

Prognosen menschlicher Bewegung zur prospektiven Pfadplanung von mobilen Robotern

Edgar SCHERSTJANOI

*Professur für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Dresden,
Marschnerstraße 39, D-01307 Dresden*

Kurzfassung: Immer häufiger werden kollaborative Roboter in Arbeitssystemen eingesetzt. Zur Vermeidung von Kollisionen dienen hochsensible Sensoren, die in Gefahrensituationen Notstopps auslösen. Dieses Prinzip kann jedoch auch zur Verlangsamung des automatisierten Prozesses führen. Würden Robotersysteme vorhersagen können, wie die Bewegung der Mitarbeitenden ausgeführt wird, könnte eine Route geplant werden, welche eine Kollision prospektiv umgeht. Methoden des maschinellen Lernens erlauben es, solche Prognosen zu modellieren. In dieser Studie wird untersucht, wie Bewegungsvorhersagen mit einfachen rekurrenten neuronalen Netzen für diesen Zweck verwendet werden können.

Schlüsselwörter: Vorhersage, Kollisionsvermeidung, Bewegungsplanung, Maschinelles Lernen, Motion Capture

1. Motivation

In Produktionsprozessen werden weltweit kontinuierlich immer mehr Roboter eingesetzt, die nicht durch Schutzeinrichtungen von den Arbeitsplätzen des Menschen getrennt sind (vgl. Taesi et al. 2023). Auch bei dieser Arbeit gilt, dass die gesundheitliche Unversehrtheit des Menschen unter keinen Umständen gefährdet werden darf. Daher werden in kollaborativ eingesetzten Robotern (Cobots) hochsensible ausfallsichere Sensoren implementiert, mit denen sichergestellt werden kann, dass die Bewegung des Roboters nicht zur Kollision mit dem Menschen führt.

Im Fall von mobilen, freifahrenden Robotern sind solche Sensoren oftmals mit Lidar-Scannern umgesetzt (vgl. Raj et al. 2020) und so installiert, dass auf einer parallel zum Boden planaren Ebene Hindernisse sicher erkannt werden können. Unter Verwendung üblicher Navigationsalgorithmen ist es daraufhin möglich, passende Ausweichrouten zu berechnen. Sollte durch die Dynamik der Objekte im Raum (z. B. durch Körperbewegung von Menschen) unplanmäßig ein kritischer Abstand unterschritten werden, ist es üblich, dass ein Not-Stopp ausgelöst wird.

Auch wenn durch diese Strategie eine sichere Methode für den Umgang mit der Kollisionsgefahr in kollaborativen Arbeitssysteme gegeben ist, führen die Ausfallzeiten oftmals auch zu einer Verlangsamung der automatisierten Prozesse. Eine Möglichkeit Kollisionen vorherzusagen und somit das Auslösen von Not-Stopps zu reduzieren, besteht in der Integration von prognostizierten Trajektorien der Akteure im Raum, wie bspw. des agierenden Menschen in naher Umgebung. Wird die Bewegungsprognose einem Cobot als dynamisches Hindernis übermittelt, kann daraus eine Route berechnet werden, welche prospektiv ausweicht. Dieses Prinzip ist in Abbildung 1 dargestellt.

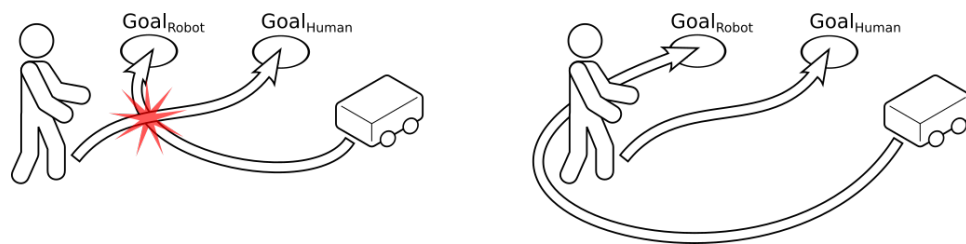


Abbildung 1: Strategie zur prospektiven Vermeidung von Kollisionen. Wird eine Route geplant, die der Bewegung des Menschen ausweicht, kann die Gefahr einer Kollision reduziert werden (vgl. Scherstjanoi & Wähnert, 2023).

Scherstjanoi & Wähnert (2023) zeigten, dass mit diesem Prinzip eine signifikante Reduktion des Kollisionsrisikos erreicht werden kann. Außerdem stellte sich heraus, dass die resultierenden Umwege der Cobots sich nur geringfügig auf den Durchsatz auswirken. Die untersuchte Wechselwirkung zwischen Kollisionsrisiko und Durchsatz beruhte jedoch auf einer quasi-fehlerfreien Bewegungsprognose. Der folgende Beitrag zeigt, wie sich eine realistische Vorhersage auf diese Metriken auswirkt.

2. Versuchsaufbau

Zur Analyse der Kinematik des menschlichen Bewegungsapparates ist ein komplexes Verständnis aus dem hierarchischen Zusammenwirken von Linear- und Winkelbewegungen einzelner Körpersegmente notwendig (Berteau et al. 2013). Um eine computergestützte Prognose zum Bewegungsablauf erzeugen zu können, ist es daher naheliegend, Methoden des maschinellen Lernens einzusetzen (vgl. Döbel et al. 2018). Aus den Trainingsdaten werden generalisierbare Zusammenhänge in der Geometrie und Dynamik der Körpersegmente modelliert, ohne diese explizit formalisieren zu müssen (bspw. das Verhältnis zwischen Gehgeschwindigkeit und dem Pendeln der Arme oder der Einfluss der Oberkörperdrehung zum Wechsel der Gehrichtung)

Für das Ziel, die Vorhersage zur Verringerung des Kollisionsrisikos zwischen Menschen und Roboter einzusetzen, wurden zwei Aspekte untersucht: einerseits das Finden geeigneter Parameter zur Modellierung der Prognose, andererseits der aus der Prognose resultierende Mehrwert zur prospektiven Pfadplanung.

2.1 Bewegungsprognose

Zur Erhebung der Trainings- und Testdaten wurden Bewegungsaufnahmen mit einem Probanden durchgeführt. Dabei kam das Erfassungssystem “XSens MVN” zum Einsatz, welches durch Inertialsensoren ein skelettales Modell mit 23 Körpersegmenten, jeweils mit Position und Orientierung im Raum bei einer zeitlichen Auflösung von 60 Frames pro Sekunde zur Verfügung stellt.

Die Aufnahme fand in einem 10 m x 5,5 m großen Raum ohne Hindernisse statt. Der Proband unternahm Gehbewegungen mit spontanen Änderungen in Richtung und Geschwindigkeit. Eine Aufnahme umfasste ca. 10 min und wurde viermal unabhängig voneinander wiederholt. Zwei der vier Aufnahmen wurden als Trainingsdatensatz verwendet, eine für die Validierung während des Trainings und eine zum Testen der modellierten Prognose.

Die Modellierung wurde mit einem neuronalen Netz umgesetzt, welches aus einer Eingangssequenz von Körperhaltungen eine Sequenz von konsekutiven Positionen im Raum prognostiziert. Solche Sequence-to-sequence-Architekturen (Sutskever et al. 2014) enthalten typischerweise rekurrente Schichten, um die temporalen Informationen der Ein- und Ausgangssequenzen zu kodieren bzw. zu dekodieren. Im durchgeführten Versuch kamen dafür jeweils GRU (Gated Recurrent Units; Chung et al. 2014) zum Einsatz.

2.2 Simulation von Cobots

Für die Simulation des kollaborativen Arbeitssystems wurde ein virtueller Nachbau des Aufnahmeraumes angefertigt und darin der digitale Zwilling eines „Robotis Turtlebot 3“ als Cobot genutzt. Die Pfadplanung des Cobots wurde durch ROS (Robot Operating System; Quigley et al. 2009) realisiert, wobei die Lokalisierung und Navigation durch die standardmäßig implementierten Methoden AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) bzw. DWA (Dynamic Window Approach; Fox et al. 1997) erfolgte. Zur Simulation einer Arbeitsaufgabe wurde eine Liste von zufällig gewählten Zielpunkten festgelegt, welche der Roboter nacheinander erreichen sollte.

Während der Navigation des Cobots wurde die Bewegungsaufnahme und Bewegungsprognose des Probanden in die Pfadplanung als dynamisches Hindernis integriert, was zu einer kontinuierlichen Anpassung der Routenplanung führte.

3. Ergebnisse

Für die Auswertung wurden zufällig 1000 Frames des Testdatensatzes ausgewählt und darin der durchschnittliche Euklidische Abstand zwischen prognostiziertem und tatsächlichen Bewegungspfad des Probanden ermittelt. Es ergab sich, dass kurze Eingangssequenzen (5 und 15 Frames) durchschnittlich geringere Fehler bei der Prognose erzeugten. Körperbewegungen, bei denen ein Anhalten oder Drehen eingeleitet wird, ergeben vergleichsweise größere Fehler. Mit dem Modell wird zwar erkannt, dass eine Änderung in der Bewegung folgt, allerdings ist die Positionierung oft nicht richtig. Mit steigender Länge der Eingangssequenz ging eine Vergrößerung des durchschnittlichen Fehlers einher.

In Abbildung 2 sind beispielhaft die Pfade von prognostizierter und tatsächlicher Bewegung des Probanden für unterschiedlich lange Eingangssequenzen visualisiert. Es wird darin ersichtlich, dass für die Vorhersage gleichmäßiger Bewegungen kurze Eingangssequenzen genügen, wohingegen durch längere Eingangssequenzen keine deutliche Verbesserung bei der Prognose von Bewegungsänderungen erzielt werden kann.

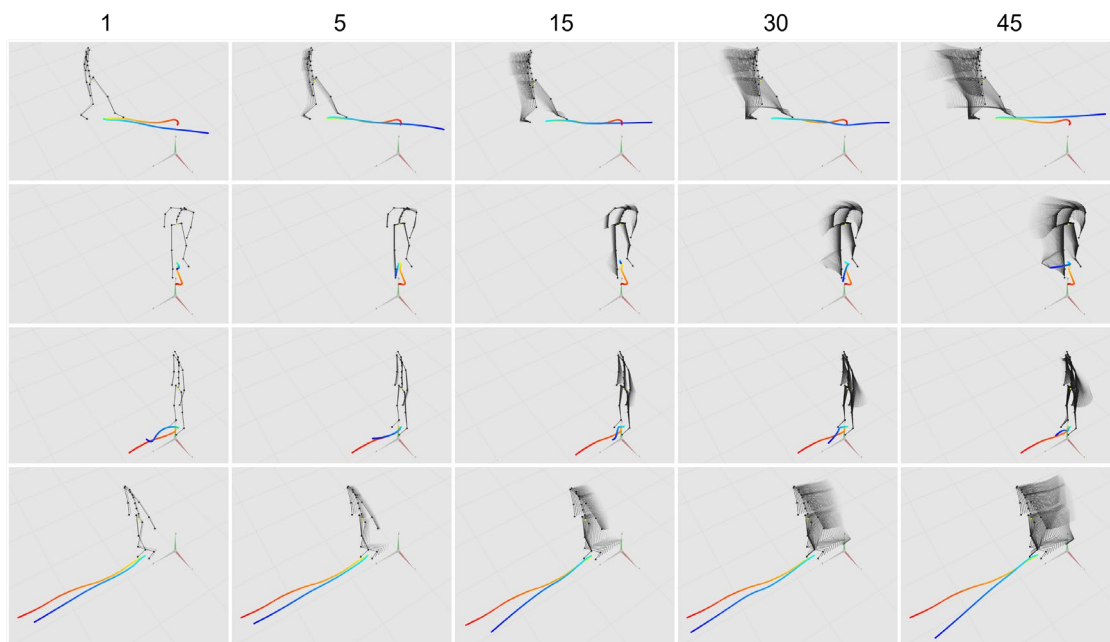


Abbildung 2: Visualisierung der tatsächlichen (gelb nach rot) und prognostizierten (cyan nach blau) Bewegungspfade anhand unterschiedlicher Längen von Eingangssequenzen (v.l.n.r.: 1, 5, 15, 30 und 45 Frames) bei anhaltender Gehbewegung (oben), Stehen und Drehen (2. Reihe), anfangende Gehbewegung (3. Reihe) und gleichmäßigem Gehen (unten).

Für die anschließende Simulation der kollaborativen Umgebung wurde das Modell gewählt, welches 15 Frames als Eingangssequenz verwendet. In Abbildung 3 ist beispielhaft dargestellt, wie die Pfadplanung des Cobots durch den prognostizierten Bewegungspfad des Probanden verändert wird.

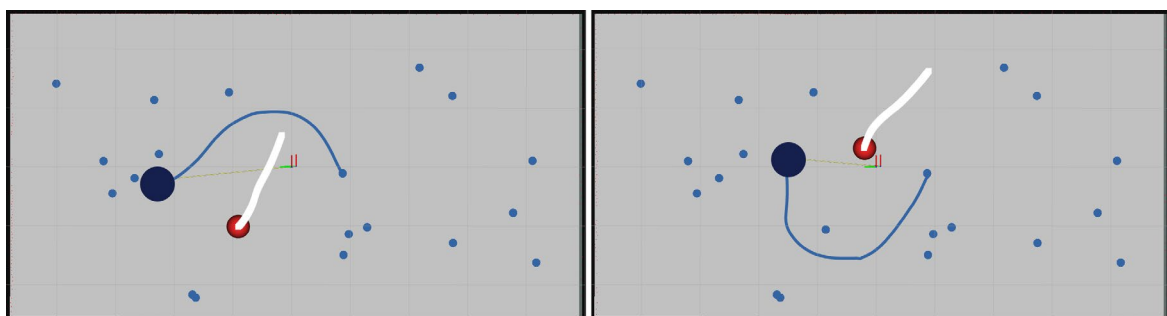


Abbildung 3: Draufsicht des virtuellen Raumes, worin Position (großer blauer Punkt), alle Ziele (kleine blaue Punkte) und die geplante Route (blaue Linie) des Cobots dargestellt sind. Die Route wird so berechnet, dass der Position des Probanden (Roter Punkt) und dem dazugehörigen prognostizierten Pfad (Weiße Linie) ausgewichen wird.

Es zeigte sich, dass durch die Integration der Vorhersage eine prospektive Pfadplanung des Roboters möglich ist. Die relative Zeit, in der die Distanz zwischen Mensch und Roboter geringer als 1 m war, wurde um ca. 10 % reduziert, wodurch Rückschlüsse auf ein sinkendes Kollisionsrisiko naheliegend sind. Die entstandenen Umwege führten zwar zu einer Verschlechterung des Durchsatzes, dennoch konnten durchschnittlich mehr als 95 % der Zielpunkte erreicht werden.

4. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass es bereits mit einfachen rekurrenten Netzarchitekturen möglich ist, Bewegungsvorhersagen zu generieren, welche sich für den Einsatz in kollaborativen Arbeitssystemen eignen. Darüber hinaus ergab sich, dass es für einfache und gleichmäßige Bewegungen genügt, kurze Eingangssequenzen zur Generierung einer Vorhersage zu verwenden.

Dennoch wurde auch deutlich, dass die erzielten Ergebnisse stark im Kontext der Bewegungsaufnahmen zu interpretieren sind. Der Inhalt bestand überwiegend aus gleichmäßigen Gehbewegungen eines Probanden, ohne Einfluss von arbeitstypischer Umgebung oder Arbeitsmitteln. Um eine valide Aussage zur Nützlichkeit in realen Arbeitssystemen treffen zu können, muss der Datensatz und Versuchsablauf dementsprechend erweitert werden.

Im Experiment wurde die Bewegung der Roboter simuliert. Für eine aussagekräftige Analyse der Strategie einer prospektiven Pfadplanung durch Bewegungsprognosen wäre es wichtig, dass alle Akteure sich gegenseitig wahrnehmen können. Zu diesem Zweck ist es geplant, den Versuch mit realen mobilen Robotern zu wiederholen und zu untersuchen, wie ProbandInnen auf die Dynamik der Pfadplanung der Cobots reagieren.

6. Literatur

- Berteau M, de Hillerin P, Bidiugan R, Ciobanu I, Badea R, Dumitru L, Iliescu A, & Dinu H (2013) Elements of Gait Kinematic Analyze in CAMONAL Project. *Applied Mechanics and Materials*, 436, 247–254.
- Chung J, Gulcehre C, Cho K, Bengio Y (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. *arXiv preprint arXiv: 1412.3555*.
- Döbel I, Leis M, Vogelsang MM, Neustroev D, Petzka H, Rüping S, Welz J (2018) Maschinelles Lernen—Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf. Sankt Augustin: Fraunhofer-Gesellschaft (IAS, IMW, Zentrale).
- Fox D, Burgard W, & Thrun S (1997) The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1), 23–33.
- Quigley M, Conley K, Gerkey B, Faust J, Foote T, Leibs J, Wheeler R, Ng AY (2009) ROS: an open-source Robot Operating System. *ICRA workshop on open source software*, 3(3.2), 5.
- Raj T, Hanim Hashim F, Baseri Huddin A, Ibrahim MF, Hussain A (2020) A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*, 9(5), 741.
- Scherstjanoi E, Wähnert S (2023) Avoidance Of Collisions Through Prospective Path Planning. 1st international Conference on Hybrid Societies, Chemnitz.
- Sutskever I, Vinyals O, Le QV (2014) Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- Taesi C, Aggogeri F, Pellegrini N (2023) COBOT Applications—Recent Advances and Challenges. *Robotics*, 12(3), 79.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

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.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de