

Entwicklung eines Surrogatmodells für die Online-Schätzung einer Erreichbarkeitskarte eines Manipulators unter der Berücksichtigung von Hindernissen

Development of a Surrogate Model for Online Estimation of a Manipulator Reachability Map Considering Obstacles

Simon Schläger, schlaeger@igmr.rwth-aachen.de

Hailong Lou, luo@igmr.rwth-aachen.de

Stefan Groß, gros@igmr.rwth-aachen.de

Mathias Hüsing, Dr.-Ing., huesing@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., corves@igmr.rwth-aachen.de

RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062, Aachen, Deutschland

Kurzfassung

In der Robotik beschreiben Erreichbarkeitskarten den Arbeitsraum eines Manipulators, indem sie den Arbeitsraum um den Manipulator in Voxel diskretisieren und jedem Voxel einen skalaren Wert als Maß für die Erreichbarkeit zuordnen. Erreichbarkeitskarten werden in der Pfadplanung für mobile Manipulatoren eingesetzt. In der Regel wird zunächst die Erreichbarkeitskarte für einen stationären Manipulator in einem hindernisfreien Arbeitsraum bestimmt. Diese Karte wird anschließend invertiert und in der Pfadplanung der mobilen Basis verwendet, um diese möglichst günstig für eine oder mehrere Zielposen des robotischen Arms zu positionieren. Ein Beispiel ist der 3D-Druck von Gebäuden [1]. Darüber hinaus finden Erreichbarkeitskarten Anwendung in der Entwicklung von Manipulatoren sowie bei der Auswahl und Positionierung von Manipulatoren für das Bestücken von Werkzeugmaschinen durch Personen ohne spezielles Expertenwissen [2].

Nach Zacharias et al. [3] wird zur Berechnung von Erreichbarkeitskarten in jedem Mittelpunkt eines Voxels eine Kugel platziert, welche durch das Voxel begrenzt ist. Auf der Oberfläche dieser Kugel wird eine Anzahl von Endeffektorposen gleichmäßig verteilt, die als Zielposen dienen. Für jede dieser Zielposen wird geprüft, ob der Manipulator diese erreichen kann. Der Reachability Index (RI) ist das Verhältnis von erreichbaren Zielposen zu gesampelten Posen in jedem Voxel. Die Berechnung von Erreichbarkeitskarten ist je nach Diskretisierung aufgrund der hohen Anzahl an zu lösenden inverse kinematischen Problemen sehr zeitaufwändig [3, 4].

Ein zentrales Problem bei der aktuellen Anwendung von Erreichbarkeitskarten besteht darin, dass diese in der Regel offline, also vorab und ohne Berücksichtigung von Hindernissen, berechnet und anschließend nur noch abgerufen werden [1, 4]. Ein naheliegender Ansatz zur Integration von Hindernissen wäre, die von Hindernissen belegten Bereiche nachträglich aus der Karte zu entfernen. Dies führt jedoch zu einer groben Abschätzung, die die tatsächliche Fähigkeit des Roboters deutlich unterschätzt [5].

Eine Online-Neuberechnung der Erreichbarkeitskarte mit der oben beschriebenen Methode unter Berücksichtigung von Kollisionen ist aufgrund der langen Laufzeit in der Praxis nicht umsetzbar. Erste Ansätze für Erreichbarkeitskarten, die Hindernisse online berücksichtigen, liefern Sandakalum und Ang Jr. [5]. Sie erstellten ein datenbasiertes Surrogatmodell, das ausgehend von einer 2D-Occupancy-Grid (OG) Karte die Erreichbarkeitskarte eines planaren, seriellen Dreiglieds generiert. Offen ließen Sandakalum und Ang Jr. [5] jedoch, ob sich dieser Ansatz auch auf eine räumliche, serielle Kinematik übertragen lässt.

Um Erreichbarkeitskarten für eine räumliche, serielle Kinematik effizient abschätzen zu können und so die genannte Lücke zu schließen, schlagen die Autoren dieses Beitrages den Einsatz eines Surrogatmodells auf Basis einer UNet3D-Architektur [6] vor. Das Modell erhält eine 3D-OG-Karte als Eingabe und schätzt daraus die Erreichbarkeitskarte eines auf einer Bodenplatte montierten Franka Emika Panda Roboters. Sämtliche Trainings- und Validierungsdaten werden mithilfe des CuRobo-Frameworks [7] erzeugt. Um den Lernprozess zu beschleunigen, setzten die Autoren dieses Beitrags ein aktives Lernverfahren ein, das darauf abzielt, die Anzahl der für die Datengenerierung explizit auszuwertenden Voxel zu reduzieren. Alle zehn Epochen wird für eine neue 3D-OG-Karte ermittelt, bei welchen Voxel das Surrogatmodell die größte Varianz in der Schätzung des RIs aufweist. Für diese Voxel wird anschließend der Ground-Truth-RI auf Basis von 100 zu prüfenden Zielposen berechnet und in den weiteren Lernprozess einbezogen. Ergänzend dazu werden weitere zufällig ausgewählte Voxel berücksichtigt, deren Erreichbarkeit ebenfalls in den Datenpool aufgenommen wird. Der Trainingsdatensatz für das im überwachten Lernen trainierte Surrogatmodell setzt sich im Wesentlichen aus vollständigen 3D-OG-Karten und den dazugehörigen unvollständigen Erreichbarkeitskarten zusammen, bei denen nur für Voxel mit hoher Varianz in der Schätzung ein Ground-Truth-RI vorliegt. Die Validierung erfolgt hingegen auf vollständigen Karten, für die ein Ground-Truth-RI für alle Voxel verfügbar ist.

Für die nachfolgend präsentierten Ergebnisse wurde das Surrogatmodell über 750 Epochen trainiert, was bei Verwendung einer NVIDIA RTX 4090 einer Trainingsdauer von etwa einer Stunde entspricht. Der Arbeitsraum wurden in $32 \times 32 \times 32$ Voxel mit einer Kantenlänge von 0.06 m diskretisiert. Für die Validierung wurden 60 vollständige Ground-Truth-Erreichbarkeitskarten für zufällig generierte 3D-OG-Karten erzeugt. In Tabelle 1 sind verschiedenen Fehlermetriken für die Bewertung des Surrogatmodells zusammengetragen. Die angegebenen Mittelwerte und Standardabweichungen ergeben sich aus den Abweichungen zwischen den geschätzten und den entsprechenden Ground-Truth-Erreichbarkeitskarten. Es ist zu erkennen, dass die meisten Fehlermetriken – mit Ausnahme der mittleren prozentualen Abweichung – gute Werte aufweisen. Diese Auffälligkeit ist darauf zurückzuführen, dass die mittlere prozentuale Abweichung keine echten Nullwerte berücksichtigen kann und daher ausschließlich Bereiche mit einer Erreichbarkeit größer Null bewertet werden. Dahingegen können die anderen Metriken auch echte Nullbereiche berücksichtigen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das Surrogatmodell die Erreichbarkeitskarten mit guter Genauigkeit schätzen kann. Darüber hinaus bestätigt das eingesetzte aktive Lernverfahren die grundlegende Hypothese, dass sich ein Surrogatmodell trainieren lässt, ohne vollständige Erreichbarkeitskarten bereitstellen zu müssen.

Tabelle 1

Metrik	Mittelwert	Standardabweichung
Mittlere quadratische Abweichung	0,011	0,002
Mittlere absolute Abweichung	0,047	0,003
Mittlerer absoluter logarithmischer Fehler	0,03	0,002
Mittlere prozentuale Abweichung	26,78%	8,6%

Neben einfachen Erreichbarkeitskarten existieren weitere Kenngrößen zur Beschreibung der Fähigkeiten eines Manipulators, wie etwa die Manipulierbarkeit [8]. In zukünftigen Arbeiten ist zu untersuchen, inwieweit die Surrogatmodelle angepasst oder erweitert werden müssen, um auch diese kartierten Kenngrößen zuverlässig schätzen zu können. Außerdem gilt es die mittlere prozentuale Abweichung zu verringern.

Aktuell wird an einer systematischen Hyperparameteroptimierung gearbeitet, die sowohl unterschiedliche Surrogatmodellarchitekturen als auch die Anzahl der im Rahmen des aktiven Lernens ausgewerteten Voxel berücksichtigt. Ziel ist es, mit vergleichsweise geringem Datenaufwand ein möglichst genaues Surrogatmodell zu entwickeln, das sowohl hinsichtlich der Trainingszeit als auch der Inferenzzeit effizient ist. Anschließend wird das Surrogatmodelle in Pfadplanung der mobilen Basis des SHEREC Projektes integriert.

Danksagung

Finanziert durch die Europäische Union im Rahmen des SHEREC-Projekts (101136056). Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union wider. Weder die Europäische Union noch die gewährende Behörde können dafür verantwortlich gemacht werden.

Literatur

- [1] J. Sustarevas, D. Kanoulas and S. Julier, "Task-Consistent Path Planning for Mobile 3D Printing," *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 2021, pp. 2143–2150, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9635916.
- [2] K. Zielinski, S. Tadeja, B. Blumberg, and M. B. Kjærgaard, 'Using Mobile AR for Rapid Feasibility Analysis for Deployment of Robots: A Usability Study With Non-Expert Users', *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 5489–5496, June 2025, doi: 10.1109/LRA.2025.3560888.
- [3] F. Zacharias, C. Borst, and G. Hirzinger, 'Capturing robot workspace structure: representing robot capabilities', in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2007, pp. 3229–3236. doi: 10.1109/IROS.2007.4399105.
- [4] A. Makhal and A. K. Goins, 'Reuleaux: Robot Base Placement by Reachability Analysis', in *2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, Jan. 2018, pp. 137–142. doi: 10.1109/IRC.2018.00028.
- [5] T. Sandakalum and M. H. Ang, 'ReachNet : Reachability maps in the presence of obstacles', in *2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, June 2023, pp. 108–113. doi: 10.1109/CIS-RAM55796.2023.10370757.
- [6] Ö. Çiçek, A. Abdulkadir, S. S. Lienkamp, T. Brox, and O. Ronneberger, '3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation', June 21, 2016, *arXiv*: arXiv:1606.06650. doi: 10.48550/arXiv.1606.06650.
- [7] B. Sundaralingam *et al.*, 'cuRobo: Parallelized Collision-Free Minimum-Jerk Robot Motion Generation', Nov. 03, 2023, *arXiv*: arXiv:2310.17274. doi: 10.48550/arXiv.2310.17274.
- [8] N. Vahrenkamp, T. Asfour, G. Metta, G. Sandini, and R. Dillmann, 'Manipulability analysis', in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, Nov. 2012, pp. 568–573. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651576.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/84945

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20260218-141034-9

In: 12. IFToMM D-A-CH Konferenz 2026, 19./20. Februar 2026, Otto von Guericke Universität Magdeburg



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell 4.0 Lizenz (CC BY-NC 4.0) genutzt werden.