (Sen 2020). Idealerweise sollte der Mensch also bereits während einer aktuellen Bewegung des Roboters prognostizieren können, was das Ziel dieser Bewegung ist, um seine Planung darauf einzustellen oder Kollisionen zu vermeiden. Es wird vermutet, dass die Bewegungsbahn, auf der sich der Greifer am Tool Center Point (TCP) des

Roboters bewegt, Einfluss darauf haben könnte, wie gut eine solche Prognose der Zielposition tatsächlich ist.

2. Bewegungsplanung

In heute gebräuchlichen Robotersteuerungen sind verschiedene Standard-Bewegungsprofile für den Endeffektor implementiert und diese können durch Programmierung ausgewählt werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind die gebräuchlichsten Bewegungsprofile (Weber 2017):

- Point-To-Point (PTP)

Eine PTP Bahn wird beschrieben durch die Vorgabe einer Endstellung der einzelnen Achsen. Die Aufgabe der Steuerung ist es, die Achsen so zu bewegen, dass die Endstellung möglichst schnell erreicht wird. Man unterscheidet asynchrone und synchrone PTP-Bahnsteuerung. Üblich ist die synchrone Variante, hier werden die Achsen zeitlich synchronisiert gestartet und in einer solchen Geschwindigkeit bewegt, dass alle Achsen zum gleichen Zeitpunkt die Zielposition erreichen. Dabei bestimmt die langsamste Achse die Verfahrzeit. Die aus diesem Bewegungsprofil PTP resultierende Bahn des TCP erscheint beliebig und ist nicht auf einfache Weise geometrisch bestimmt.

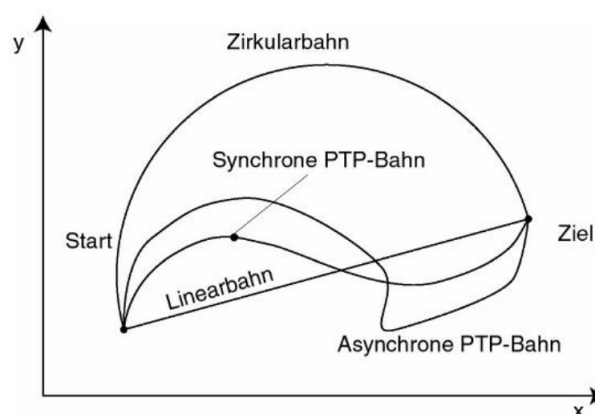


Abbildung 1: Zusammenfassende Darstellung der gängigen Bewegungsprofile in einer geometrisch einfacheren, zweidimensionalen Ansicht (Darstellung angelehnt an Weber 2017).

- Lineare Interpolation (LIN)

Eine lineare Interpolation führt zu einer Bewegung des TCP entlang einer Geraden vom Startpunkt zum Zielpunkt. In der klassischen Robotik wird die Linearinterpolation eingesetzt, wenn ein linearer Bahnverlauf z.B. bei Fügeprozessen in Füge­richtung erforderlich ist. Damit stehen die Achsen in einer örtlichen und zeitlichen Abhängigkeit; es müssen Bahnstützpunkte entlang einer Geraden berechnet werden, die nacheinander in konstanter, vorgegebener Geschwindigkeit zu überfahren sind, bis der Zielpunkt erreicht ist. Eine Linearbahn ist auf einfache Weise geometrisch bestimmt, in der Anwendung jedoch immer aufwendiger als eine PTP Bahn.

- Zirkulare Interpolation (CIRC)

Bei der zirkularen Interpolation wird die Bewegung des TCP entlang eines Kreissegments vom Startpunkt zum Zielpunkt geführt. In der klassischen Robo-

tik wird die Zirkularinterpolation z.B. beim Lichtbogenschweißen oder beim Dichtmittelauftrag eingesetzt, falls dabei Kreisbahnen erforderlich sind. Auch hier stehen die Achsen in einer örtlichen und zeitlichen Abhängigkeit, die zu berechnenden Bahnstützpunkte liegen nun auf dem Kreisbogen. Der TCP bewegt sich mit konstanter, vorgegebener Geschwindigkeit entlang des Bogens zum Zielpunkt. Auch die Zirkularbahn ist damit auf einfache Weise geometrisch bestimmt, analog zur Linearbahn jedoch ebenfalls aufwendiger als eine PTP Bahn. Zudem dauert der Bewegungsvorgang bei gleicher Geschwindigkeit länger als eine Bewegung entlang einer direkten Bewegungsgeraden. Die geometrisch korrekte Definition des Kreisbogens ist aufwendiger als eine Gerade vom Start- zum Zielpunkt.

3. Forschungsfrage und Hypothesen

Bei Betrachtung der verschiedenen möglichen Bewegungsprofile in einer Kollaborationsanwendung und in Hinblick auf die einleitend dargestellte Idee, dass der Mensch also bereits während einer aktuellen Bewegung des Roboters das Ziel der Bewegung einschätzen können sollte, ergibt sich die folgende Forschungsfrage, die im Folgenden untersucht wird:

- Lassen sich Unterschiede zwischen standardisierten Roboterbewegungen hinsichtlich ihrer Vorhersagbarkeit feststellen?

Zur Vorbereitung eines Pilotexperiments werden daraus folgende Hypothesen abgeleitet:

1. Nullhypothese (H_{10}): Es gibt keinen Unterschied in der Vorhersagbarkeit bei Verwendung linearer Bewegungsprofile und PTP-Bewegungsprofile.
Alternativhypothese (H_{11}): Lineare Bewegungsprofile erlauben eine bessere Vorhersagbarkeit als PTP-Bewegungsprofile.
2. Nullhypothese (H_{20}): Es gibt keinen Unterschied in der Vorhersagbarkeit bei Verwendung zirkularer Bewegungsprofile und PTP-Bewegungsprofile.
Alternativhypothese (H_{21}): Zirkulare Bewegungsprofile erlauben eine bessere Vorhersagbarkeit als PTP-Bewegungsprofile.

4. Experimentaldesign

Eingesetzt wird ein MRK-fähiger Industrieroboter vom Typ Kuka LBR iiwa 14 820 (LBR iiwa), dieser ist am TCP bestückt mit einem Zweibackengreifer für einfache Pick&Place-Aufgaben wie Palettieren oder Anreichen. Das Experiment besteht aus 6 Zielpositionen (P_1 - P_6) und 6 Schaltern (Sp_1 - Sp_6).

Es soll untersucht werden, ob und wie sicher eine Vorhersage der Zielposition der Roboterbewegung abhängig von der Bewegungsart möglich ist und zu welchem Zeitpunkt der Bahnfahrt der Proband eine Prognose abgeben kann.

Abbildung 2 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Die Applikation besteht aus einer Werkbank, auf der eine Startposition P_0 und 6 Zielpositionen ($P_1 - P_6$) markiert sind. Dazu sind in direkter räumlicher Nähe zu der Zielposition 6 Schalter ($Sp_1 - Sp_6$) angebracht. Der Arbeitsbereich des Roboters ist grau unterlegt dargestellt. Der Proband kann an seinem Arbeitsplatz in den Arbeitsbereich des Roboters hineingreifen, daher besteht Kollisionsgefahr. Der Prozessablauf ist wie folgt: Der Roboter beginnt seine jeweilige Fahrt von Startposition P_0 zu einer der Zielpositionen ($P_1 - P_6$). Die

jeweilige Zielposition wird aus Sicht des Probanden zufällig ausgewählt, daher weiß der Proband nicht, welche Zielposition der Roboter anfahren wird. Das für die Fahrt eingesetzte Bewegungsprofil wechselt zwischen PTP, LIN und CIRC. Der Proband hat die Aufgabe, den zu der Zielposition gehörenden Schalter (Sp₁ – Sp₆) zu betätigen, sobald er erkennt, welche Zielposition gerade angefahren wird.

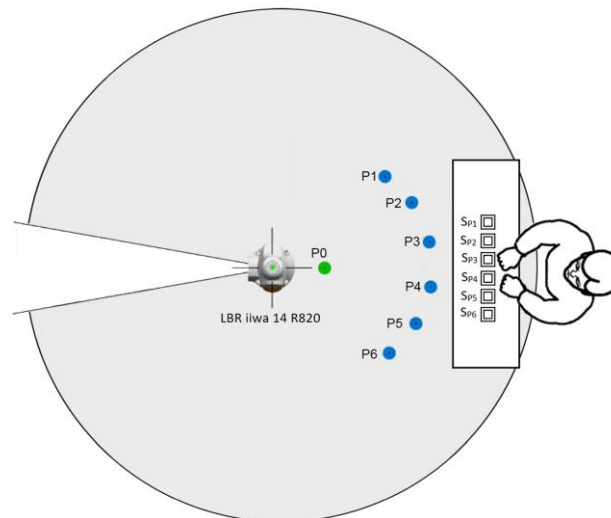


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit 6 Zielpositionen und 6 Schaltern in einem gemeinsamen Mensch-Roboter-Arbeitsbereich

Die Tastenbetätigung wird nicht zurückgemeldet, der Prozessablauf läuft einfach weiter. Die Robotersteuerung protokolliert allerdings jede Tastenbetätigung nach Nummer und Betätigungszeitpunkt sowie der prognostizierten Zielposition. Einen Ausschnitt aus dem automatischen Protokoll zeigt Abbildung 3.

Datum	Uhrzeit inkl. Millisekunden	Log
18.12.2019	08:19:25,2	Starte Fahrt!
18.12.2019	08:19:29,8	Button3
18.12.2019	08:19:32,7	P3 mit der Bewegungsart <u>PTP</u> zum 1. mal angefahren.
18.12.2019	08:19:45,2	Starte Fahrt!

Abbildung 3: Automatisch erstelltes Protokoll aus der Robotersteuerung (Auszug)

Die Häufigkeit der Fahrten pro Zielposition und Bewegungsprofil können im Steuerungsprogramm frei eingestellt werden. Die Abfolge ist dabei durch die Programmierung vorgegeben, pro Zyklus wird eine PTP, eine CIRC und eine LIN Bahn gefahren, die Zielpunkte sind im Zyklus verschieden. Allerdings erlebt jeder Proband genau den gleichen Ablauf. Aus Sicht des Probanden erscheinen die Zielpunkte zufällig, Gewöhnungseffekte können somit nicht entstehen.

Nach einem erfolgreichen Anfahren eines Zielpunkts, fährt der Roboter wieder zum Startpunkt (P₀) zurück. Von dort beginnt die nächste Fahrt. Nach 54 Fahrten bleibt der Roboter dort stehen und das einzelne Probandenexperiment ist beendet. Pro Fahrt (eine Richtung) benötigt Roboter ca. 7 Sekunden. Die Geschwindigkeit wird im Kollisionsbereich der Norm entsprechend mit 250 mm/sec eingestellt. Hin- und Rückfahrt dauert damit ca. 14 Sekunden, dazu kommen ca. 6 Nebenzeiten. Der Versuch hat damit eine Dauer von 20 Sekunden * 54 Fahrten = 1080 Sekunden (18 Minuten).

Das Experiment wird mit 28 Probanden durchgeführt. Alle Probanden sind männlich und zwischen 23 und 31 Jahre alt (MW = 25,86, SD = 1,79).

5. Auswertung

Das Betätigen der Schalter wird durch das Steuerungsprogramm des Kuka LBR automatisch aufgezeichnet und ausgegeben, sodass die Ergebnisse nach dem Versuch statistisch ausgewertet werden können. Abbildung 4 zeigt die Auswertung für die unterschiedlichen Bewegungsprofile LIN, CIRC und PTP über alle Probanden im Box-Whisker-Plot. Dabei wird die zurückgelegte Wegstrecke in Prozent aufgetragen. Bei der niedrigen Geschwindigkeit der Roboterbewegung und den entsprechend kurzen Beschleunigungs- und Abbremsphasen liegt ein näherungsweise linearer Zusammenhang des zurückgelegten Wegs zu der dazu notwendigen Zeit vor. In der folgenden statistischen Auswertung wird daher der bis zum Tastendruck zurückgelegte Weg als unabhängige Variable angenommen.

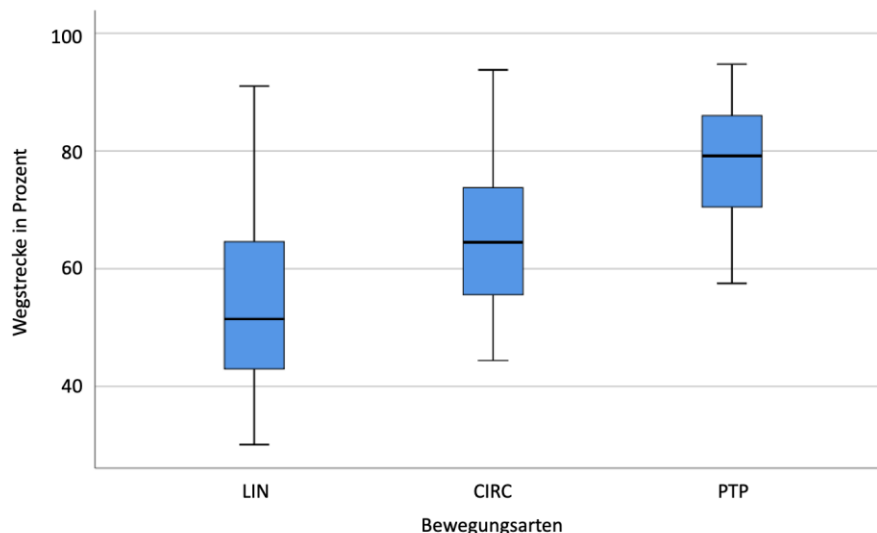


Abbildung 4: Box-Whisker-Plot über die Bewegungsarten LIN, CIRC und PTP

Es zeigt sich, dass sich die Erkennung der Zielposition von Bewegungen der Bewegungsprofile unterschiedlich darstellt. Lineare Bewegungen erkennen die Probanden früher richtig als Bewegungen der anderen Bewegungsarten CIRC und PTP, wobei im Vergleich zu CIRC noch ein deutlicher Überlappungsbereich der Quartilswerte auftritt. Die Zielposition der Bewegungen im PTP Bewegungsprofil wird erst später erkannt. Auffallend ist auch die deutlich erhöhte Anzahl von falschen Vorhersagen bei PTP Bewegungsprofilen, die Fehlerquote bei CIRC und LIN ist etwa gleich, bei PTP werden weit mehr falsche Vorhersagen registriert.

Da alle Bewegungsprofile bei jedem Probanden Anwendung finden, wird ein T-Test bei abhängigen gepaarten Stichproben durchgeführt. Dabei werden alle Mittelwerte verglichen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse aus SPSS. Für die Hypothesen H1 und H2 sind die beiden unteren Zeilen der Tabelle 1 relevant, also der Vergleich LIN zu PTP in Zeile 2 sowie der Vergleich CIRC zu PTP in Zeile 3. Für die Hypothese H1 ergibt sich eine Teststatistik von $T_{180} = -18,895$ und der zugehörige Signifikanzwert ist $p < ,001$. Damit ist der Unterschied signifikant. Die Mittelwerte der beiden Bewegungsarten

LIN und PTP unterscheiden sich ebenfalls deutlich ($MW = -24,293$, $SD = 17,297$). Die Alternativhypothese H_{11} ist damit bestätigt: Lineare Bewegungsprofile LIN erlauben eine bessere Vorhersagbarkeit als PTP-Bewegungsprofile.

Tabelle 1: SPSS generierter T-Test

		Test bei gepaarten Stichproben							
		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Std.- Abweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	Wert LIN – Wert CIRC	-9,2754572	18,1167147	1,10254815	-11,446178	-7,1047362	-8,413	269	,000
Paaren 2	Wert LIN – Wert PTP	-24,293694	17,2975669	1,28571802	-26,830712	-21,756675	-18,895	180	,000
Paaren 3	Wert CIRC – Wert PTP	-11,923884	16,5885533	1,26855838	-14,428039	-9,4197284	-9,400	170	,000

Für die Hypothese H_2 beträgt die Teststatistik $T_{170} = -9,4$ und der zugehörige Signifikanzwert ist wiederum $p < ,001$. Damit ist der Unterschied auch hier signifikant. Die Mittelwerte der beiden Bewegungsarten CIRC und PTP unterscheiden sich ebenso ($MW = -11,923$, $SD = 16,588$). Die Alternativhypothese H_{21} ist damit bestätigt: Zirkulare Bewegungsprofile CIRC erlauben eine bessere Vorhersagbarkeit als PTP-Bewegungsprofile.

6. Diskussion

Das Pilotexperiment zeigt in der Auswertung ein klares, signifikantes Ergebnis. Die beiden (vermuteten) Alternativhypothesen werden bestätigt. Zudem wird ein signifikanter Unterschied zwischen den Bewegungsprofilen LIN und CIRC festgestellt (Tabelle 1, Zeile 1). Allerdings wird dieser Unterschied aufgrund der abweichenden Aufgabenstellung dieser Untersuchung nicht weiter beachtet. Ein weiterführendes Experiment zur Klärung dieser Fragestellung ist bereits in Vorbereitung. Auch sollen in zukünftigen Untersuchungen allgemeine Daten zum Workload und zum Situationsbewusstsein erhoben werden, um die gefundenen Ergebnisse weiter zu untermauern. Die Entwicklung eines Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz oder der Fragestellung, ob den Probanden die Unterschiede der Bewegungsprofile überhaupt bewusst sind, ist dazu ebenfalls in Vorbereitung. Weiterhin wird in einem folgenden Experiment die Randomisierung der Bewegungsprofile vollständig umgesetzt, um das Ergebnis valider zu gestalten. Ausblickend soll durch dadurch eine konkrete Handlungsempfehlung für Einrichter und Programmierer formuliert werden, die für Roboterbewegungen im Kollisionsbereich einer MRK Anwendung erwartungskonformere Bewegungsprofile bevorzugt.

7. Literatur

- Buxbaum HJ, Häusler R (2020) Ladenburger Thesen zur zukünftigen Gestaltung der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: Buxbaum HJ (Hrsg.) Mensch-Roboter-Kollaboration. Springer Gabler, Wiesbaden.
- DIN (2008): DIN EN ISO 9241 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Beuth Verlag, Berlin.
- Sen S (2020) Erwartungskonformität von Roboterbewegungen und Situationsbewusstsein in der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: Buxbaum HJ (Hrsg.) Mensch-Roboter-Kollaboration. Springer Gabler, Wiesbaden.
- Weber W (2017) Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung, 3. Auflage. Hanser Verlag, München.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.
Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**
Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de