

Modulare, datengetriebene Roboterprogrammierung für die Lösung komplexer Handhabungsaufgaben in Alltagsumgebungen

Modular, Data-driven Robot Programming for Complex Manipulation Tasks in Everyday Environments

Benjamin Alt¹, Florian Aumann¹, Lennart Gienger¹, Florian Jordan², Dr. Darko Katic¹, Dr. Rainer Jäkel¹, Dr. Birgit Graf²

¹ArtiMinds Robotics, Karlsruhe, Deutschland, {vorname}.{nachname}@artiminds.com

²Fraunhofer IPA, Stuttgart, Deutschland, {vorname}.{nachname}@ipa.fraunhofer.de

Kurzfassung

In der Altenpflege besteht großes Potential für den Einsatz von Robotern, die teilautonom Assistenzfunktionen im täglichen Leben übernehmen. Bei der Zubereitung sowie Anreicherung von Speisen und Getränken stellen unstrukturierte Umgebungen, eine große Bandbreite zu manipulierender Objekte sowie die komplexe Mensch-Roboter-Interaktion große Herausforderungen für Assistenzroboter dar. Wir präsentieren eine Bibliothek parametrierbarer, hardware-agnostischer Roboterskills für die Zubereitung und Anreicherung von Speisen, welche durch Komposition die Lösung komplexer Manipulationsaufgaben ermöglichen, sowie einen Ansatz für die automatische Anpassung der generierten Roboterbahnen anhand von 3D-Punktwolken der Umgebung. Die vorgestellten Arbeiten wurden auf zwei sechsachsigen Roboterarmen und einem humanoiden Assistenzroboter evaluiert.

Abstract

Increasing demand for high-standard elderly care and stagnant availability of qualified labor makes the need for partially autonomous robotic ambient assisted living (AAL) solutions increasingly urgent. The preparation and serving of food and beverages is an important subdomain of care robotics, which is rendered challenging by unstructured environments, a large variety of manipulated objects and the need to interact with human users. This work presents a modular, hardware-agnostic approach for programming robots to perform complex assistance functions in unstructured environments. We propose a robot-agnostic library of parameterized robot skills which encapsulate primitive tasks central to food preparation and serving, from which hierarchical manipulation sequences can be constructed. We further propose an approach for the automatic adaption of generated motions based on 3D point clouds of the environment to manipulate objects of different dimensions and shapes. We evaluate our solution on two 6-DOF robotic manipulators as well as a bimanual humanoid assistance robot.

1 Einleitung

Aufgrund steigenden Bedarfs nach qualifizierter Betreuung im Alter bei gleichzeitig stagnierenden Pflegekapazitäten besteht in der Altenpflege großes Potential für den Einsatz von Robotern, die teilautonom Assistenzfunktionen im täglichen Leben übernehmen. Ein wichtiger Einsatzbereich ist die Zubereitung sowie Anreicherung von Speisen und Getränken im häuslichen Umfeld, wobei unstrukturierte Umgebungen, eine große Bandbreite zu manipulierender Objekte sowie die Mensch-Roboter-Interaktion große Herausforderungen für Assistenzroboter darstellen. Softwareseitig ist komplexe Programmlogik für Aktorik, Perzeption und Prozesssteuerung erforderlich, was die Programmierung robotischer Assistenzsysteme deutlich erschwert. Wir stellen eine erweiterbare und hierarchisch komponierbare Bibliothek modularer Programmbausteine für die Assistenzrobotik vor, welche die intuitive Erstellung und Anpassung selbst komplexer Manipulationsaktionen für die Zu-

bereitung und Anreicherung von Speisen auf beliebiger Roboterhardware ermöglicht. Wir präsentieren zudem einen Ansatz für die automatische Generierung von Roboterbahnen zum Schneiden oder Löffeln von Lebensmitteln anhand von 3D-Punktwolken. Die vorgestellten Lösungen wurden auf einem sechsachsigen Industrieroboter, einem kollaborativen Roboter sowie dem Assistenzroboter Care-O-bot 4 [15] evaluiert.

2 Stand der Technik

Roboterbasierte Assistenzsysteme für unterstützende Tätigkeiten im Alltag werden überwiegend als eng gekoppelte Software-Hardware-Systeme entwickelt [1]. Beispi-

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts RoPHa (<https://www.ropha-projekt.de>, Förderkennzeichen 16SV7836 (Artiminds) und 16SV7835K (Fraunhofer IPA)) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

le sind die Care-O-bot [15], Human Support Robot (HSR) [22] oder TIAGo-Plattformen [17], die jeweils eigene Programmierschnittstellen anbieten, um bereits implementierte Fertigkeiten zu erweitern und ergänzen. Die zunehmende Unterstützung hardwareübergreifender Middleware wie ROS [18] durch Hardware für Perzeption und Aktorik ermöglicht darüber hinaus die rein softwareseitige Implementierung komplexer Assistenzfunktionen ohne enge Kopplung an spezialisierte Hardware. Das EASE-Framework [5] und verwandte Arbeiten [6, 7] realisieren die weitestgehend automatische Lösung verschiedener Alltagsaufgaben wie das Zubereiten unterschiedlicher Speisen oder Hol- und Bring-Aufgaben hardwareübergreifend durch den Einsatz von Wissensbasen, Simulationen und semantischer Inferenz, während andere Arbeiten feinfühligere Manipulation [13, 2] oder robuste Perzeption [9, 8] in Alltagsumgebungen umsetzen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Hardware oder die Verwendung entwickelter Fähigkeiten in anderen Kontexten erfordert jedoch substantiellen Programmieraufwand und bleibt daher in der Regel aus. Modulare, auf Bewegungsprimitiven basierende Ansätze für die Programmdarstellung und Bewegungsplanung erwiesen sich als geeignet, durch Kombination bekannter Teillösungen komplexe Manipulationsprobleme in zahlreichen Anwendungsdomänen zu lösen [19, 11, 23, 21]. Die vorliegende Arbeit zeigt daher einen Ansatz für die Umsetzung von Perzeptions- und Manipulationsfertigkeiten auf, welcher die realisierten Fertigkeiten in wiederverwendbaren, hardwareunabhängigen und beliebig kombinierbaren Skills kapselt. Somit wird die Erstellung komplexer Manipulationssequenzen für Assistenzfunktionen und deren Transfer zwischen Roboterplattformen deutlich vereinfacht.

3 Skill-Bibliothek für Assistenzfunktionen zum Zubereiten und Anreichen von Speisen

Wir präsentieren eine modulare Bibliothek kombinierbarer Roboterskills, welche durch Parametrierung auf die konkrete Anwendung und Umgebung angepasst und auf beliebigen Roboterplattformen ausgeführt werden können. Das entwickelte Gesamtkonzept für die Skill-basierte Programmierung von Assistenzrobotern ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

3.1 Constraint-basierte Bewegungsplanung und Roboterskills

Grundlage der entwickelten Lösung ist die von Jäkel [12] vorgestellte modulare Darstellung von Roboterprogrammen. Grundfertigkeiten wie Linear- oder Point-to-Point-Bewegungen, Greifbewegungen oder Fügeoperationen werden als wiederverwendbare Skills gekapselt, welche vom Anwender durch Angabe Skill-spezifischer Parameter wie Zielpunkte oder Geschwindigkeiten und Beschleunigungen parametrierbar und somit an die konkrete Anwendung angepasst werden können. Die bei der Aus-

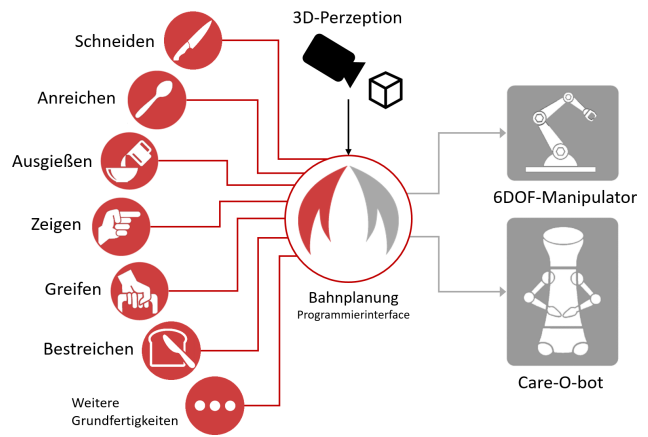


Abbildung 1 Schematische Darstellung des modularen Programmierkonzepts

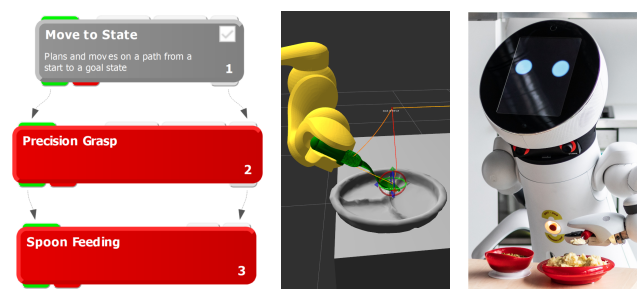


Abbildung 2 Beispielhaftes Skill-basiertes Roboterprogramm (links), Simulation (Mitte) und reale Ausführung (rechts)

führung eines Skills vom Roboter abzufahrende Trajektorie wird durch Lösung eines eingeschränkten Optimierungsproblems generiert. Für Details der Bewegungsplanung sei auf [12] verwiesen.

Die für die vorliegende Arbeit verwendete Implementierung dieses Programmierkonzepts ist die ArtiMinds Robot Programming Suite (RPS) [20], welche eine grafische Benutzerschnittstelle für die Skill-basierte Roboterprogrammierung sowie eine editierbare 3D-Darstellung des Roboters und der Umgebung bereitstellt und für die vorliegende Arbeit um Skills für Assistenzfunktionen in der häuslichen Pflege erweitert wurde. Abb. 2 zeigt ein aus einer Sequenz von drei parametrisierten Skills bestehendes Roboterprogramm. Unter Verwendung plattformspezifischer Compiler-Backends sowie der entsprechenden Kinematik- und Dynamikbeschreibungen können die geplanten Bewegungen auf prinzipiell beliebigen Roboterplattformen ausgeführt werden. Für die vorliegende Arbeit wurde die RPS um Unterstützung für den Care-O-bot 4 erweitert.

3.2 Grundfertigkeiten für das Zubereiten und Anreichen von Speisen

Die vorgestellte Bibliothek an Grundfertigkeiten umfasst Skills für das Anreichen breiartiger Speisen mit einem Löffel, das Greifen beliebig geformter Objekte, das Ausgießen von Flüssigkeiten, das Schneiden von Lebensmitteln, das Bestreichen von Brot, das Bestreuen von Lebensmitteln (z.B. mit Salz oder Zucker) sowie das Ausbringen viskoser

Flüssigkeiten. Die Skills wurden über die Definition geeigneter Constraints gemäß [12] definiert und können über die RPS parametrisiert und zu komplexen Manipulationssequenzen kombiniert werden. Für eine detaillierte Ausarbeitung der entwickelten Skills und deren Umsetzung, vgl. Aumann [4].

3.2.1 Greifen

Das allen entwickelten Skills zugrundeliegende Prinzip der Constraint-basierten Bewegungsplanung kann anhand des Greif-Skills anschaulich dargestellt werden. Für einen der menschlichen Hand ähnlichen artikulierten Greifer kann eine Grundlinie in der Handfläche definiert werden (vgl. Abb. 3 links). Durch Versatz der Grundlinie um die intendierte Griffweite orthogonal zur Handfläche ergibt sich die Linie, auf welcher sich die Fingerspitzen bei einem Präzisionsgriff mit der gegebenen Griffweite befinden müssen (vgl. Abb. 3 rechts). Die Greifbewegung kann unter Verwendung dieser Einschränkung als Zielconstraint mit [12] automatisch berechnet werden. Dadurch, dass lediglich die Öffnungsweite definiert wird und die letztendliche Greiferstellung automatisch geplant wird, können beliebige weitere Kriterien für einen erfolgreichen Griff hinzugefügt werden, wie dass das Objekt mit einem möglichst flachen Winkel der Finger gegriffen werden soll. Die Greifplanung ist hierbei ohne Anpassungen auf beliebige Greiferkinematiken übertragbar.

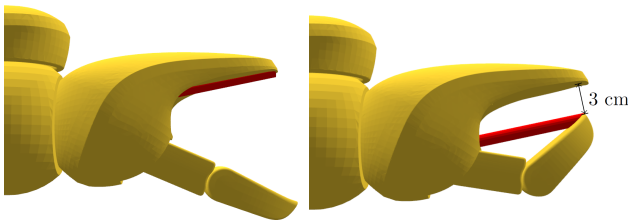


Abbildung 3 Definition eines Greifconstraints für einen artikulierten Greifer, hier für den Care-O-bot 4

3.2.2 Ausgießen

Das Ausgießen und Einschenken von Flüssigkeiten aus bzw. in unregelmäßig geformte Behälter erfordert neben der o.g. Bewegungsplanung eine komplexe Vorverarbeitungs pipeline für die Extraktion geeigneter Rotationspunkte bzw. Zielpositionen über detektierten 3D-Objekten. Abb. 4 gibt eine Übersicht über die implementierten Verarbeitungsschritte. Die extrahierten Posen dienen als Zielconstraints für die Anfahrt- und Ausgießbewegungen, vorausgesetzt das Objekt befindet sich bereits im Greifer. Zudem wird beim Einschenken durch entsprechende Orientierungsconstraints sichergestellt, dass die Flüssigkeit während der Transferbewegungen nicht verschüttet wird.

3.2.3 Hierarchische Skills

Neben atomaren Skills wie dem Greifen oder dem Ausgießen wurden Skills zweiter Ordnung entwickelt, welche wiederum aus parametrisierten Skill-Sequenzen bestehen und komplexe Manipulationssequenzen kapseln. Der Skill zum Bestreichen von Brot (mit Butter, Marmelade, ...)

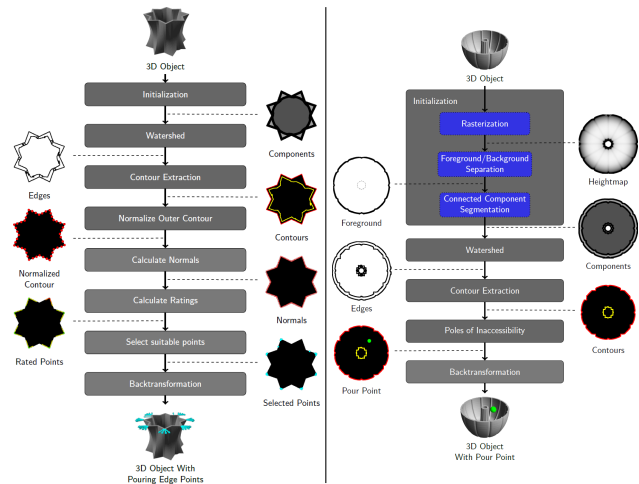


Abbildung 4 Verarbeitungspipeline für das Ausgießen (links) und Einschenken (rechts)

wurde als Sequenz wiederholter Streichbewegungen realisiert, wobei z.B. die initiale Position und Orientierung des Messers im Greifer, die Geometrie des Messers, die intendierte Streichrichtung und die Position der Brotscheibe variable Skill-Parameter sind, über welche der Skill an die Gegebenheiten der Umgebung angepasst werden kann. Vergleichbar wurde das Ausbringen viskoser Flüssigkeiten (z.B. Ketchup oder Schokoladensauce) aus einer Flasche als Kombination einer Ausgießbewegung mit darauf folgendem Abfahren eines Gitters über dem zu dekorierenden Lebensmittel umgesetzt, sowie ein Skill zum Bestreuen von Lebensmitteln mit z.B. Salz oder Puderzucker. Die beliebige hierarchische Kombinierbarkeit stellt einen großen Vorteil der vorgestellten Bibliothek und des Skill-basierten Programmierkonzepts dar und reduziert den Entwicklungsaufwand für neue, komplexere Skills deutlich.

3.3 Bewegungsplanung mit Rücksicht auf menschliche Nutzer

Eine Kernanforderung an die Bewegungsplanung in der Assistenzrobotik ist die explizite Berücksichtigung des Menschen, mit welchem der Roboter interagiert [3]. Für die nonverbale und damit auch für hörgeschädigte Menschen geeignete Roboter-Mensch-Kommunikation wurde ein Skill zum Zeigen auf Objekte entwickelt. Durch Betrachtung der Sichtlinie zwischen Roboterhand und Objekt sowie der Sichtlinie zwischen Betrachter und Roboterhand als Constraints bei der Bewegungsplanung wurden Uneindeutigkeiten beim Deuten auf verdeckte Objekte vermieden und sichergestellt, dass die Zeigegeste für den Betrachter selbst sichtbar ist (vgl. Abb. 5). Zudem wurden Constraints für die Beschränkung der kumulativen Gelenkwinkeldistanz sowie zur Minimierung der erwarteten Drehmomente in den Gelenken entwickelt [16]. Diese für alle entwickelten Skills anwendbaren Constraints resultieren in Bewegungen, welche menschlichen Bewegungsmustern ähneln und die Interaktion mit dem Roboter für den Menschen angenehmer und vorhersagbarer machen.

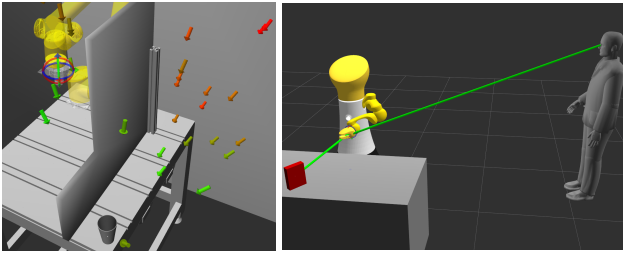


Abbildung 5 Bewertung möglicher Zielposen für Zeigegesten in Gegenwart von Hindernissen; Zeigegesten unter Betrachtung von Sichtlinien

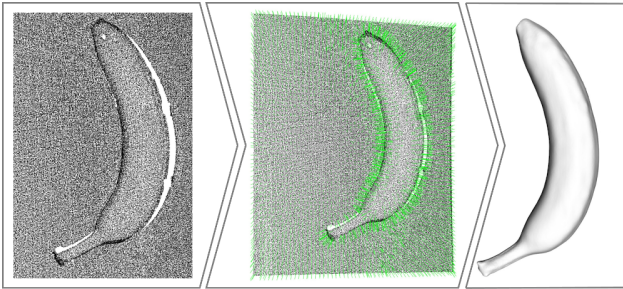


Abbildung 6 Objektextraktion: 3D-Punktwolke (links), Normalenvektoren (Mitte) und finales Mesh (rechts)

4 Flexible Bewegungsplanung über 3D-Punktwolken

Im Fall bestimmter Grundfertigkeiten wie dem Löffeln und Anreichen breiartiger Speisen sowie dem Schneiden von Lebensmitteln ist die zu planende Bewegung eng an die Form und Oberflächenstruktur der jeweiligen Lebensmittel gekoppelt. Vergleichbar zum Greifen (vgl. 3.2.1) muss eine über 3D-Perzeption erkannte Repräsentation der zu manipulierenden Lebensmittel betrachtet werden, wobei jedoch über die Extraktion bestimmter Merkmale hinaus die gesamte Bewegung an die Form der Lebensmittel angepasst werden muss. In der vorliegenden Arbeit wurde die für das Löffeln und Schneiden notwendige flexible Bewegungsplanung durch ein dreischrittiges Verfahren bestehend aus Meshing, Trajektoriengenerierung und -optimierung realisiert:

- 1. Meshing von 3D-Punktwolken und Objektextraktion.** Aus einer vorgefilterten 3D-Punktwolke des zu manipulierenden Objekts wird mit dem Poisson-Algorithmus [14] ein zusammenhängendes Mesh generiert. Auf das Mesh werden Durchlass-, Ebenen- und Ausreißerfilter angewendet, um das zu manipulierende Objekt möglichst artefaktfrei herauszuschneiden (vgl. Abb. 6).
- 2. Generierung von Roboterbewegungen.** Für die automatische Erzeugung initialer Bewegungen wird die Oberfläche des Meshes trianguliert und in eine Ebene projiziert. Innerhalb der zweidimensionalen konvexen Hülle der Triangulationspunkte werden Bahnen generiert und anschließend auf die dreidimensionale Objekt Oberfläche projiziert (vgl. Abb. 7 (links)). Dieser

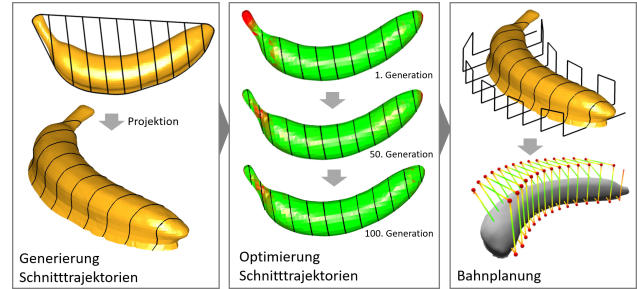


Abbildung 7 Flexible Bahnplanung über 3D-Meshes

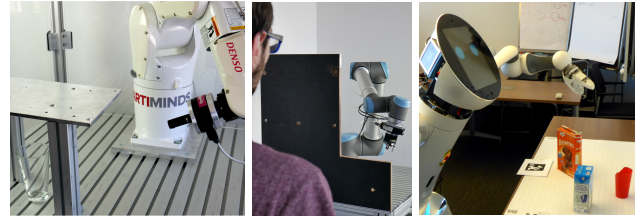


Abbildung 8 Zeigegesten mit einem Denso VS050, einem Universal Robots UR5 und einem Care-O-bot 4

Ansatz lässt sich unverändert auf das Löffeln breiartiger Lebensmittel übertragen, da auch hier eine Fläche nach und nach abgefahren werden muss.

- 3. Optimierung von Bewegungen über erkannten Objekten.** Mit einem evolutionären Algorithmus werden die projizierten Geraden optimiert. Als Optimalitätskriterium gilt die Abdeckung der Oberfläche durch das Werkzeug beim Löffeln oder die Oberfläche der erzeugten Scheiben beim Schneiden mit einem Messer. Die Optimierung resultiert in Bewegungsbahnen, welche die Oberfläche vollständig und regelmäßig abdecken (vgl. Abb. 7 (Mitte), Abb. 9 (links)). In einem letzten Schritt werden die optimierten Geraden zu einer zusammenhängenden Bahn verbunden (vgl. Abb. 7 (rechts)).

Für eine detaillierte Betrachtung der vorgestellten Lösung zur Bewegungsplanung über 3D-Punktwolken sei auf Gienger [10] verwiesen.

5 Ergebnisse

Die entwickelten Grundfertigkeiten wurden unter Laborbedingungen auf einem Denso VS050-Industrieroboter, einem kollaborativen Universal Robots UR5 und dem Assistenzroboter Care-O-bot 4 getestet. Zudem wurden die Grundfertigkeiten im Rahmen des Projekts RoPha in einen Demonstrator am Fraunhofer IPA integriert und in realistischen, komplexen Anwendungsszenarien mit menschlichen Probanden evaluiert.

Aufgrund der hardwareunabhängigen Darstellung der Skills durch parametrierbare Constraints für die Bewegungsplanung konnten aus den umgesetzten Skills bestehende Roboterprogramme auf allen Hardwareplattformen ausgeführt werden (vgl. Abb. 8). Durch Anpassen entsprechender Parameter wie der Griffweite konnten Skills

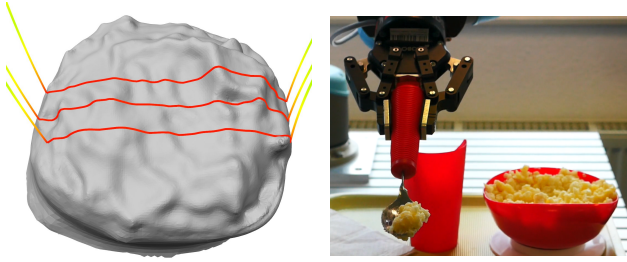


Abbildung 9 Geplante Trajektorie für das Löffeln von Kartoffelbrei; Anreichen von Kartoffelbrei mit einem Universal Robots UR5



Abbildung 10 Schneiden und Ausgießen mit einem Universal Robots UR5

für das Greifen und Ausgießen ohne algorithmische Anpassungen auf Objekte unterschiedlicher Größe und Form angewendet werden. Die Lösung zur automatischen Bewegungsplanung über 3D-Punktwolken wurde für das Schneiden von Brot, Bananen, Kuchen und Waffeln sowie für das gleichmäßige Auslöffeln und Anreichen von Kartoffelbrei auf realer Hardware validiert (vgl. Abb. 9, Abb. 10).

Für die Nutzertests der entwickelten Fertigkeiten im Anwendungskontext wurden am Fraunhofer IPA drei Testszenarien umgesetzt, die realistische Anwendungen im Kontext der Unterstützung älterer und pflegebedürftiger Menschen darstellen. Die Evaluationsszenarien umfassten das Auslöffeln und Anreichen von Kartoffelbrei und Erbsen, das Schneiden einer Waffel sowie das Bestreuen einer Waffel mit Puderzucker (vgl. Abb. 11). Beide Szenarien wurden in einer realistischen Alltagsumgebung mit handelsüblichen Utensilien und Lebensmitteln durchgeführt und erfordern die Kombination mehrerer Skills zu komplexeren Roboterprogrammen, wobei die Perzeption und Mensch-Roboter-Interaktion vom Fraunhofer IPA und weiteren Projektpartnern im Projekt RoPHa umgesetzt wurde. Insgesamt 18 menschliche Probanden interagierten mit dem Demonstrator und bewerteten die Bewegungen des Roboters überwiegend als vorhersehbar und angenehm (vgl. Abb. 12). Verbesserungsmöglichkeiten wurden in der Geschwindigkeit der Bewegungen identifiziert, welche jedoch den Grenzen der verwendeten Hardware sowie der Notwendigkeit der sicheren Manipulation in unmittelbarer Nähe des Menschen unterliegt. Die Geschwindigkeit der Bewegungen kann durch Einsatz von für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion ausgelegte Sensorik und Aktorik einfach gesteigert werden.



Abbildung 11 Schneiden einer Waffel (links); Bestreuen einer Waffel mit Puderzucker (rechts, Nutzertests)

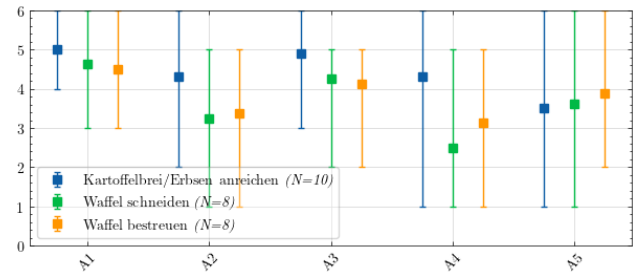


Abbildung 12 Ergebnisse der Nutzerbefragung. Die Y-Achse indiziert den jeweiligen minimalen, maximalen und durchschnittlichen Grad der Zustimmung (0: keine Zustimmung, 6: volle Zustimmung) zu den Aussagen: A1: Die Bewegungen sind vorhersehbar. A2: Die Bewegungen sind natürlich. A3: Die Bewegungen sind angenehm. A4: Die Geschwindigkeiten sind angemessen. A5: Die Haltung des Bestecks ist passend.

6 Bewertung und Ausblick

Die vorgestellte Skill-Bibliothek sowie das zugrundeliegende modulare Programmierkonzept ermöglichen die einfache Realisierung und nachträgliche Anpassung selbst komplexer Roboterprogramme für Assistenzfunktionen in Alltagsumgebungen. Die präsentierte automatische Bewegungsplanung über 3D-Punktwolken erlaubt die Optimierung geplanter Bewegungen hinsichtlich der Geometrie der über 3D-Perzeption erkannten, zu manipulierenden Objekte. Die große Bandbreite der umgesetzten Assistenzfunktionen sowie die erfolgreiche Integration in das im RoPHa-Projekt geschaffene Rahmenwerk für die Unterstützung pflegebedürftiger Menschen im Alltag zeugen von der universellen Anwendbarkeit des vorgestellten Programmierkonzepts in der Assistenzrobotik.

Die vorliegenden Arbeiten liefern zahlreiche Anreize für weitere Forschung. So ermöglicht eine dichtere Integration zwischen der Perzeption und der vorgestellten modularen Programmrepräsentation die Programmierung robuster Assistenzsysteme mit einem nochmals gesteigerten Grad der Autonomie. Weiterhin kann das vorgestellte Programmierkonzept durch die Einbindung von speziell für Manipulationsaufgaben in Alltagsumgebungen entwickelte Wissensbasen wie OpenEASE um Handhabungsfertigkeiten für nahezu beliebige Objekte und Anwendungen in der Assistenzrobotik erweitert werden.

7 Literatur

- [1] Anas Abou Allaban, Maozhen Wang, and Taşkın Pađır. A Systematic Review of Robotics Research in Support of In-Home Care for Older Adults. *Information*, 11(2):75, February 2020.
- [2] Marcin Andrychowicz, Bowen Baker, Maciek Chociej, Rafal Józefowicz, Bob McGrew, Jakub Pachocki, Arthur Petron, Matthias Plappert, Glenn Powell, Alex Ray, Jonas Schneider, Szymon Sidor, Josh Tobin, Peter Welinder, Lilian Weng, and Wojciech Zaremba. Learning Dexterous In-Hand Manipulation. *Int. J. Robot. Res.*, 39(1):3–20, January 2020.
- [3] T. Asfour and R. Dillmann. Human-like Motion of a Humanoid Robot Arm Based on a Closed-Form Solution of the Inverse Kinematics Problem. In *IROS*, volume 2, pages 1407–1412, Las Vegas, NV, USA, 2003. IEEE.
- [4] Florian Aumann. *Flexible Generation of Movements for Elderly Care Robotics*. Masters' Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2019.
- [5] John Bateman, Michael Beetz, Daniel Beßler, Asil Kaan Bozcuoglu, and Mihai Pomarlan. Heterogeneous Ontologies and Hybrid Reasoning for Service Robotics: The EASE Framework. In *Third Iberian Robotics Conference*, 2017.
- [6] Michael Beetz, Daniel Bessler, Andrei Haidu, Mihai Pomarlan, Asil Kaan Bozcuoglu, and Georg Bartels. Know Rob 2.0 — A 2nd Generation Knowledge Processing Framework for Cognition-Enabled Robotic Agents. In *ICRA*, pages 512–519, May 2018.
- [7] Asil Kaan Bozcuođlu and Michael Beetz. A Cloud Service for Robotic Mental Simulations. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2653–2658, May 2017.
- [8] Xiaotong Chen, Rui Chen, Zhiqiang Sui, Zhefan Ye, Yanqi Liu, R. Iris Bahar, and Odest Chadwicke Jenkins. GRIP: Generative Robust Inference and Perception for Semantic Robot Manipulation in Adversarial Environments. In *IROS*, pages 3988–3995, November 2019.
- [9] Peter R. Florence, Lucas Manuelli, and Russ Tedrake. Dense Object Nets: Learning Dense Visual Object Descriptors by and for Robotic Manipulation. In *CoRL*, volume 87 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 373–385. PMLR, 2018.
- [10] Lennart Gienger. *Optimierung der Werkzeugbahn für Oberflächenbearbeitungsprozesse in der Industrierobotik*. Masters' Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2018.
- [11] De-An Huang, Suraj Nair, Danfei Xu, Yuke Zhu, Animesh Garg, Li Fei-Fei, Silvio Savarese, and Juan Carlos Niebles. Neural Task Graphs: Generalizing to Unseen Tasks from a Single Video Demonstration. *ArXiv180703480 Cs*, July 2018.
- [12] Rainer Jäkel. *Learning of Generalized Manipulation Strategies in Service Robotics*. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2013.
- [13] Eric Jang, Sudheendra Vijayanarasimhan, Peter Pastor, Julian Ibarz, and Sergey Levine. End-to-End Learning of Semantic Grasping. In *CoRL*, pages 119–132, October 2017.
- [14] Michael Kazhdan, Matthew Bolitho, and Hugues Hoppe. Poisson Surface Reconstruction. In *Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, SGP '06, pages 61–70, Goslar, Germany, June 2006. Eurographics Association.
- [15] Ralf Kittmann, Tim Fröhlich, Johannes Schäfer, and Ulrich Reiser. Let Me Introduce Myself: I Am Care-O-Bot 4, a Gentleman Robot. In *Mensch Und Computer 2015. Proceedings*, pages 223–232, 2015.
- [16] Yves Nubar and Renato Contini. A Minimal Principle in Biomechanics. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 23(4):377–391, December 1961.
- [17] Jordi Pages, Luca Marchionni, and Francesco Ferro. TIAGo: The Modular Robot That Adapts to Different Research Needs. In *International Workshop on Robot Modularity*, 2016.
- [18] M. Quigley. ROS: An Open-Source Robot Operating System. In *ICRA 2009*, 2009.
- [19] Stefan Schaal. Dynamic Movement Primitives -A Framework for Motor Control in Humans and Humanoid Robotics. In Hiroshi Kimura, Kazuo Tsuchiya, Akio Ishiguro, and Hartmut Witte, editors, *Adaptive Motion of Animals and Machines*, pages 261–280. Springer, 2006.
- [20] Sven R Schmidt-Rohr, Rainer Jäkel, and Gerhard Dirschl. ArtiMinds Robot Programming Suite. ArtiMinds Robotics GmbH, 2013.
- [21] Philipp S. Schmitt, Florian Wirnshofer, Kai M. Wurm, Georg v. Wichert, and Wolfram Burgard. Planning Reactive Manipulation in Dynamic Environments. In *IROS*, pages 136–143, November 2019.
- [22] Takashi Yamamoto, Tamaki Nishino, Hideki Kajima, Mitsunori Ohta, and Koichi Ikeda. Human Support Robot (HSR). In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18, pages 1–2, New York, NY, USA, August 2018. Association for Computing Machinery.
- [23] You Zhou, Jianfeng Gao, and Tamim Asfour. Learning Via-Point Movement Primitives with Inter- and Extrapolation Capabilities. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4301–4308, Macau, China, November 2019. IEEE.