

Reduktion eines menschlichen Körpermodells für eine echtzeitfähige Kollisionsvermeidung in der Mensch-Roboter-Kollaboration

Reduction of a human body model for online collision avoidance in human-robot-collaboration

Heiko Renz, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, heiko.renz@tu-dortmund.de

Maximilian Krämer, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, maximilian.kraemer@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, torsten.bertram@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Modelle des menschlichen Körpers werden in verschiedenen Ausführungen und unterschiedlichen Anwendungsgebieten benötigt. Zur Prädiktion menschlicher Bewegungen ist beispielsweise ein Skelettmodell nötig, welches die Posen verschiedener Körperteile darstellen kann [1]. Darüber hinaus ist in der Robotik oftmals eine Betrachtung des Körpers in einer vereinfachten Form erwünscht, um Distanzen zwischen dem Menschen und dem Roboter echtzeitfähig zu bestimmen [2]. Der vorliegende Beitrag stellt daher eine systematische Reduktion eines Referenzmodells (s. Abb. 1a) auf ein reduziertes Modell (s. Abb. 1b) vor und vergleicht die Rechenzeit zur Berechnung aller Distanzen zwischen den Modellen und dem Roboter. Diese Rechenzeit ist beispielsweise von Bedeutung, wenn eine echtzeitfähige Trajektorienplanung mit Kollisionsvermeidung genutzt werden soll [3]. Zur Darstellung im Arbeitsraum wird ein Körpermodell (s. Abb. 1c) für das reduzierte Skelett entworfen und mit einer detailgetreueren Darstellung eines Körpermodells (s. Abb. 1d) für das Referenzskelett (s. Abb. 1a) verglichen. Der Vergleich untersucht die Genauigkeit der reduzierten Körperdarstellung.

Abb. 1a zeigt das Skelett, welches von einem Motion-Capture System bereitgestellt wird [4]. An jedem der schwarzen Punkte befindet sich ein Gelenk mit drei Freiheitsgraden. Abb. 1b zeigt eine Vereinfachung dieser Darstellung. Alle Gelenke mit drei Freiheitsgraden werden durch einzelne oder mehrere rotatorische Gelenke vereinfacht und somit wird die Anzahl an Gelenken und Körperteilen reduziert. Diese Vereinfachungen erleichtern die Bestimmung einer analytischen inversen Kinematik, mit welcher reale Bewegungsdaten eines Motion-Capture Systems auf das vereinfachte Körpermodell übertragen werden können, damit Zustandsschätzungen sowie Extrapolationen im Gelenkraum des Skeletts effizient möglich sind. Für das reduzierte Skelett wird das Körpermodell in Abb. 1c mit Hilfe von *Swept-Sphere Volumes* (SSVs) [5] erstellt. Die Nutzung von SSVs begünstigt eine schnelle Berechnung von Distanzen. Das Körpermodell des Referenzmodells in Abb. 1d dient zum Vergleich der Genauigkeit des reduzierten Körpermodells und stellt eine mögliche Volumendarstellung für das Referenzskelett dar. Die explizite Darstellung von menschlichen Gelenken als Kugeln wird in dem reduzierten Körpermodell den zugehörigen vorangehenden oder nachfolgenden Körperteilen zugeordnet. Dies senkt die Anzahl an Volumenkörpern, die zur Modellierung des Körpers nötig ist, und somit die Anzahl an nötigen Distanzberechnungen. Die Beine werden in diesem Beispiel signifikant reduziert und in einen Volumenkörper mit einer Bewegungsrichtung (s. Abb. 1b) vereint. Begründet liegt diese Vereinfachung darin, dass kollaborierende Roboter für unterstützende Tätigkeiten häufig auf Tischhöhe montiert werden. Die Beine des Menschen werden somit einem geringem Kollisionsrisiko ausgesetzt.

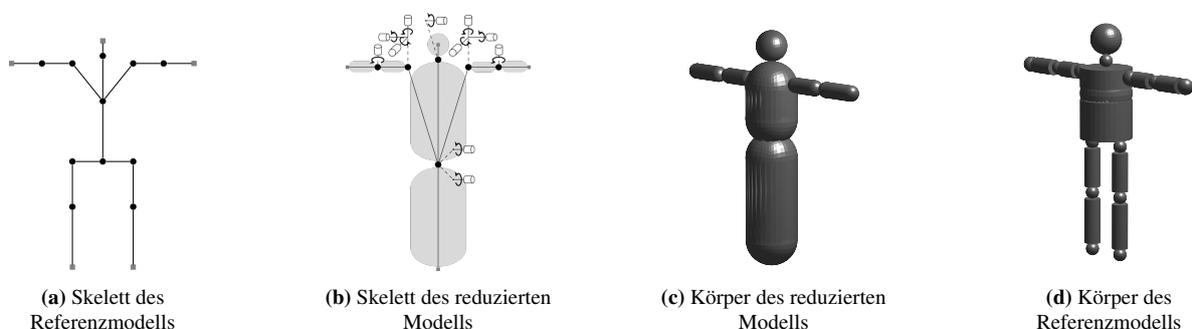


Bild 1 Skelett des Referenzmodells (a) und des vorgestellten reduzierten Modells (b). Eine Körpervolumendarstellung des reduzierten Modells (c) basierend auf *Swept-Sphere Volumes* und ein detailgetreueres Vergleichsmodell für das Referenzskelett (d).

Tabelle 1 Rechenzeit und Anzahl verschiedener Distanztypen

Distanztyp	Mittlere Rechenzeit	Referenzmodell	Reduziertes Modell
Punkt-Punkt	18 ns	45	3
Punkt-Strecke	28,2 ns	75	21
Strecke-Strecke	38,1 ns	30	18

Tabelle 2 Ergebnisse Voxelvergleich für Permutationen mit und ohne Bein Körper und für eine reale Bewegung

	V_{crit}	V_{add}
Permutationen, mit Bein	12,26 %	50,28 %
Permutationen, ohne Bein	16,93 %	9,51 %
Reale Bewegung, ohne Bein	27,02 %	32,41 %

Die Evaluation bewertet im Folgenden zunächst die Rechenzeiten und dann die Modellgenauigkeit. Zur Nutzung des reduzierten Modells mit dem echtzeitfähigen Trajektorienplaner [3] ist eine geringe Rechenzeit zur Berechnung aller Distanzen zwischen den Modellen des Menschen und dem Roboter notwendig. Der Roboter wird hierbei ebenfalls mit SSVs dargestellt, sodass ausschließlich die Distanztypen Punkt-zu-Punkt, Punkt-zu-Strecke und Strecke-zu-Strecke vorliegen. Der Roboter besteht dabei aus jeweils drei Zylindern und drei Kugeln. Für die drei Distanztypen werden Rechenzeiten über 10 Iterationen mit jeweils 100.000 Beispielen bestimmt. Die zur Berechnung genutzte Hardware ist mit einem Intel i5-12600KF mit 3,7 GHz und 32 GB RAM ausgestattet. Die gemittelten Rechenzeiten sowie die Anzahl der Distanztypen zwischen den Körpermodellen und dem Roboter sind in Tabelle 1 dargestellt. Es ergeben sich Gesamt-Rechenzeiten von 4.068 ns (Referenzmodell) und 1.332 ns (reduziertes Modell), was einer Reduktion um den Faktor 3 entspricht.

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Volumendarstellungen wird ein Voxelvergleich zwischen den Modellen gemacht. Die Voxel haben dabei eine Kantenlänge von $l_V = 1$ cm. Von besonderem Interesse sind dabei die relative Anzahl an Voxeln $V_{crit} = n_{1,0}/n_{ref}$ und $V_{add} = n_{0,1}/n_{red}$, mit $n_{1,0}$ als Anzahl an Voxeln die ausschließlich im Referenzmodell und $n_{0,1}$ als Anzahl an Voxeln die ausschließlich im reduzierten Modell belegt sind, und n_{ref} sowie n_{red} als Anzahl an belegten Voxeln im Referenzmodell beziehungsweise dem reduzierten Modell. Die Metrik V_{crit} betrachtet ein potenzielles Risiko für den Menschen durch nicht abgedecktes Volumen. Die Metrik V_{add} betrachtet zusätzlich belegtes Volumen im Arbeitsraum. Zur Prüfung einer weiteren Vereinfachung des Modells durch Entfall des Beinkörpers, werden V_{crit} und V_{add} für das reduzierte Modell mit und ohne Bein Körper berechnet. Als Bewegung werden 88 künstliche Permutationen des Oberkörpers genutzt. Tabelle 2 zeigt die zugehörigen Ergebnisse. Der erhöhte Wert von V_{crit} für ein Modell ohne Bein Volumen gegenüber der Darstellung mit Bein Volumen entsteht durch den abgerundeten Bereich an der Hüfte des reduzierten Modells. Wird der Bein Körper modelliert, so überlagert dieser einen Teil der unbelegten Voxel des Referenzmodells. Die Modellierung des Beinkörpers erzeugt eine Steigerung der zusätzlich belegten Voxel. Über die Hälfte aller Voxel des reduzierten Modells entfallen dabei auf Bereiche, die das Referenzmodell nicht belegt. Über 40 % entstehen dabei durch den Bein Körper. Daher entfällt im Folgenden der Bein Körper, da die Steigerung von V_{crit} im Vergleich zum zusätzlichen Volumen gering ist. Anschließend werden die Ergebnisse des reduzierten Modells ohne Bein Körper für die 88 Permutationen mit denen für eine aufgenommene freie Bewegungssequenz verglichen, welche ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt sind. Bei einer aufgenommenen Bewegung wird die Belegung der Voxel direkt aus den gemessenen Positionen und Körperteilmaßen des Referenzmodells bestimmt. Der gestiegene Fehler V_{crit} ist dadurch zu begründen, dass die Berechnung der Volumen für eine echte Bewegungssequenz basierend auf gemessenen Positionen und Körperteilmaßen alle Änderungen des menschlichen Bewegungsapparates berücksichtigen kann. Die inverse Kinematik berechnet aus den Positionen die Gelenkwinkel aller definierten Gelenke des reduzierten Modells (s. Abb. 1b). Das reduzierte Modell ist aber eine Vereinfachung und kann daher nicht alle Bewegungen des flexibleren Bewegungsapparates abbilden.

Abschließend wird die Nutzung des reduzierten Modells für eine echtzeitfähige Kollisionsvermeidung als sinnvoll erachtet, da die Reduktion der Rechenzeit trotz der geringeren Genauigkeit des Modells von Vorteil ist.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Projektes durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer 497071854).

Literatur

- [1] Aksan, E.; Kaufmann, M.; Hilliges, O.: *Structured prediction helps 3D human motion modelling*. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019. Seoul, Korea.
- [2] Corrales, J. A.; Candelas, F. A.; Torres, F.: *Safe human-robot interaction based on dynamic sphere-swept line bounding volumes*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. (2011), Volume 27, S. 177-185.
- [3] Krämer, M.; Rösmann, C.; Hoffmann, F.; Bertram, T.: *Model predictive control of a collaborative manipulator considering dynamic obstacles*. Optimal Control Applications and Methods. (2020), Volume 41, S. 1211-1232.
- [4] OptiTrack: *Skeleton Tracking*. Website: https://v22.wiki.optitrack.com/index.php?title=Skeleton_Tracking, Besucht am: 02.11.2022.
- [5] Larsen, E.; Gottschalk, S.; Lin, M. C.; Manocha, D.: *Fast proximity queries with swept sphere volumes*. Technical Report TR99-018 (1999), Department of Computer Science, University of North Carolina, S. 3719-3726

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

In: Neunte IFToMM D-A-CH Konferenz 2023

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/77399

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230314-170921-3



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