Das Projekt SMiLE

Servicerobotik für Menschen in Lebenssituationen mit Einschränkungen

Jörn Vogel, Daniel Leidner, Annette Hagengruber, Michael Panzirsch und Alexander Dietrich
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Robotik und Mechatronik
Weßling Deutschland
joern.vogel@dlr.de

Abstract— Im Projekt SMiLE werden Konzepte und Assistenz-Anwendungen entwickelt, um sowohl Menschen mit Behinderungen als auch pflegebedürftigen Personen eine effektive Unterstützung im Alltag zu bieten. Dabei werden die notwendigen Technologien erforscht und zu einem Reifegrad gebracht, der eine Erprobung in realistischen Umgebungen (z.B. in Pflegeheimen und alters- bzw. behindertengerechten Wohnungen) ermöglicht. Zum Einsatz kommen der radbasierte, humanoide Assistenzroboter Rollin' Justin sowie der Rollstuhlassistent EDAN. Diese Systeme sollen über intuitive Schnittstellen von den Benutzern selbst oder über kraftrückgekoppelte Teleoperation gesteuert werden. Mittels der Roboter soll es ermöglicht werden, dass pflegebedürftige Menschen trotz krankheits- oder altersbedingter Bewegungseinschränkungen einen hohen Grad an Selbstständigkeit wiedererlangen können. Darüber hinaus kann die Robotik helfen, das Pflegepersonal zu entlasten, indem z.B. zeitaufwändige Hol- und Bring-Dienste durch ein solches System erledigt werden, während die Pflegekraft sich dem Patienten widmet.

Keywords—Assistenzroboter, Mensch-Roboter Interaktion, künstliche Intelligenz, Telepräsenz

I. Einleitung

Für Menschen mit Behinderungen als auch für pflegebedürftige Personen beinhaltet der Alltag oft unüberwindbare Hürden, die sie alleine nicht bewältigen können. Die Unterstützung durch Pflegekräfte ermöglicht diesen Menschen ihren Alltag zu meistern - egal ob im Heim oder in ihrer häuslichen Umgebung. Jedoch erschwert der demografische Wandel sowie der Fachkräftemangel oftmals eine persönliche und individuelle Pflege. Im Rahmen der Digitalisierung und Heim-Automatisierung entstehen viele neue, innovative Technologien, die auch in der Pflege unterstützend eingesetzt werden können. Robotische Assistenzsysteme könnten dabei in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. In unterschiedlichsten Anwendungen können solche Systeme zum einen die zu Pflegenden, zum anderen die Pflegekräfte bei vielerlei Aufgaben unterstützen. Während dies dem zu Pflegenden mehr Selbstständigkeit im Alltag bietet, kann es den Pfleger von einfachen, wiederkehrenden Aufgaben befreien und somit mehr Zeit für essentielle Aufgaben ermöglichen.

Zahlreiche Forschungseinrichtungen weltweit beschäftigen sich mit der Thematik der Assistenzrobotik in der Pflege. Dabei werden verschiedenste Anwendungsschwerpunkte erforscht.

Abb. 1. Die SMiLE Robotersyteme. *Links:* Der Heimassistenzroboter Rollin' Justin. *Rechts:* Der Rollstuhlbasierte Roboter EDAN

Um eine Entlastung der Pflegekräfte zu gewährleisten werden in erster Linie robotische Hebesystemen [1] sowie Roboter zur Durchführung von Hol- und Bringdiensten [2, 3] entwickelt. Neben diesen Tätigkeiten spielen bei der Unterstützung des zu Pflegenden auch Kommunikation, Überwachung der Vitalfunktion und das Auslösen eines Notfallsignals eine wichtige Rolle [4, 5, 6]. Systeme für Senioren bieten oft auch Unterstützung bei der Mobilität oder bei anstrengenden Bewegungen [7]. Darüber hinaus stehen auch komplett autonome Systeme, welche im Haushalt helfen, im Fokus der Wissenschaft. So sollten Systeme wie zum Beispiel „Care-O-bot" [7] künftig die Möglichkeit bieten bei Haushaltsaufgaben selbstständig zu unterstützen. Die Interaktion mit dem Menschen wird dabei auf verschiedenste Weise gelöst: mittels Sprache [5, 8], Tablet oder Handy [3], oder auch mittels Teleoperator, der den Roboter von extern steuern kann [9].

Im Rahmen des Projektes SMiLE („Servicerobotik für Menschen in Lebenssituationen mit Einschränkungen") entwickeln wir Konzepte und Assistenz-Anwendungen, die Menschen mit Behinderungen, als auch pflegebedürftigen Personen eine effektive Unterstützung im Alltag bieten sollen. Zum Einsatz kommen dabei der humanoide Assistenzroboter Rollin´ Justin und der Rollstuhlassistent EDAN. Die entwickelten Technologien sollen dabei verschiedene Aufgaben wie Hol- und Bringdienste im Haushalt oder im

Pflegeheim leisten können und den Menschen somit ein selbstständigeres Leben ermöglichen.

Die Einbindung von künstlicher Intelligenz und semantischer Planung ermöglicht den Anwendern dabei eine einfache und intuitive Steuerung, zum Beispiel über einen handelsüblichen Tablet-Computer, oder über eine Elektromyographie basierte Schnittstelle. Neben diesen Schnittstellen können die Systeme auch über einen professionellen Teleoperator mittels eines kraftrückgekoppelten Eingabegerätes (HUG [10]) ferngesteuert zu werden. Diese telepräsente Fernsteuerung kann im Notfall eingesetzt werden, um Hilfe zu leisten bis ein Arzt vor Ort eintrifft. Darüber hinaus ermöglicht diese sehr direkte Schnittstelle aber auch die Ausführung von komplexen Tätigkeiten, die bislang nicht autonom von Robotern erledigt werden können, und erlaubt somit einen frühzeitigen effizienten Einsatz der Systeme in der realen Umgebung.

II. Robotersysteme

A. Rollin´ Justin

Der humanoide Heimassistenzroboter Justin besteht aus einem in seiner Struktur am Menschen angelehnten Oberkörper sowie einer radbasierten mobilen Plattform zur Fortbewegung. Mit einem Oberkörpergewicht von ca. 45kg ist Justin als Leichtbauroboter ausgelegt. Stabilität, insbesondere bei dynamischen Bewegungen, erhält das System durch die mobile Plattform, welche mit ca. 150kg alle benötigten Komponenten beherbergt. Neben mehreren (Echtzeit-)Computern beinhaltet dies unter anderem auch einen Blei-Akku, der den kabellosen Betrieb ermöglicht.

Für die feinfühlige Interaktion mit seiner Umwelt wurde der Oberkörper mit Drehmomentsensoren in den Gelenken ausgestattet, sodass Rollin' Justin detektieren und spüren kann, wann er auf welche Art und Weise mit seiner Umgebung in Kontakt tritt. Entsprechend kann er sein Verhalten dann so anpassen, dass er nachgiebig und sicher mit den Menschen und seiner Umgebung interagiert.

Die beiden Leichtbauroboterarme können im statischen Betrieb jeweils ca. 15kg hochheben, bei maximaler Geschwindigkeit noch ca. 7kg. Mit seinen Vierfinger-Händen kann der Heimassistenzroboter bis in Höhen von 2,7m greifen. Um in häuslicher Umgebung einsetzbar zu sein, wurde Justin so ausgelegt, dass er mit einer Breite von unter 90cm durch Standardtüren fahren kann. Die Beine an der mobilen Plattform müssen dann entsprechend eingefahren werden.

Der multisensorielle Kopf des Roboters besitzt ähnliche Sinneseigenschaften wie der des Menschen. Neben Stereokameras zur 3D-Sicht und -Wahrnehmung der Umwelt wurde eine inertiale Messeinheit verbaut, die dem Roboter eine Art Gleichgewichtssinn verleiht, ähnlich dem Gleichgewichtsorgan des Menschen im Innenohr.

Insgesamt stehen dem mobilen Roboter 51 aktuierte Freiheitsgrade zur Verfügung. Diese sind mit den entsprechenden Ansteuer-Schnittstellen in Tabelle 1 zusammengefasst und ermöglichen ein vielseitiges und flexibles Verhalten des Roboters in verschiedensten Situationen und Szenarien.

TABELLE I. Freiheitsgrade des Systems Rollin' Justin

Teilsystem	Freiheitsgrade	Schnittstellen
Torso	3	Drehmoment, Position
Arme	2 mal 7	Drehmoment, Position
Hände	2 mal 12	Drehmoment, Position
Hals	2	Position
Plattform	8	Position, Geschwindigkeit
Gesamt	51	

B. EDAN

Der rollstuhlbasierte Roboter EDAN [11] dient als Assistenzsystem für Menschen mit starken körperlichen Einschränkungen. Basis des Systems ist ein handelsüblicher Elektrorollstuhl, der mit einem DLR-Leichtbauroboter ausgestattet wurde. Zur Interaktion mit der Umwelt ist der Roboterarm mit einer DLR-HIT 5-Finger-Hand ausgestattet.

Zur Umgebungswahrnehmung verfügt EDAN über eine RGBD-Kamera, mit der Objekte lokalisiert und identifiziert werden können und ein auf einer Pan-Tilt-Einheit montiertes Stereokamerapaar, welches als Bildquelle für die Teleoperation dient. EDAN ist als Assistenzsystem für Menschen mit starken körperlichen Einschränkungen konzipiert. Da es diesen Nutzern oftmals nicht möglich ist, einen Joystick zu bedienen, erfolgt die Steuerung mittels Elektromyographie. Dazu wird die noch verbleibende Muskelaktivität an der Hautoberfläche gemessen und mittels Methoden des maschinellen Lernens in Bewegungskommandos für den Roboter umgewandelt [12]. Über diese Schnittstelle kann auch der Rollstuhl gesteuert werden. Diese EMG-basierte Steuerung wird zusätzlich mit teilautonomen Steuerungskonzepten unterstützt, um eine effiziente Interaktion mit der Umwelt zu erlauben.

Zur Berechnung der EMG-basierten Steuersignale, Bildverarbeitung und Teilautonomiefunktionen, verfügt das System über einen integrierten Linux PC. Darüber hinaus ist ein Echtzeitcomputer integriert, auf dem die Berechnung der Regelungsalgorithmen erfolgt. Alle Komponenten werden aus der rollstuhleigenen Batterie mit Strom versorgt, sodass das System für sechs Stunden autark verwendet werden kann.

TABELLE II. Freiheitsgrade des Systems EDAN

Teilsystem	Freiheitsgrade	Schnittstellen
Rollstuhl	2	Geschwindigkeit
Sitz	2	Position
Arm	7	Drehmoment, Position
Hand	15	Drehmoment, Position
Pan-Tilt	2	Position
Gesamt	28	

C. Telepräsenzsystem HUG

Die haptische Eingabestation HUG [13] wird im Projekt SMiLE für die Steuerung des humanoiden Assistenzroboters Justin und des ebenfalls mobilen Roboters EDAN eingesetzt. Der Operator, welcher sich auch entfernt vom Einsatzort der Roboter befinden kann, muss hierbei sowohl die Plattformen telenavigieren, als auch mit den Roboterarmen tele-manipulieren können.

Abb. 2. Das haptitsche bimanuelle Eingabegerät HUG

Die Leichtbau-Roboterarme von HUG verfügen über einen weitreichenden Arbeitsraum, der eine intuitive Steuerung der Roboterarme von Justin und EDAN ermöglicht. Die Bewegungen des Operators werden über die Arme von HUG gemessen, welche dem Bediener wiederum Kräfte und Momente aus der entfernten Umgebung darstellen können. Die Handschuhe messen die Fingerbewegung, welche dann auf den Roboterhänden umgesetzt wird.

Das Head-Mounted-Display stellt dem Operator einen Videostream des Kamerapaars des gesteuerten Roboters zur Verfügung. Ein optisches Trackingsystem mit vier Kameras misst die Bewegung des Kopfes, so dass das Kamerapaar synchron bewegt werden kann.

Die Bewegung der Justin- bzw. EDAN-Plattform erfolgt entweder über einen Joystick, welcher als Endeffektor an einem HUG-Arm integriert werden kann, oder über einen im Stuhl von HUG verbauten 6-Freiheitsgrad-Kraft-Momenten-Sensor.

Eine mehrschichtige Sicherheitsarchitektur (mit redundanten Sensoren, magnetischen Sicherheitskupplungen und intelligenten Sicherheitschecks) erkennt Fehler und schützt vor Unfällen.

III. Steuerkonzepte

Die im SMiLE Projekt eingesetzte Technologie zur intuitiven Steuerung von Assistenzrobotern entspringt langjährigen Erfahrungen aus der Weltraumforschung. Bereits 1993 hat das Robotik und Mechatronik Institut des DLR Untersuchungen zur Fernsteuerung von Raumfahrtrobotern durchgeführt [14] und seitdem kontinuierlich auf diesem Wissen aufgebaut. Die damals gewonnenen Kenntnisse im Bereich der Roboter-Steuerung, Roboter-Regelung und Kommunikation wurden anschließend in den Kontur und Kontur-2 Missionen [15], sowie zuletzt in der METERON SUPVIS Justin Experimentreihe eingesetzt um Roboter mittels intuitiver Eingabemethoden fernzusteuern [16]. Die Widrigkeiten der Raumfahrtanwendung sind dabei ein Gewinn für mögliche terrestrische Anwendungen, da hierdurch ein besonderes Augenmerk auf Robustheit und Intuitivität gesetzt wurde. Im SMiLE Projekt sollen die Steuerungsmodalitäten aus der Raumfahrt nun im Bereich der terrestrischen Assistenzrobotik eingesetzt werden.

Das Autonomiekonzept von Rollin' Justin basiert auf einem objektzentrierten Planungsmechanismus [17,18]. Für jedes zu manipulierende Objekt wird ein Satz sogenannter Action Templates zur Verfügung gestellt. Jedes Action Template besteht aus zwei Abschnitten, die zur Planung der Aufgabenausführung verwendet werden. Ein symbolischer Header beschreibt zunächst Eigenschaften, Voraussetzungen und Auswirkungen einer bestimmten Aktion. Zum anderen wird ein geometrisches Verfahren festgelegt, das darauf ausgelegt ist, die gewünschten Effekte durch die Fähigkeiten des Roboters zu realisieren. Durch die Verkettung mehrerer Action Templates ist der Roboter in der Lage, auch komplexe Aufgaben zu lösen. Im Fehlerfall kann der Roboter die Parameter der einzelnen Action Templates ändern, um eine gegebene Aufgabe mit einer alternativen Aktionsfolge zu lösen, so wie es in Abb. 3 zu sehen ist.

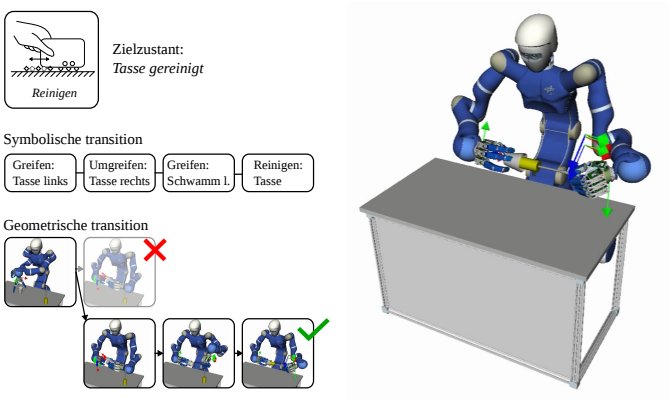

Abb. 3. Interne Simulation des Roboters Rollin' Justin bei der Suche nach möglichen Aktionsfolgen

Die ursprüngliche Tablet-Applikation, die im Rahmen von METERON SUPVIS Justin entwickelt wurde, war speziell auf den Roboter Rollin' Justin zugeschnitten. Um die Tablet-Applikation auch auf anderen Systemen (wie zum Beispiel dem persönlichen Assistenzroboter EDAN) nutzbar zu machen, ist es allerdings notwendig Annahmen bezüglich des robotischen Systems explizit auszuschließen. Dies bedeutet im Einzelnen, dass spezielle Roboterfähigkeiten, wie beispielsweise die Fähigkeit zur Navigation und zur Kamerapositionierung, nur dann angeboten werden, wenn der jeweilige Roboter diese Aktionen zur Verfügung stellt. Die entsprechenden Voraussetzungen dazu werden bei Programmstart zwischen dem Roboter und der Tablet-Applikation verhandelt. Die fertige Applikation ist in Abb. 4 zu sehen.

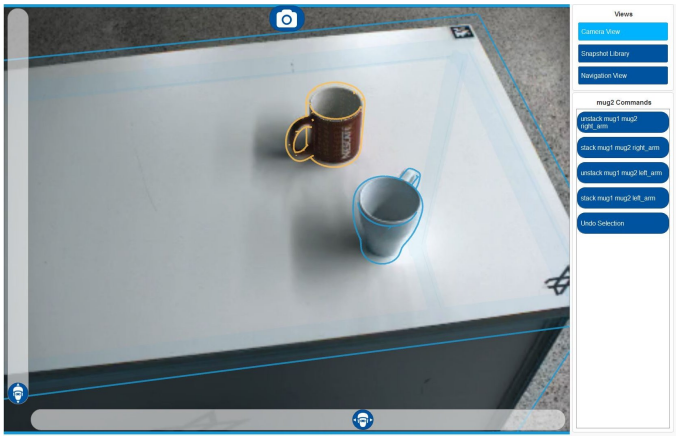

Abb. 4. Kameraperspektive des Roboters in der Tabletanwendung. Die markierten Objekte können durch den Roboter manipuliert werden. Die dazugehörigen Action Templates werden rechts angezeigt.

Die Kommunikations-Infrastruktur ist derart ausgelegt, dass selbst längere Kommunikationsausfälle sowie sehr schlechte Verbindungen kein Problem darstellen. Die gewählte Infrastruktur sieht dabei den Einsatz eines weltweiten Satellitennetzes vor, welches auch in der Pflegetechnik eingesetzt werden könnte und damit völlig neue Möglichkeiten in der 24-Stunden Pflege bietet. Dadurch wird es zum Beispiel möglich, den Roboter von einer weit entfernten Stelle zu steuern. Ein Operator in Japan könnte dabei sein Tagwerk verrichten, indem er den Nachtdienst in einem deutschen Pflegeheim durch den teleoperierten Roboter unterstützt.

Neben der Tablet-basierten Steuerung wird im Projekt SMiLE auch die telepräsente Steuerung heterogener mobiler Robotersysteme entwickelt. Im Konzept des SMiLE-Projekts kann der Teleoperator dabei weit entfernt vom robotischen Assistenten positioniert sein. Deswegen ist eine Zeitverzögerung (T1, T2) im Kommunikationskanal zu berücksichtigen. Eine Zeitverzögerung weist ein aktives Verhalten auf und kann deswegen zur Instabilität des haptischen Regelkreises führen [19]. Deswegen wurde im Regelkreis der sogenannte Time Domain Passivity Approach implementiert [20], welcher nachweislich [21] stabile Telemanipulation bis zu 600ms Verzögerung im Regelkreis trotz Paketverlust, variabler Verzögerung und Jittering garantiert. Mithilfe der Netzwerkdarstellung kann der Energiefluss im Regelkreis und somit die Energiegenerierung der Zeitverzögerung (Time Delay Power Networks, TDPN) analysiert werden. Sogenannte Passivity Controller (PC) dissipieren dann den erzeugten Energiebetrag und stellen somit die Stabilität des Regelkreises trotz Zeitverzögerung sicher.

Der Signalfluss der Kopplung von HUG (Master) mit den Roboterarmen von Rollin' Justin bzw. EDAN (Slave) ist in Abb. 5 visualisiert. Die Geschwindigkeit und Position von HUG wird über den Kommunikationskanal mit Zeitverzögerung T1 zu dem Slave-Roboter übertragen. Ein PI-Regler auf dessen Seite errechnet eine Kraft FPI, welche eine Positionsabweichung der Roboter kompensiert. Diese Kraft wird auch zu HUG geschickt. Zudem wird die Interaktionskraft FH von Operator und HUG an den Slave geschickt, so dass der Slave Manipulator schneller auf die Vorgaben des Operators reagiert.

Die Vierkanal-Architektur, in welcher neben der berechneten Kraft auch die am Manipulator und Eingabegerät gemessenen Interaktionskräfte ausgetauscht werden, verspricht die höchste Transparenz in der Telemanipulation. Da sowohl EDAN als auch Rollin' Justin keine Kraftsensoren am Endeffektor aufweisen, wurde diese Architektur für das Projekt SMiLE auf drei Kanäle reduziert.

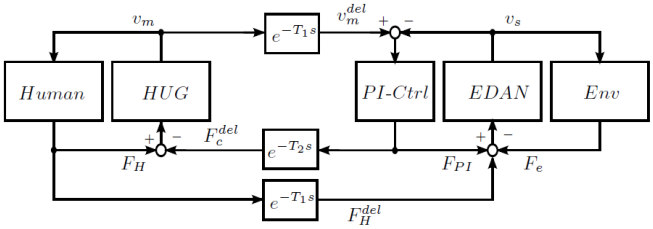

Abb. 5. Signalflussdiagramm einer Dreikanal-Architektur

Die Steuerung der mobilen Plattform wird getrennt von der Steuerung der Manipulatoren durchgeführt und erfolgt in einem offenen Regelkreis mit Geschwindigkeitsvorgabe ohne Kraftrückführung. Die Geschwindigkeitsvorgabe der longitudinalen Geschwindigkeit v_x und der Rotationsgeschwindigkeit Ψ wird durch die Multiplikation der normierten Eingabewerte und den für den jeweiligen Geschwindigkeitsmodus gewählten Maximalwerten ($v_{x,max} = 0.6m/s$ und $\dot{\Psi}_{max} = 0.6rad/s$) errechnet.

IV. Exemplarische Anwendungen

Ziel des Projektes SMiLE ist es, eine technologische Basis für den Einsatz der Systeme Rollin' Justin, EDAN und HUG im Kontext der Pflege zu schaffen. Dazu wird das Portfolio an Action Templates maßgeblich erweitert um im Speziellen die Anforderungen der häuslichen Pflege zu erfüllen. Notwendige Roboterkommandos sind dabei das Öffnen von Schubladen und Türen, sowie das Holen und Bringen von Gegenständen (wie zum Beispiel einem Medikament). Die Tablet-Applikation soll entsprechende Aktionen parametrisierbar zur Verfügung stellen und somit dem Nutzer weitere Entscheidungsfreiheit bieten.

Die telepräsente Fernsteuerung der Robotersysteme soll dazu beitragen, Robotersysteme frühzeitig in einer realen Umgebung einsetzten zu können. Im Regelfall sollen die Systeme über die intuitiven Schnittstellen, wie Tablet-App, Sprachbefehle, oder im Falle von EDAN über ein EMG-basiertes Interface, bedient werden. Dieser Einsatz erfordert einen hohen Grad an autonomen Fähigkeiten der Robotersysteme und ist nach heutigem Stand der Technik noch nicht wirtschaftlich möglich. Hier kann die telepräsente Fernsteuerung eingesetzt werden um im Störungsfall die weitere Ausführung durch den Roboter zu übernehmen. Darüber hinaus bietet die Teleoperation die Möglichkeit, die notwendigen Fähigkeiten der Roboter gezielt gemeinsam mit den Nutzern zu ermitteln. Unser Ziel ist es, im Anschluss an das SMiLE Projekt, mit einem telepräsent gesteuerten Roboter den Einsatz in einem Pflegeheim zu testen. Dabei sollen sowohl Pflegekräfte als auch zu Pflegende den Roboter kommandieren und ein Teleoperator wird die entsprechenden Tätigkeiten ausführen. Über dieses „telepräsente Rollenspiel“ lassen sich notwendige Fähigkeiten

im realen Einsatz ermitteln. Darüber hinaus kann das Wissen, dass der Roboter nicht autonom agiert, sondern von einem Menschen ferngesteuert wird, helfen die Akzeptanz und Eingewöhnung im Umgang mit diesen Systemen zu erhöhen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie.

LITERATUR

[1] http://www.riken.jp/en/pr/press/2015/20150223_2/ RIKEN Global Relations and Research Coordination Office, *press release*, 03.05.2018

[2] Severinson-Eklundh, K., Green, A., & Hüttenrauch, H. (2003). Social and collaborative aspects of interaction with a service robot. *Robotics and Autonomous systems*, *42*(3-4), 223-234.

[3] Körtner, T., Schmid, A., Batko-Klein, D., & Gisinger, C. (2014, June). Meeting requirements of older users? Robot prototype trials in a home-like environment. In *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction* (pp. 660-671). Springer, Cham.

[4] https://www.aal.fraunhofer.de/de/projekte/mobina.html Fraunhofer-Allianz Ambient Assisted Living AAL, 03.05.3018

[5] Schroeter, C., Mueller, S., Volkhardt, M., Einhorn, E., Huijnen, C., van den Heuvel, H., ... & Gross, H. M. (2013, May). Realization and user evaluation of a companion robot for people with mild cognitive impairments. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 1153-1159). IEEE.

[6] http://www.aal-europe.eu/projects/alias/ ACTIVE AND ASSISTED LIVING PROGRAMME 03.05.2018

[7] ASSISTENZROBOTER ZUR ALLTAGS- UND HAUSHALTS-UNTERSTÜTZUNG, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 04.2016/09.2016

[8] http://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/family_2.html Toyota-Global, 03.05.2018

[9] https://www.toyota.de/news/toyota-dritte-toboter-generation.json Toyota, 03.05.2018

[10] Panzirsch, M., Weber, B., Rubio, L., Coloma, S., Ferre, M., & Artigas, J. (2017, June). Tele-healthcare with humanoid robots: A user study on the evaluation of force feedback effects. In *World Haptics Conference (WHC), 2017 IEEE* (pp. 245-250). IEEE.

[11] Hagengruber, A., Leidner, D., & Vogel, J. (2017, March). EDAN: EMG-controlled Daily Assistant. In *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 409-409). ACM.

[12] Vogel, J., Bayer, J., & Van Der Smagt, P. (2013, November). Continuous robot control using surface electromyography of atrophic muscles. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 845-850). IEEE.

[13] Hulin, T., Hertkorn, K., Kremer, P., Schätzle, S., Artigas, J., Sagardia, M., ... & Preusche, C. (2011, May). The DLR bimanual haptic device with optimized workspace. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 3441-3442). IEEE.

[14] Hirzinger, G., Brunner, B., Dietrich, J., & Heindl, J. (1994, May). ROTEX-the first remotely controlled robot in space. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on* (pp. 2604-2611). IEEE.

[15] Artigas, J., Balachandran, R., Riecke, C., Stelzer, M., Weber, B., Ryu, J. H., & Albu-Schaeffer, A. (2016, May). Kontur-2: force-feedback teleoperation from the international space station. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 1166-1173). IEEE.

[16] Lii, N. Y., Leidner, D., Birkenkampf, P., Pleintinger, B., Bayer, R., & Krueger, T. (2017). Toward Scalable Intuitive Telecommand of Robots for Space Deployment with METERON SUPVIS Justin. In *14th Symposium on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA)*.

[17] Leidner, D., Borst, C., & Hirzinger, G. (2012, November). Things are made for what they are: Solving manipulation tasks by using functional object classes. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on* (pp. 429-435). IEEE.

[18] Leidner, D., Dietrich, A., Beetz, M., & Albu-Schäffer, A. (2016). Knowledge-enabled parameterization of whole-body control strategies for compliant service robots. *Autonomous Robots*, *40*(3), 519-536.

[19] Anderson, R. J., & Spong, M. W. (1989). Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transactions on Automatic control*, *34*(5), 494-501.

[20] Ryu, J. H., Kwon, D. S., & Hannaford, B. (2004). Stable teleoperation with time-domain passivity control. *IEEE Transactions on robotics and automation*, *20*(2), 365-373.

[21] Artigas, J., Balachandran, R., De Stefano, M., Panzirsch, M., Lampariello, R., Albu-Schaeffer, A., ... & Letschnik, J. (2016, March). Teleoperation for on-orbit servicing missions through the ASTRA geostationary satellite. In *Aerospace Conference, 2016 IEEE* (pp. 1-12). IEEE.