

Assistenzroboter für eine Steigerung der Mobilität im Alter

KATJA MOMBAUR, DAVIDE CORRADI, KHAI-LONG HO-HOANG &
ALEXANDER SCHUBERT

Optimierung, Robotik und Biomechanik
Institut für Technische Informatik
Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Intelligente Assistenzsysteme können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Lebensqualität von Menschen im Alter zu erhalten bzw. zu steigern. Insbesondere vor dem Hintergrund der demographischen Entwicklung ist es notwendig, geeignete technische Assistenzsysteme auch für die Gruppe der älteren und alten Menschen zu entwickeln und nutzbar zu machen. Einen Schwerpunkt bilden dabei Mobilitätsassistenzzroboter, die die Mobilität von älteren und alten Menschen wieder herstellen oder zumindest ihren Verlust verlangsamen können. Assistenzroboter, die auf die speziellen Bedürfnisse der älteren Bevölkerung zugeschnitten sind, befinden sich derzeit noch in der Forschungs- bzw. Prototypphase. Dieser Beitrag beschreibt die Anforderungen an und Möglichkeiten von Mobilitätsassistenzzrobotern und stellt den aktuellen Forschungsstand dar. Insbesondere zeigen wir zwei aktuelle, im Rahmen des EU-Projektes MOBOT unter unserer Beteiligung entwickelte Prototypen. Außerdem beschreiben wir die in Heidelberg verwendete Methodik zur Entwicklung von Mobilitätsassistenzzrobotern auf der Basis von modell-basierter Optimierung.

1 Einleitung

Eine der großen Herausforderungen unserer Zeit ist es, die Lebensqualität älterer und alter Menschen in einer zunehmend alternden Bevölkerung sicherzustellen. Ein wichtiges Ziel ist es dabei, die Mobilität der Menschen bis ins hohe Alter zu erhalten und damit die Unabhängigkeit und Lebensqualität alter Menschen zu stärken.

Mobilitätshilfen, welche heute in der Praxis eingesetzt werden, um beispielsweise ältere Menschen beim Gehen oder Aufstehen aus dem Sitzen zu unterstützen, sind in der Regel denkbar simpel und nutzen keine moderne Technologie. Übliche Geräte sind etwa Rollatoren, Gehstöcke und -gestelle oder entsprechend angebrachte Haltegriffe. Diese bieten keine aktive Unterstützung von Bewegungen, sondern sind vollkommen passiv. Auch die Anpassung an die einzelnen Nutzer besteht im besten Fall aus einer Skalierung in Größe oder Einbauhöhe. Neue Ansätze aus der Robotik versprechen hier eine Besserung. Intelligente Mobilitätshilfen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Dies bedeutet, dass die Systeme mit viel Sensorik ausgestattet sind, um Zustand, Absichten und Umgebung der Nutzer zu erfassen und Interfaces bieten, durch die sie mit den Nutzern kommunizieren können. Was die Funktion angeht, sind robotische Assistenzsysteme anders als rein passive Stützen auch in der Lage, die Bewegungen der Nutzer aktiv zu unterstützen, indem sie sich durch integrierte Motoren mit dem Nutzer mitbewegen und diesem durch die Bereitstellung von Kräften bei der Ausführung der beabsichtigten Bewegung behilflich sind.

Moderne Technologie kann ältere und alte Menschen grundsätzlich auf vielfältige Weise unterstützen. Spezielle Unterstützung im Bezug auf Mobilität bieten hier innerhalb der Gruppe der Rehabilitations- und Pflegeroboter die Assistenzroboter, also die Klasse von Robotern, die außerhalb der Therapie im Alltag eingesetzt werden und den Menschen in vielfältigen Situationen unterstützen. Dabei ist in diesem Kontext die individuelle Mobilität eines Menschen gemeint, also die Fähigkeit, den eigenen Körper zu nutzen, um sich auf verschiedenen Skalen – etwa in der eigenen Wohnung oder deren Umkreis – fortzubewegen sowie eigenständig den Wechsel zwischen verschiedenen Körperposen (Stehen, Sitzen, Liegen) durchführen zu können.

Zu den Mobilitätsassistenzrobotern zählen zum einen mobile Systeme, die als externe passive oder motorisierte Gehhilfen häufig in der Form eines Rollators ausgelegt sind und Menschen mit eingeschränkter Mobilität dabei unterstützen, sich stabil fortzubewegen und das Sturzrisiko zu minimieren. Zum anderen kann

Mobilitätsunterstützung auch durch Exoskelette und Orthesen – beides „Assistenzsysteme zum Anziehen“ – geleistet werden.



Abbildung 1: Ausschnitt aus der Frailty-Skala zur Klassifikation der Bewegungsfähigkeiten älterer und alter Menschen gemäß [Rockwood2005] und [FrailtyScale2007]. Zeichnungen: L. Mombaur.

Entsprechende Systeme werden derzeit noch hauptsächlich im klinischen bzw. therapeutischen Bereich und auf Frailty Leveln ab Stufe 5 eingesetzt. Frailty Level sind hierbei ein Maß für die verbleibende Mobilität eines einzelnen Nutzers (vgl. Abbildung 1). Langfristig soll sich die Assistenzrobotik aber aus dem geschützten klinischen ins unkontrollierbarere private Umfeld ausweiten und auch schon für Menschen mit nur leichten Mobilitätseinschränkungen (ab Frailty Level 3) nutzbar gemacht werden. Hierzu muss sichergestellt sein, dass die direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter auch im Alltag selbstverständlich wird, der Nutzer also der Sicherheit und Zuverlässigkeit sowohl der Technologie als auch den den Funktionalitäten zugrundeliegenden Algorithmen ein ausreichendes Maß an Vertrauen entgegenbringt.

Neben der technologischen Forschung müssen daher auch psychologische Veränderungen im (hohen) Alter – etwa Veränderungen bei Entscheidungsfindungsprozessen oder der Selbstwahrnehmung – im Hinblick auf ihre Rolle für die individuelle Mobilität älterer Menschen sowie auf ihre Rolle bei der Akzeptanz und Nutzung digitaler Assistenz- und Trainingssysteme untersucht werden. Um das genannte Ziel zu erreichen, digitale Technologie und Assistenzsysteme für ältere und alte Menschen im Alltag nutzbar zu machen, ist es notwendig, auch die auftretenden psychologischen, pflegerischen, ethischen und rechtlichen Aspekte bereits in der technischen Entwicklungsphase zu berücksichtigen.

2 Beeinträchtigungen der Mobilität im Alter

Im Alter können verschiedene Beeinträchtigungen körperlicher, kognitiver und psychischer Natur auftreten, die zu einer Reduktion der Mobilität beitragen. Die

körperlichen Beeinträchtigungen werden durch Brüche nach Unfällen, durch Krankheiten wie Arthrose oder Arthritis und durch Muskelschwund (z. B. nach Verletzungen oder Lähmungen) verursacht und führen zu einer zum Teil deutlichen Reduktion der Kräfte, die für die Bewegung aufgebracht werden können. Andere körperliche Probleme werden durch den Abbau der Sensorik verursacht – z. B. einer Reduktion des Sehvermögens oder des Hörvermögens, die wegen der fehlenden Wahrnehmung oder eines erhöhten Unsicherheitsgefühls zur einer direkten oder indirekten Beeinträchtigung des Bewegungsvermögens führen. Auch die Propriozeption (also Fähigkeit der Wahrnehmung der Lage und Bewegungen der einzelnen Körperteile im Raum) und die Regelschleifen für die Bewegungsregelung im Körper laufen im Alter verzögert ab, die Fähigkeit der Koordination der einzelnen Segmente nimmt ab. Zusätzlich können z. B. Herz-Kreislaufkrankungen oder Lungenerkrankungen zu einer reduzierten körperlichen Leistungsfähigkeit führen.

All diese körperlichen Probleme reduzieren zum einen die Bewegungsmöglichkeiten, d.h. je nach Grad der Beeinträchtigungen können manche alltäglichen Bewegungen nur noch deutlich langsamer oder weniger kraftvoll ausgeführt werden als vorher, andere wiederum sind aufgrund der höheren notwendigen Kräfte gar nicht mehr eigenständig möglich. Zum anderen steigt auch das Sturzrisiko, da die Reaktionszeiten erhöht sind und die für Abfangbewegungen im Vergleich zur Nominalbewegung notwendigen höheren Kräfte nicht mehr erzeugt werden können. Durch diese direkten Probleme reduziert sich häufig auch die generelle Motivation zur Bewegung, was die Patienten unweigerlich in einen Teufelskreis treibt, da infolge der reduzierten Bewegungen die koordinativen Fähigkeiten weiter abnehmen. Geringere Bewegung erhöht außerdem das Risiko weiterer Erkrankungen, z. B. von Herzinfarkten und Schlaganfällen. Um diese körperlichen Beeinträchtigungen zu kompensieren, ist eine physische Bewegungsunterstützung notwendig, die den Patienten durch Einwirkung äußerer Kräfte entlastet, seine Bewegungen stabilisiert und Stürze verhindert.

Kognitive Beeinträchtigungen (z. B. durch Demenz oder Schädigungen des Gehirns durch Tumore, Unfälle etc.) können zu einer fehlenden oder reduzierten Orientierungsfähigkeit bei der Bewegung oder zu Vergesslichkeit bis zum Gedächtnisverlust führen. In diesem Fall benötigen die Patienten eine entsprechende kognitive Unterstützung – bei der Navigation zum gewünschten Ziel in bekannten und unbekanntem Umgebungen durch die Ermittlung des besten Weges, aber auch zur Erinnerung an die gewünschten Ziele oder an Besonderheiten oder Gefahren auf dem Weg. Kognitive Beeinträchtigungen führen häufig auch zu größeren Sta-

bilitätsproblemen und einem erhöhten Sturzrisiko, nicht nur durch die damit eng verbundenen körperlichen Probleme, sondern auch durch eine falsche Einschätzung von Umgebungssituationen, Bewegungen und den eigenen Möglichkeiten.

Als dritte Gruppe sind psychologische Beeinträchtigungen zu nennen, z. B. durch große Angst nach einem Sturz. Um ein nochmaliges Stürzen zu vermeiden oder aus mangelndem Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten, schränken Patienten ihre Bewegungen weiter ein oder führen sie in einer verkrampften und unnatürlichen Weise aus. Beispielsweise beobachtet man hier häufig extrem langsame, breitbeinige oder gebeugte Bewegungen. Auch dies führt wiederum zu einer Verstärkung des Teufelskreises, die die Mobilität und Eigenständigkeit immer weiter sinken lässt, sofern der Patient keine psychologische Unterstützung erfährt.

3 Möglichkeiten der Mobilitätsassistenz

Prinzipiell gibt es verschiedene Möglichkeiten, die oben beschriebenen Mobilitätsdefizite zu adressieren und Unterstützung zur Kompensation der verschiedenen Beeinträchtigungen bereitzustellen. In diesem Abschnitt diskutieren wir die Optionen der personellen Unterstützung und die der Unterstützung durch entsprechende Geräte oder technische Hilfsmittel.

Die heute bei weitem effektivste Variante besteht in der personellen Mobilitätsunterstützung des Patienten entweder durch qualifiziertes Pflegepersonal oder durch nicht ausgebildete Pflegekräfte und Angehörige. Hierbei ist zum Unterstützungszeitpunkt mindestens eine unterstützende Person pro Patient notwendig, bei sehr schweren Mobilitätsaufgaben – wie z. B. einen sehr schweren Patienten aus dem Bett zu heben oder bei bereits sehr stark ausgeprägten Mobilitätsdefiziten – ggf. auch zwei Helfer pro Patient. Ausgebildete Pflegekräfte können Mobilitätsassistenz bei allen oben genannten Beeinträchtigungen – physischer, kognitiver und psychologischer Natur – bieten. Sie sind in der Lage, Bewegungen sehr flexibel und unter variablen Bedingungen, auch in schwieriger Umgebung unterstützen, wie z. B. beim Treppensteigen, bei Waldspaziergängen, in Menschenmengen etc. Dank ihrer Erfahrung können sie gefährliche Situationen meistens vermeiden oder das Risiko von Stürzen stark reduzieren. Aufgrund des Pflegekräftemangels und des hohen notwendigen Betreuungsschlüssels ist es allerdings nicht möglich, allen Patienten mit Mobilitätsdefiziten im Alter eine personelle Mobilitätsassistenz durch qualifizierte Pflegekräfte zu bieten. Auch wären die mit einer flächendeckenden Einzelbetreuung verbundenen Kosten weder für die Gesellschaft noch für die Einzelpersonen tragbar. Professionelle Pflegekräfte haben selbstverständlich

auch eine Reihe weiterer Aufgaben wie Körperpflege, Ernährung, usw., welche nicht direkt mit der Mobilitätsunterstützung zu tun haben, und die sie auf der Prioritätenliste weiter oben einsortieren würden. Ein häufiges Problem besteht zusätzlich darin, dass die Mobilitätsunterstützung von Patienten durch die hohen aufzubringenden Kräfte eine große physische Belastung für die Pfleger darstellt, durch die sie selbst gesundheitlichen Schaden nehmen können.

Nichtprofessionelle Pflegekräfte können ebenfalls jede Art der Mobilitätsunterstützung bieten, aber da die entsprechende Ausbildung fehlt, ist die physische Unterstützung in der Regel weniger gut und das Risiko von Gefahrensituationen größer; die physische Belastung für die Pfleger selbst steigt aufgrund ihres nicht optimalen Verhaltens an. Auch für nichtprofessionelle Pfleger ist die zeitliche und finanzielle Belastung durch diese Aufgabe enorm, und in der Regel kommen andere Aufgaben dafür zu kurz. Im Falle einer Pflege durch Angehörige ist der Kontakt persönlicher und die psychologische Unterstützung stärker. Gleichzeitig kann es aber generell bei jeder Form der Unterstützung durch Pflegepersonen auch zu psychologischen Problemen aufgrund des offensichtlichen Abhängigkeitsverhältnisses kommen.

Dem gegenüber steht die Mobilitätsunterstützung durch technische Geräte oder Hilfsmittel. Trotz des technischen Fortschritts in vielen anderen Gebieten sind die aktuell für Patienten kommerziell verfügbaren Hilfsmittel zur Mobilitätsunterstützung noch extrem simpel. Sie reichen von Krücken und Gehstöcken über Gehgestelle bis zu Rollatoren, sind starr und passiv und können kaum als technisch bezeichnet werden. Technische Geräte gibt es nur für Patienten mit sehr starken Mobilitätsdefiziten in Form von Elektro-Rollstühlen verschiedenster Bauform und Bedienbarkeit, die aber nicht Gegenstand dieses Kapitels sind.

Die oben genannten passiven Geräte bieten eine rein physische Mobilitätsunterstützung dadurch, dass die Last, die sonst in der Regel ausschließlich von den Beinen getragen werden muss, nun auch zum Teil über die Arme aufgenommen werden kann. Die statische Stabilität des Patienten wird erhöht, da die Geräte ihm als drittes, viertes etc. Bein dienen und damit die unterstützte Fläche vergrößert wird. Hierbei ist aber zu beachten, dass diese Stabilisierung nur bei sehr langsamen Bewegungen funktioniert und die Patienten damit auf diese langsame Fortbewegungsart reduziert sind. Die Benutzung dieser Geräte setzt voraus, dass der Patient über ein Mindestmaß an Kraft in den Armen und Beinen und eine ausreichende Koordinationsfähigkeit verfügt, um den Rollator zu schieben und zu navigieren, das Gehgestell heben zu können etc. Diese Geräte sind damit nur

für Patienten mit nicht allzu großen Mobilitätsdefiziten geeignet; bei größeren Problemen bieten aktuell Rollstühle die einzige Lösung.

Ein großer Nachteil besteht darin, dass derartige Geräte nicht in allen Umgebungen verwendet werden können: Steigungen können nur sehr schwer und Treppen unmöglich mit Rollatoren und Gehgestellen passiert werden; auch Engstellen bereiten Probleme. Durch die Handhabung des Gerätes entstehen zusätzliche Gefahren: nach Ende der Nutzung bleibt es entweder im Weg stehen, der Patient kann beim Wegräumen fallen oder es entstehen Gefahren durch falsche Nutzung, z. B. beim Aufstehen mit Rollator ohne angezogene Bremse. Aufstehbewegungen sind generell sowohl mit Rollator als auch mit Gestell sehr anstrengend und erfordern aufgrund der Passivität des Geräts enorm große Kräfte in den Armen. Viele Patienten benötigen zusätzlich zu Rollatoren und Gehgestellen für die Fortbewegung auch eine gleichzeitige personelle Unterstützung zur Erhöhung der Sicherheit oder als zusätzliche Kraftquelle. Insgesamt ist eine Unterstützung der menschlichen Pfleger durch diese Geräte nur eingeschränkt gegeben.

Viele der genannten Defizite der simplen Geräte könnten durch fortschrittliche technische Geräte zur Mobilitätsunterstützung, also Mobilitätsassistenzroboter, adressiert werden. Wünschenswert wäre zum einen eine höhere physische Unterstützung, die dadurch erreicht werden kann, dass die Geräte sich adaptiv auf die aktuelle Situation und Umgebung einstellen und ihre Form verändern und aktiv die geeigneten Kräfte erzeugen können und so auch die Sicherheit des Patienten erhöhen. Außerdem sollten sie zusätzlich eine kognitive Unterstützung mit Orientierungs-, Navigations- und Erinnerungsfunktionalitäten bieten. Durch diese Funktionalitäten könnte eine deutlich größere Unterstützung und Entlastung der menschlichen Pfleger erreicht werden, und es könnten Patienten unabhängig mit den Geräten zurechtkommen, die bisher auf menschliche Mobilitätsunterstützung angewiesen waren.

4 Anforderungen an technische Mobilitätsassistenzsysteme

In diesem Abschnitt fassen wir die wichtigsten Funktionalitäten zusammen, die technisch fortgeschrittene Mobilitätsassistenzroboter im Idealfall unterstützen sollten und formulieren einige allgemeine Anforderungen für aktuelle und zukünftige Geräte dieser Art. Hierbei ist zu beachten, dass Multifunktionsgeräte zwar wünschenswert wären, dass aber nicht jedes Assistenzsystem alle diese Funktionalitäten bereitstellen muss, sondern dass es in der Praxis verschiedene Geräte für spezielle Einsatzbereiche und Patientengruppen geben wird, die jeweils einen Teil

der Funktionalitäten umfassen. Verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus eines solchen technischen Assistenzsystems werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Das allgemeine Ziel aller Mobilitätsassistenzroboter ist es,

- a) den Bewegungsapparat des Patienten zu entlasten, d.h. die notwendigen Kräfte für eine Bewegung zu reduzieren, extreme Gelenkstellungen zu vermeiden und damit die Ermüdung zu reduzieren, und
- b) die Stabilität der Bewegungen zu erhöhen und damit Stürze zu verhindern oder zumindest das Sturzrisiko stark zu verringern.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollten sie die Bewegungen des Patienten in einer möglichst natürlichen und für die Patienten voraussagbaren Weise unterstützen. Gleichzeitig sollten ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigt werden, d.h. die Unterstützung sollte den Patienten dazu bringen, ergonomisch sinnvolle Haltungen einzunehmen und nicht etwa schädliche Haltungen aufzwingen. Die Bewegungen des Roboters sollten nicht ruckartig sein oder zu einem Rutschen auf dem Boden führen. Die Sicherheit des Patienten muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein, d.h. der Roboter sollte in der Lage sein, Kollisionen mit dem Patienten oder Einklemmen zu vermeiden und möglichst weiche oder nachgiebige Kontaktflächen haben. Außerdem sollten die Roboter leicht zu bedienen sein und intuitive Kommunikationsschnittstellen verschiedener Art aufweisen.

Im Fokus dieses Kapitels steht die Mobilitätsassistenz, also die Unterstützung von Patienten bei der alltäglichen Fortbewegung. In diesem Kontext sollten die Assistenzroboter in der Lage sein, folgende Bewegungen zu unterstützen:

- Gehbewegungen: Eine der wichtigsten Bewegungsformen im Alltag, die für ältere Menschen auf Dauer aber häufig ermüdend ist und ein großes Sturzrisiko bietet, vor allem in unbekanntem oder schwierigem Gelände. Das technische System sollte den Patienten im Idealfall bei Gehen auch auf schwierigem Untergrund und in engen Räumen mit vielen Hindernissen unterstützen und leicht und ohne große Kraft zu manövrieren sein. Hierbei sollten die Geräte in der Lage sein, die üblichen Umgebungsbedingungen, in denen sich der Patient im Innen- und Außenraum bewegen will, zu erfassen und angemessen zu reagieren.
- Aufstehen aus dem Sitzen und Liegen: Diese Klasse von Bewegung ist sehr anspruchsvoll, auch für ältere Menschen, die z. B. das Gehen noch relativ gut beherrschen, da sehr hohe Kräfte notwendig sind, um den Positionswechsel zu ermöglichen. Eine sichere Unterstützung bei der Überführung

von verschiedensten Ausgangspositionen in einen stabilen Stand sollte gewährleistet sein.

- **Hinsetzen und Hinlegen:** Diese Bewegungsformen sind zwar in Bezug auf die notwendigen Kräfte weniger anspruchsvoll als Aufstehen, aber auch hier besteht ein hohes Sturzrisiko, und Patienten brauchen eine ausreichende Führung, um den gewünschten Sitz- oder Liegeplatz auch ohne visuelle Informationen richtig zu treffen.
- **Stabiles Stehen auf der Stelle:** Häufig ist es notwendig, die Person in die richtige oder eine besonders stabile Position zu bringen, damit sie gewisse Tätigkeiten (beispielsweise solche, für die beide Hände notwendig sind) ausführen kann.
- **Manipulation:** Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Funktionalitäten der reinen Mobilitätsunterstützung bei der Fortbewegung können Assistenzsysteme auch Unterstützung bei der Manipulation, also beim Greifen und Handhaben von Objekten bieten, i.d.R. auf Kommando des Benutzers. Dazu ist ein separater Roboterarm notwendig, wie weiter unten ausgeführt. Selbstverständlich sind hier auch die verschiedensten Spezialsysteme zur Unterstützung der einzelnen Tätigkeiten des täglichen Lebens – wie Essen, Waschen, Rasieren, etc. – denkbar, die jedoch nicht Gegenstand dieses Kapitels sind.

Das Ausführen all dieser Bewegungen zur Mobilitätsunterstützung ist auf unterschiedlichen Stufen der Automatisierung möglich – im Wesentlichen durch den Nutzer kontrolliert, auf Kommando des Nutzers gestartet und dann einem automatischen Ablauf folgend, oder vollständig automatisch gestartet durch Interpretation des Nutzerzustandes und der Nutzerintentionen durch das Gerät. Es gibt verschiedene Varianten der Führung (z. B. bei der Gehfunktionalität Definition des Pfades und / oder des Geschwindigkeitsprofils) durch den Benutzer oder durch den Roboter.

Im nicht-benutzergesteuerten Fall muss der Roboter die Fähigkeit haben, Hindernisse und andere Eigenschaften der Umgebung (wie z. B. den Untergrund) automatisch zu erkennen, Hindernissen auszuweichen und auch ansonsten den Pfad geeignet zu wählen. Im benutzergelenkten Fall sollte der Roboter eine Warnfunktion haben, um den Benutzer vor Hindernissen oder anderen Problemen wie Absätzen oder Treppenstufen zu warnen.

In allen Fällen muss der Roboter stark genug sein, um die geforderte Unterstützung liefern zu können, darf aber gleichzeitig niemals den Benutzer verletzen. In Bezug auf das Unterstützungslevel ist es wichtig hervorzuheben, dass diese sich je nach Gerätetyp, Einsatzbereich und konkreter Zielgruppe unterscheiden wird, und dass in den meisten Fällen keine 100%ige Unterstützung angestrebt werden wird. Die Roboter werden also in der Regel nicht das ganze Gewicht des Patienten tragen können, da dies im allgemeinen Fall nur mit einem sehr stabilen und ausladenden Krangestell machbar ist, das wiederum eine Reihe der oben genannten Funktionalitäten nicht erfüllen kann. Je nach Nutzerkreis und Frailty Level wird hier für die Geräte ein geeigneter Kompromiss zwischen Tragkraft bzw. Unterstützungslevel auf der einen Seite und Leichtigkeit und Manövrierbarkeit auf der anderen Seite angestrebt.

Wie im nächsten Abschnitt dargestellt wird, gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Kontakt zwischen Nutzer und Gerät herzustellen, bei denen sich entweder der Nutzer oder das Gerät in der aktiven Rolle befindet. Auch diese Wahl hängt von der konkreten Zielgruppe ab.

Bei der Manipulationsunterstützung muss der Roboter ein angegebenes Objekt erkennen, es auf die richtige Weise greifen, ohne es zu beschädigen und es ggf. dem Benutzer übergeben, ohne diesen zu verletzen. Alle Geräte sollten über einen Notfallstop verfügen, der entweder vom Benutzer oder jemand anderen im Notfall betätigt werden kann. Außerdem sollte der Roboter in der Lage sein, folgende Aktionen ohne direkten Kontakt zum Benutzer auszuführen:

- sich selbst zu parken, wenn der Benutzer ihn nicht mehr braucht;
- zum Benutzer zu kommen, wenn er herbeigerufen wird;
- dem Benutzer in kleinem Abstand zu folgen (damit der Benutzer ihn bei Bedarf nutzen kann, wenn er ihn noch nicht permanent braucht).

Hierzu ist irgendeine Art von Fernsteuerung – durch Audio- oder Gestensteuerung oder durch eine Fernbedienung – notwendig.

Während die primäre Funktionalität der hier beschriebenen Geräte die der physischen Bewegungsunterstützung ist, könnten weitere sinnvolle Funktionalitäten auf einem solchen Gerät, das sich immer in der Nähe des Patienten befindet, implementiert werden:

- Navigationsunterstützung, falls der Benutzer desorientiert ist oder sich an einer Stelle nicht auskennt. Die Navigation kann aufgrund genannter Ziele

und gegebener oder selbst erstellter Karten der Umgebung erfolgen und erfordert die Bestimmung des optimalen Weges bzw. eines möglichst guten Weges von aktueller Position zur Zielposition. Das Gerät sollte dabei in der Lage sein, plötzliche Änderungen zu verarbeiten – z. B. durch Planänderungen des Benutzer oder der äußeren Gegebenheiten;

- Erinnerungsfunktionalität, um den Benutzer an wichtige Termine, Medikamente, Messungen, und andere Aktivitäten zu erinnern. Der Roboter müsste idealerweise auch überwachen, ob der Benutzer den Aufforderungen nachgekommen ist, um andernfalls nochmal zu erinnern oder jemanden zu benachrichtigen;
- Kommunikation mit dem Benutzer und mit den menschlichen Pflegern;
- Alarmfunktion und Überwachung der lebenswichtigen Funktionen des Patienten, Kontaktaufnahme und Kommunikation mit ausgebildeten Pflegern über Wifi/Internet, wenn Benutzer z. B. gestürzt ist oder andere Anomalien in seiner Verhaltensweise erkannt werden;
- Integration des Gerätes in das Internet of Things (IoT), um Kommunikation mit anderen Geräten zu erlauben (z. B. mit Kühlschrank, um Vorrat zu überwachen und bei Einkaufsplanung zu unterstützen), außerdem Kommunikation mit weiteren Sensoren oder in der Umgebung oder mit externen Informationsquellen, um Lokalisations- und Navigationsfähigkeiten zu verbessern, weiteres Wissen zu gewinnen etc.

Je nach Anwendungszweck wird auf den derzeitigen (prototypischen) Mobilitätsassistenzplattformen eine Auswahl der beschriebenen Funktionalitäten realisiert.

5 Externe Mobilitätsassistenzroboter – Aufbau und Stand der Forschung

Wir widmen uns zunächst den externen Mobilitätsassistenzrobotern oder -systemen (external physical assistive devices), die – ähnlich wie die herkömmlichen Rollatoren und Gehgestelle – in der Regel nur in temporärem Kontakt zum Benutzer stehen. Sie können prinzipiell als die technische Weiterentwicklung der Idee des Rollators angesehen werden. Demgegenüber stehen die Exoskelette oder Orthesen, die im folgenden Abschnitt behandelt werden.

Generell bestehen die externen Mobilitätsassistenzroboter aus den folgenden Komponenten:

- Eine mobile, d.h. rollende Basis, die die Fortbewegung des Benutzers (Gehen) erlaubt: Je nach Einsatzbereich kann diese verschiedene Ausmaße und Gewicht haben und passiv schiebbar oder aktiv angetrieben sein;
- Eine darauf aufbauende starre oder bewegliche Unterstützungsstruktur, die den Kontakt zum Benutzer herstellt und seine Bewegungen passiv oder aktiv unterstützt: Hierbei kann es sich um Handgriffe handeln, die starr sind oder sich an beweglichen Roboterarmen befinden und die der Nutzer selbst aktiv festhält, oder aber auch ein flexibel bewegbares Gestell, das aktiv den Benutzer festhält, so dass dieser selbst nicht für den Kontakt sorgen muss;
- Optional ein Manipulatorarm zum Greifen von Objekten.

Im aktiven Fall verfügen die Roboter über Motoren zum Antrieb der mobilen Basis und zur Aktuierung der Unterstützungsstruktur und ggf. des Manipulatorarms, die in ihrer Stärke je nach Einsatzbereich variieren. Die Roboter haben verschiedenen Sensoren, die im Idealfall die Umgebung präzise erfassen, den Zustand und die Absichten des Nutzers verlässlich erkennen können. Diese Sensoren können starr auf den Roboter montiert werden, in vielen Fällen befinden sie sich aber auf einem frei drehbaren aktuierten Sensorkopf, der es erlaubt, die Wahrnehmung selektiv in einzelnen Richtungen zu verbessern. Außerdem bieten die Roboter Benutzerschnittstellen zur direkten Kommunikation.

In der Folge beschreiben wir einige der existierenden Mobilitätsassistenzroboter, um exemplarisch die verschiedenen Typen vorzustellen. Hierbei handelt es sich nicht um einen vollständigen Überblick, eine ausführliche Liste findet sich im Handbook of Robotics [Siciliano2016]. Bei den meisten der beschriebenen Roboter handelt es sich um Forschungsplattformen, die zwar in vielen Fällen an Patienten getestet wurden, aber bisher nicht als Produkte im Vertrieb sind.

Der Assistenzroboter Guido [Lacey2008] von Haptica Inc., der auf dem älteren PAM-AID Projekt des Trinity College in Dublin basiert, wurde primär zur Führung von blinden (oder stark sehbehinderten), gebrechlichen älteren Patienten konzipiert. Es handelt sich um einen Roboter-Rollator mit vier aktuierten Rädern und festen Handgriffen, der in verschiedenen Automatisierungsmodi betrieben werden kann und in der Lage ist, Hindernisse über Laser- und Sonarsensoren zu erkennen und zu vermeiden, sich seine eigene Karte von der Umgebung aufzubauen und optimale Wege zu berechnen. Eine geeignete Software erlaubt es, den Roboter innerhalb

weniger Minuten in einer neuen Umgebung zu installieren. Die Interaktion mit dem Benutzer erfolgt über Kraftsensoren in den Handgriffen. Guido wurde in klinischen Versuchen evaluiert [Rentschler2008], aber nicht kommerziell vertrieben.

Die Care-O-bot-Serie des Fraunhofer-Instituts IPA in Stuttgart stellt eine bekannte Serie von Servicerobotern dar; allerdings wurden die verschiedenen Versionen für ganz unterschiedliche Aufgaben und Zielgruppen konzipiert. Care-O-bot II [Graf2001, Hans2002] wurde als Unterstützungssystem für ältere Menschen entwickelt, Care-O-Bots I, III und IV demgegenüber als allgemeine Unterstützungssysteme im Haushalt. Car-O-Bot II hat eine sehr breite rollende Basis mit festen Handgriffen und kann durch Benutzer über Kraftsensoren gesteuert werden. Außerdem verfügt er über einen eingebauten Robotikmanipulator zum Greifen und Manipulieren von Objekten z. B. zur Assistenz im Haushalt. Zur Kollisionserkennung und Vermeidung besitzt er Stoßdämpfer und Lasersensoren. Ein großes Problem des Care-O-Bot ist die fehlende Flexibilität und Manövrierbarkeit seines Fahrgestells, die eine Benutzung in engeren Räumen wie Wohnungen sehr schwer macht. Verglichen damit ist Care-O-Bot IV [Kittmann2015] viel mobiler geworden, ist aber eher als rollender Informationskiosk oder Servierroboter konzipiert als als Mobilitätsunterstützungsroboter.

Der Roboter PAMM (Personal Aid for Mobility and Monitoring) wurde am MIT ab ca. 1999/2000 entwickelt und teilt sich in zwei unterschiedliche Typen, die unterschiedlichen Unterstützungslevels bieten: SmartCane [Dubowsky2000] (mit kleiner rollender Basis und einem Handgriff) and SmartWalker [Yu2003] (mit größerer rollender Basis und zwei Handgriffen). Die Handgriffe sind in allen Fällen starr und können nicht adaptiert werden. Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Systemen bietet dieser Roboter nicht nur eine physische Unterstützung beim Gehen und eine Navigationshilfe, sondern auch eine Überwachung des Gesundheitszustandes sowie eine Erinnerungsfunktion und Unterstützung bei der Terminplanung. Dafür verfügt der Roboter über Kraftsensoren in den Griffen und Kameras zur Erkennung spezielle Zeichen an der Decke – und verlangt dafür eine speziell präparierte Umgebung) –, außerdem über Encoder in den Rädern, akustischen Sensoren zur Abstandserkennung und biometrischen Sensoren für Patientenzustand. Der Roboter kann über Wifi mit einem zentralen Computer kommunizieren.

Der Roboter Monimad [Médéric2004, Saint-Bauzel2009] wurde 2004 im Laboratoire de Robotique de Paris entwickelt. Es handelt sich auch hier um einen Roboter in prinzipieller Rollatorform mit (in diesem Fall drei) aktuierten Rädern. Als erster Mobilitätsassistenzroboter war er allerdings mit einer beweglichen Un-

terstützungsstruktur ausgestattet, die bewirkten, dass die Handgriffe, an denen der Patient sich festhält und die sich am Ende von zwei Roboterarmen befinden, aktiv bewegt werden konnten. Dies erlaubte neben der physischen Unterstützung beim Laufen insbesondere eine effizientere physische Unterstützung bei der anspruchsvollen Aufgabe des Aufstehens. Parallelkinematiken sorgen dafür, dass die Handgriffe parallel zum Boden bleiben. Die einzigen Sensoren des Roboters sind Kraftsensoren in den Handgriffen.

Weitere interessante Mobilitätsassistenzroboter sind etwa der NurseBot Pearl der University of Michigan [Montemerlo2002, Pollack2002], der RT Walker der Tohoku University [Hirata2004], die CMU Robotics Walkers aus Pittsburgh [Glover2003, Morris2003], die Kwansai Gakuin University Walker aus Japan [Chugo2007], der Walking Assistant Robot (WAR) aus Korea [Shim2005], die Assistenzsysteme des KAIST, ebenfalls aus Korea [Lee2000], und der E-JUST (Egypt-Japan University of Science and Technology) [Salah2011].

Zu den fortschrittlichsten Mobilitätsassistenzrobotern gehören die im Rahmen des europäischen Projekts MOBOT entwickelten Prototypen. Das Projekt und seine Ergebnisse sowie die dort eingesetzten Forschungsmethoden werden ab dem übernächsten Abschnitt ausführlicher dargestellt. Zunächst folgen ein paar Ausführungen über Exoskelette zur Unterstützung der Mobilität.

6 Exoskelette zur Unterstützung der Mobilität – Varianten und Stand der Forschung

Die Robotik- und Rehabilitationsforschung hat in den letzten Jahren einen Boom bei Exoskeletten und Orthesen – beides Assistenzsysteme „zum Anziehen“ – gesehen. Im Gegensatz zu den zuvor besprochenen externen Mobilitätsassistenzrobotern sind Exoskelette direkt und eng anliegend mit dem Körper verbunden und decken diesen ganz oder zu Teilen ab. Anders als Prothesen ersetzen sie nicht verlorene Körperteile, sondern laufen parallel zu diesen und unterstützen die Aktion der Muskeln in den überdeckten Gelenken. Es gibt verschiedenste Arten von Exoskeletten, z. B. für die untere Extremität [Chen2016], die obere Extremität [Dinh2017] oder auch den Rumpf-/Wirbelsäulenbereich. [Dollar2008] gibt einen guten Überblick über die Entwicklung von Exoskeletten und beschreibt den Stand der Forschung für Exoskelette der unteren Extremität.

Die Gelenke der Exoskelette können aktiv oder passiv sein, d.h. von Motoren oder anderen Aktuatoren angetrieben sein oder aber unter der Wirkung von geeignet gewählten passiven Elementen wie Federn und Dämpfern stehen. Exoskelette

werden aus verschiedenen Materialien hergestellt: Manche bestehen aus festen Materialien wie Carbon, Aluminium, Titan oder Stahl mit weichen Kontaktpolstern, andere – die sogenannten Exosuits [z. B. Asbeck2016] – bestehen lediglich aus weichen Komponenten wie Gurten oder elastischen Bändern und sind damit sehr leicht und angenehm zu tragen, allerdings bisher nur passiv und nicht sehr stark.

Die wichtigsten geplanten Anwendungen solcher Geräte im medizinischen Bereich sind Rehabilitation, teilweise oder vollständige Unterstützung beim Gehen oder anderen Tätigkeiten, Vorbeugung vor Muskelschwäche, und auf der nichtmedizinischen Seite die Erhöhung der menschlichen Produktivität und der Sicherheit gesunder Menschen [Kazerooni2008]. Wichtige Beispiele – alle für die untere Extremität – sind das Mobility Assist Exoskeleton (MAE) [Wall2015], MINA, das Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX), REX von Rex Bionics und Ekso von Ekso Bionics [Kolakowsky-Hayner2013]. Diese Systeme unterscheiden sich in ihrer Masse, ihrem Aufbau, der Wahl der Aktuatoren, sowie der Ausprägung einzelner Gelenke als passives oder aktives Gelenk. Trotz der steigenden Zahl an Prototypen und kommerziell verfügbaren Exoskeletten gibt es noch kein System, mit dem z. B. ein Querschnittsgelähmter oder ein sehr gebrechlicher Mensch sich unabhängig und ohne Hilfe zusätzlicher Krücken fortbewegen kann. Sowohl die Aktuatorik als auch die Stabilisierungsmechanismen stellen noch ein großes Problem dar; es gibt kein Exoskelett, das unter den genannten Umständen einen normalen Gang erlauben würde. Eines der Ziele laufender Forschungsprojekte ist es, ein Exoskelett durch Adaption der Software und Hardware auf die Bedürfnisse älterer Menschen anzupassen; eine Zielgruppe, für die es bisher keine geeigneten Exoskelette gibt. Außerdem sind viele Exoskelette aufgrund der Verwendung von harten Materialien noch eher unbequem zu tragen und sehr schwer. Exosuits werden inzwischen an mehreren Stellen untersucht, haben aber das Problem, dass sie in der Regel nur geringe Unterstützung geben können. Die intrinsische Nachgiebigkeit der Exosuits, ihr Tragekomfort und geringer Energieverbrauch machen sie ideal für eine anteilige (schwächere) Unterstützung der Muskelkraft oder um leichte Tätigkeiten bei Personen mit geringen Problemen zu unterstützen, wie etwa beim Laufen [Asbeck2015], Greifen [Dinh2017, Xiloyannis2016] oder zur Stabilisierung [Robinson2000].

7 Forschung und Entwicklung zum Design neuer Mobilitätsassistentensysteme am Beispiel des MOBOT Projekts

Das Projekt MOBOT (2013-2016) war ein Europäisches Konsortialprojekt zur Entwicklung von Mobilitätsassistenzrobotern für ältere Menschen, an dem wir mitwirken haben. Ziel des Projektes war es, eine Vielzahl der oben genannten gewünschten Funktionalitäten zur Mobilitätsassistentenz und zur Kompensation der physischen und kognitiven Defizite des Benutzers auf einer adaptiven Plattform zu vereinen.

Unter der Leitung der TU München (später der Universität Bristol) arbeiteten in diesem Projekt Forscher aus Informatik, Ingenieurwissenschaften und Mathematik an Universitäten mit Krankenhäusern, Rehabilitationszentren und kleinen Firmen aus insgesamt fünf europäischen Ländern zusammen. Wir werden in diesem und den folgenden Abschnitten die Ergebnisse des Projektes, unsere Beiträge und die interdisziplinäre Herangehensweise an die Entwicklung solcher Assistenzgeräte darstellen, insbesondere den Einsatz von modellbasierter Simulation und Optimierung.

In MOBOT wurden zwei prinzipiell unterschiedliche intelligente und adaptive Prototypen für Mobilitätsassistenzroboter entwickelt, die den Nutzern ein unterschiedliches Maß an Unterstützung bieten. Beide Prototypen sollen Unterstützung bei Alltagsbewegungen wie Gehen, Stehen, Aufstehen und Hinsetzen bieten und die Navigation des Nutzers im unbekanntem Umfeld unterstützen (Wegfinden, Hindernisvermeidung).

Der erste Prototyp (bezeichnet als „rollator type“, Abbildung 2) hat wie viele der früheren Systeme die grundlegende Form eines Rollators, d.h. er besteht aus einer mobilen Plattform mit zwei beweglichen Armen mit Handgriffen, an denen sich der Patient aktiv festhält. Durch die aktuierten Arme hat der Roboter die Möglichkeit, im Gegensatz zu einem konventionellen Rollator verstärkte Assistenz beim Aufstehen und Hinsetzen zu bieten oder auch die Stabilisierung des Nutzers im Stehen und Gehen aktiv zu unterstützen. Die Handgriffe bleiben dabei parallel zum Boden.

Der zweite Prototyp (bezeichnet als „nurse type“, Abbildung 3) basiert ebenfalls auf einer mobilen Plattform, ist aber in der Lage – analog zu einem menschlichen Pfleger – den Nutzer mit einer beweglichen Haltevorrichtung aktiv am Rumpf festzuhalten und weitere Unterstützungspunkte am Knie und an den Unterarmen bereitzustellen, so dass er ein höheres Level an Unterstützung bieten kann. Er ist

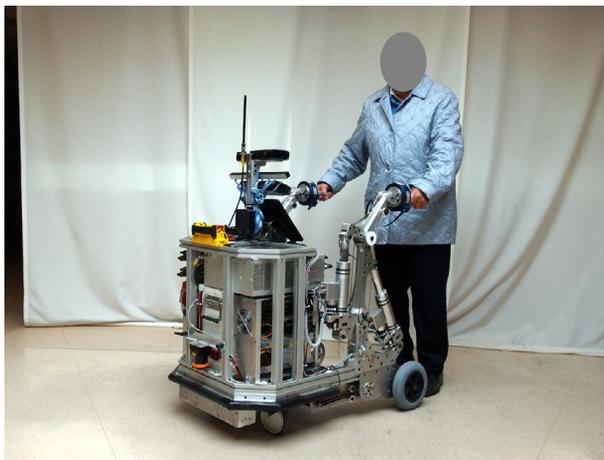


Abbildung 2: MOBOT Prototyp „Rollator type“ (Photo: Universität Heidelberg).

damit auch für Patienten geeignet, die sich nicht mehr selbstständig festhalten können.

Beide Roboter sind mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, wie Laser-Entfernungssensoren und Kraftsensoren, Kinect-Kameras zur Bewegungsaufnahme und Mikrofonen. Mit deren Hilfe soll die Körperhaltung des Nutzers zu jedem Zeitpunkt analysiert, seine Absichten interpretiert und das Verhalten der Roboter durch Bewegungen der Basis oder der Arme entsprechend angepasst werden. Außerdem kann der Roboter über Gestik, Sprache und Krafteinwirkung sowohl von Nahem als auch aus der Ferne gesteuert werden, kann also z. B. auch in die Parkposition geschickt oder aus dieser herbeigerufen werden.

Wie in vielen anderen Projekten sind auch die MOBOT-Roboter als experimentelle Prototypen zum Proof-of-Concept gedacht und für den Einsatz im Alltag noch deutlich zu schwerfällig, ausladend und teuer. Aus Gründen der Vereinfachung und der Reduktion von Größe, Gewicht und Kosten für derartige Geräte werden auf dem Weg zu einem kommerziellen Produkt sicher viele Kompromisse in Bezug auf die angebotenen Funktionalitäten und die Tragfähigkeit gemacht werden müssen.

Zu den Neuheiten des MOBOT-Projektes gegenüber den bisherigen Projekten zu Mobilitätsassistenzrobotern für ältere Menschen gehörten neben der Entwicklung von Prototypen mit deutlich größerem Funktionalitätsangebot die gründliche Analyse von Bewegungen der Zielgruppe sowohl im Experiment als auch mit



Abbildung 3: MOBOT Prototyp „Nurse type“ (Photo: ACCREA).

Hilfe von computergestützten Methoden der Simulation und Optimierung. Außerdem haben wir in diesem Projekt zum ersten Mal prädiktive Simulation und Optimierung eingesetzt, um das Design der Assistenzroboter-Prototypen für die zu erwartenden dynamischen Belastungssituationen zu optimieren. In den nächsten Abschnitten erläutern wir diese methodischen Ansätze sowohl allgemein als auch in ihrer speziellen Ausführung im MOBOT-Projekt.

8 Verständnis menschlicher Bewegungen als Grundlage für die Entwicklung von Mobilitätsassistenzrobotern

Um bessere Mobilitätsassistenzroboter – sowohl externe Systeme, wie in MOBOT betrachtet, als auch Exoskelette – für den Menschen entwickeln zu können, ist ein tiefgehendes Verständnis der für diese Geräte relevanten menschlichen Bewegungen notwendig.

Hierbei kann man zwei verschiedene Ziele verfolgen: Geht es um die Diagnose individueller Pathologien oder die Entwicklung individueller Therapieansätze bzw.

die Wahl von individuellen Geräten für einen Patienten, so gilt das vorrangige Interesse der Untersuchung der speziellen Bewegungen dieses Individuums. Will man andererseits Assistenzsysteme für eine ganze Gruppe entwickeln, wie dies im MOBOT-Projekt für die Gruppe der geriatrischen Patienten mit Mobilitätseinschränkungen der Fall war, so ist das Ziel, die einheitlichen Bewegungsmerkmale dieser Gruppe zu verstehen.

Ein solches Verständnis können wir auf zwei verschiedene Arten erzielen, zum einen durch Bewegungsaufnahmeexperimente am Menschen, zum anderen durch eine Beschreibung der physikalischen Eigenschaften von Bewegungen (des Individuums / der Gruppe) im Computermodell. Die besten Ergebnisse können mit einer komplementären Verwendung der beiden Ansätze erzielt werden.

Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts begannen Wissenschaftler und Künstler damit, Bewegungen von Menschen und Tieren zu beobachten und zu wissenschaftlichen Zwecken aufzuzeichnen. Als Technik wurde u. a. anderem die Chronofotografie eingesetzt, zu deren Pionieren Eadweard Muybridge aus Stanford und Étienne-Jules Marey aus Paris zählen und bei der Bewegungen durch eine schnelle Folge von Fotos sichtbar gemacht, also qualitativ erfasst wurden. Das Ziel der modernen Bewegungsmessung, wie sie heute in vielen Bewegungslaboren an Universitäten und in Kliniken eingesetzt wird, ist es jedoch, die Bewegungen detailliert quantitativ aufzuzeichnen.

Hierbei möchte man zum einen die Kinematik der Bewegungen, also die Positions- und Gelenkwinkelverläufe der Probanden über der Zeit, messen. Dazu können Systeme aus Infrarotkameras eingesetzt werden, die Positionen von reflektierenden Markern an diversen charakteristischen Stellen des Körpers aufnehmen, aus denen sich die Konfiguration des Körpers zu jedem Zeitpunkt rekonstruieren lässt. Alternativ verwendet man dazu kleine, sogenannte inertielle Messeinheiten, die an den einzelnen Segmenten des Körpers angebracht werden und Beschleunigung, Drehraten etc. bestimmen können, welche ebenfalls als Basis für eine Bewegungsrekonstruktion verwendet werden. Eine sehr einfache, kostengünstige, aber weniger genaue Art der kinematischen Messung bietet die aus dem Bereich der Spielekonsolen bekannte MS Kinect.

Zusätzlich zur Kinematik interessiert man sich für die Dynamik (= Lehre von den Kräften) der Bewegungen. Um die äußeren Kräfte auf die Probanden, insbesondere die Bodenreaktionskräfte zu bestimmen, können Kraftmessplatten im Boden oder Drucksensorsohlen in den Schuhen eingesetzt werden. Gelenkmomente können beim Menschen nicht direkt gemessen werden. Elektromyografische Messungen liefern Einblicke in die Aktivität der einzelnen Muskeln. Alle genannten

Experimente können durch entsprechende Wahl der Probanden sowohl für die allgemeine als auch für die individuelle Bewegungsanalyse eingesetzt werden.

An der Universität Heidelberg verfügen wir seit 2018 im Rahmen des Heidelberg Center for Motion Research (<https://www.uni-heidelberg.de/hcmr>) auch über ein solches Bewegungslabor, in dem wir Bewegungsexperimente der genannten Arten für viele interdisziplinäre Anwendungen durchführen.

Die im Rahmen des MOBOT-Projektes Ende 2013 durchgeführten Experimente fanden im Bethanien-Krankenhaus in Heidelberg mit Patienten, die sich freiwillig zu diesem Zweck gemeldet hatten, statt [Fotinea2014]. Hierbei wurden freie und durch einen Menschen oder einen passiven Rollator unterstützte Alltagsbewegungen vermessen. In einem sehr aufwändigen Messaufbau wurden neben Studien zur verbalen und gestischen Kommunikation die Bewegungen sowohl mit einem mobilen markerbasierten System als auch mit auf dem Rollator montierten Messapparaturen, wie Kinect oder Laserabstandssensoren, festgehalten.

Allerdings ist es nicht möglich, alle interessanten Größen einer Bewegung direkt zu messen. Außerdem ist jede Messung mit einem Eingriff in das System oder seine Bewegung verbunden, da z. B. Marker oder Sensoren angebracht werden müssen oder die Bewegung auf einer eingebauten Kraftmessplatte stattfinden muss. Hier müssen Kompromisse gefunden werden zwischen einer möglichst präzisen und umfassenden Messung der Bewegung und einem möglichst geringen Einfluss auf Bewegungsapparat und Bewegung. Ein vollständiges Bild der Bewegung kann daher durch Messungen nie gewonnen werden.

9 Computermodelle zur Analyse und Voraussage von Bewegungen

Computersimulationen und -optimierungen auf der Basis von realistischen Modellen stellen einen vielversprechenden alternativen Ansatz zur individuellen und allgemeinen Analyse menschlicher Bewegungen dar, die im besten Fall mit Messungen kombiniert wird.

Die Computermodelle basieren auf der Erkenntnis, dass der menschliche Körper ein physikalisches System ist, das sich wie Newtons Apfel unabänderlich nach den Gesetzmäßigkeiten der Mechanik bewegen muss. Angenähert können wir den menschlichen Körper als System starrer Körper beschreiben, die an den Gelenken beweglich miteinander verbunden sind. Um unnötige Komplexität zu vermeiden, werden dabei aber nicht alle wirklichen Segmente (=Knochen) des Menschen berücksichtigt, sondern nur diejenigen, die für eine bestimmte Bewegung relevant sind.

In unseren Forschungen betrachten wir sehr häufig – wie auch im MOBOT-Projekt – Ganzkörperbewegungen, in denen wir typischerweise den Kopf, einige Segmente des Torsos, Pelvis, Oberarme, Unterarme, Hände, Oberschenkel, Unterschenkel und Füße unterscheiden, nicht aber einzelne Finger oder Zehen, wie es z. B. für feinmotorische Greifbewegungen notwendig wäre. Es ist möglich, diese Modelle weiter zu verfeinern, indem z. B. Muskeleigenschaften zur Erzeugung der Antriebskräfte der menschlichen Bewegungen oder Elemente der neuronalen Ansteuerung ergänzt werden.

Die Modelle können durch geeignete Wahl der Modellparameter wie Segmentgeometrie, -masse und -trägheit durch entsprechende Messungen an einzelnen Individuen angepasst werden. Häufig, wie auch im MOBOT-Projekt, ist man an Parametern interessiert, die ganze Personengruppen – in diesem Fall geriatrische Patienten – sinnvoll beschreiben. In der Literatur existierten zwar Standardtabellen durchschnittlicher Parameter für jüngere Menschen, doch sind diese nicht auf ältere Menschen übertragbar, die sich in ihrer Gesamtgröße und in ihren Proportionen, z. B. aufgrund von Osteoporose, signifikant davon unterscheiden. Auf der Basis von Statistiken und Ergonomiedaten haben wir einen eigenen dynamischen Datensatz entwickelt [HoHoang2015b], der die Eigenschaften der verschiedenen Perzentile der älteren Bevölkerung gut beschreibt.

In Kombination mit Messungen erlauben uns die Modelle, in die Bewegungen „hineinzugucken“, d.h. auch Größen zu ermitteln, die nicht direkt gemessen werden können, und allgemeine Verhaltensregeln zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Modelle und Gesetzmäßigkeiten ist es dann auch möglich, Bewegungen in neuen Situationen vorauszusagen.

Bei der Bestimmung dieser Verhaltensregeln stützen wir uns auf die fundamentale Hypothese, die auch ein Grundprinzip der Bionik darstellt, dass viele Strukturen, Materialien und Prozesse in der Natur optimal sind. So nehmen wir an, dass sich auch die Bewegungen von Menschen und Tieren im Laufe der Evolution und infolge individueller Entwicklung mit jeder Wiederholung stetig verbessert haben. Die Optimierung ist dabei kein bewusster Prozess, sondern wird unbewusst durch den Lernprozess in Richtung der mechanisch optimalen Bewegungen geleitet. Das Optimierungskriterium variiert je nach Situation und Bewegungsaufgabe und ist häufig eine Kombination verschiedener einzelner Optimierungsziele. Im Falle von jungen Menschen werden Bewegungen in der Regel möglichst dynamisch und effizient ausgeführt. Bei älteren Menschen wird der Energieaufwand in einer weniger dynamischen Weise optimiert und es liegen signifikante Beschränkungen an die Geschwindigkeiten und die Gelenkmomente vor. Auch

durch verschiedene Pathologien ergeben sich unterschiedliche Optimierungsziele: Wenn z. B. spezielle Segmente oder Gelenke geschwächt sind, wird der Patient versuchen, sie zu entlasten, das heißt, er versucht lokal die Lasten zu minimieren und diese mit anderen Teilen des Körpers zu kompensieren. Es ist eine wichtige und sehr aufwändige Aufgabe, diese natürlichen Verhaltensmuster für alle Individuen bzw. Gruppen zu identifizieren und in geeignete mathematische Formeln zu packen. Unsere Computersimulationen beruhen auf dem mathematischen Ansatz der optimalen Steuerung, in dem auf der Basis der mechanischen Modelle und dieser Optimalitätskriterien realistische Bewegungen für verschiedene Situationen vorausgesagt werden können.

10 Designoptimierung von Assistenzrobotern

Auf der Basis der beschriebenen Optimierungskriterien können wir Computersimulationen auch hervorragend zur Entwicklung von Mobilitätsassistenzsystemen einsetzen: Wir können natürliche Bewegungen des Körpers für typische alltägliche Situationen wie Gehen oder Aufstehen aus dem Sitzen im Computer erzeugen und bestimmen, wie ein technisches Gerät aussehen und sich bewegen funktionieren müsste, um diese Bewegung optimal unterstützen oder die gewünschte Stellen entlasten zu können. Dies hat – wie immer bei simulationsgestütztem Design – den ungeheuren Vorteil, dass deutlich weniger Design-Iterationen und Tests am praktischen Prototypen notwendig sind.

Im MOBOT-Projekt haben wir als Referenzbewegung für die Entwicklung unser Assistenzroboter die Aufstehbewegung gewählt. Das Aufstehen aus dem Sitzen stellt für viele ältere Menschen eine große Herausforderung dar, selbst wenn ihre Mobilität noch nicht drastisch eingeschränkt ist und sie z. B. noch relativ gut gehen können. Die Aufstehbewegung erfordert deutlich höhere Kräfte – entweder vom Patienten oder vom Assistenzgerät, so dass sie sich sehr gut zur Dimensionierung eignet. Das Ziel von MOBOT war nicht, Systeme zu entwickeln, die den Patienten die Last der Bewegung vollständig abnehmen, wie dies beispielsweise durch ein kräftiges Exoskelett oder einen Kran möglich wäre. Stattdessen sollten die beiden Assistenzroboter ein begrenztes Level an Unterstützung leisten können - im Fall des Rollator-Prototyps laut Projektspezifikation in der Größenordnung von 25% des Gewichts des Patienten, und beim Pfleger-Prototyp von 50%. Wie oben beschrieben, unterscheiden sich die beiden Prototypen auch fundamental in ihren Kontaktpunkten mit dem Körper.

Die Optimierung erfolgte nun in zwei Stufen:

- In einem ersten Satz von Rechnungen haben wir Aufstehbewegungen von Patienten im Computer mit Hilfe von optimaler Steuerung simuliert und dabei bestimmt, welche Kräfte in welcher Richtung auf den Körper einwirken sollten, um den Patienten unter den gegebenen Anforderungen bestmöglich zu entlasten. Die Kräfte konnten dabei an den jeweiligen Kontaktpunkten der beiden Assistenzsysteme eingeleitet werden und erfüllten die oben beschriebenen Limits, aber ansonsten flossen an dieser Stelle noch keinerlei Beschränkungen, etwa durch eine bestimmte Gestalt oder Bewegungsmöglichkeit der Geräte ein. Alle Optimierungsrechnungen haben wir, wie in den Projektzielen festgelegt, für 6 Datensätze, entsprechend den 20-, 50- und 80- Größen- und Massen-Perzentilen der männlichen und weiblichen geriatrischen Bevölkerung durchgeführt [Mombaur2017].
- In der zweiten Stufe haben wir die vorher berechneten optimalen Kraftvektoren an den verschiedenen Kontaktpunkten sowie deren Positionsverläufe als Eingangswerte für die Designoptimierung der Prototypen verwendet. Auch der Roboter wurde dabei als Modell aus mehreren Segmenten formuliert, die zum einen die rollende Basis, zum anderen die – für die beiden Prototypen verschiedenen – Haltearmkonfigurationen mit einer vordefinierten Zahl an Segmenten beschreiben. Segmentlängen und -masseverteilungen sowie Stärke und Positionierung der Motoren der Assistenzroboter waren unbekannte Parameter, die durch die Optimierung bestimmt wurden. Auch die durch die Roboter auszuführenden Bewegungen sind Ergebnis der Optimierung, bei der neben der Erfüllung aller geforderten Nebenbedingungen das Ziel war, bestimmte Performance-Kriterien zu verbessern, wie die durchschnittlichen Motordrehmomente zu minimieren. Im MOBOT-Projekt war das Ziel, in jedem Fall, d.h. für den rollator type und den nurse type, nur einen Prototypen für das gesamte betrachtete Größenspektrum der Patienten (vom 20. Perzentil weiblich bis zum 80. Perzentil männlich) zu entwickeln. Auf der Basis der Ergebnisse der ersten Stufe wäre es aber auch möglich gewesen, speziell angepasste Geräte für einzelne Größen zu entwickeln, wie es sicher in der Praxis und für spätere Projekte der Fall sein wird. Die Ergebnisse unserer Designoptimierungen sind in [HoHoang2015a] veröffentlicht.

Abbildung 4 zeigt in der linken Hälfte die kombinierten Simulationsmodelle des Menschen mit dem jeweiligen optimierten Assistenzroboter – oben für den Rollator typ, und unten für den Pflégertyp. In der verlinkten Animation sind die optimierten Bewegungen zu sehen. Die rechte Hälfte der Abbildung 4 zeigt die

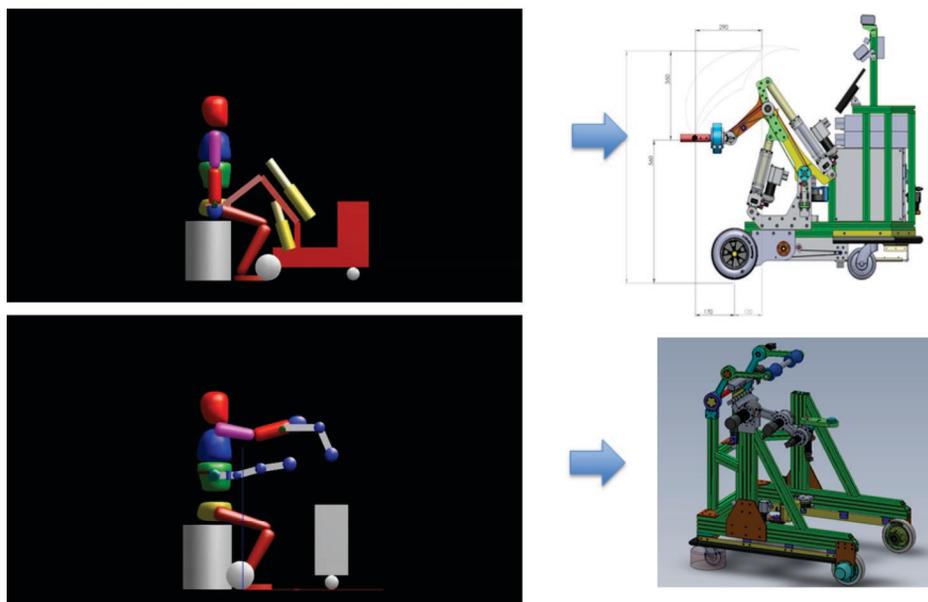


Abbildung 4: Optimierungsbasiertes Design zweier Assistenzroboter im Rahmen von MOBOT. oben: rollator type, unten: nurse type (CAD-Zeichnungen: ACCREA). Der durch Anklicken aktivierbare Animationsfilm ist dauerhaft hinterlegt unter der URL <http://heidicon.ub.uni-heidelberg.de/id/666142>

aus der Simulation resultierenden Designskizzen für den jeweiligen Prototypen, die bereits in den Abbildungen 2 und 3 gezeigt wurden.

Aufbauend auf den Ergebnissen des MOBOT-Projekts befindet sich derzeit ein Nachfolgeprojekt zum Design leichter und günstigerer Mobilitätsassistenzroboter in der Evaluationsphase.

11 Designoptimierung von Exoskeletten

Ähnliche Designoptimierungen wie am Beispiel unserer Arbeiten im MOBOT-Projekt beschrieben sind selbstverständlich auch für Exoskelette möglich. Auch hier können mathematische Modelle des Menschen oder des Exoskelettes und dessen optimale Steuerung einen großen Beitrag dazu leisten, die Exoskelette richtig zu dimensionieren, ihre Komponenten geeignet auszuwählen und die Unterstützung, die sie dem Menschen bieten, zu optimieren. Als Beispiel seien kurz zwei unserer Exoskelett-Projekte am Lehrstuhl genannt:

- Im Rahmen des europäischen Projektes SPEXOR [<https://www.spexor.eu>] mit sieben Partnern aus fünf Ländern tragen wir aktuell dazu bei, Rücken-Exoskelette zu entwickeln, die die untere Wirbelsäule entlasten und damit berufsbedingte Rückenschmerzen vermeiden oder eine berufliche Reintegration nach Rückenproblemen erlauben sollen. Auch hier setzen wir modell-basierte Optimierung ein und betrachten insbesondere die extrem rückenbelastenden Beuge- und Hebebewegungen.
- Im Projekt HEIKA-EXO zusammen mit dem KiT im Rahmen der HEIKA-Initiative der beiden Universitäten haben wir einen Simulator für Exoskelette der unteren Extremität entwickelt, mit dem diese bei verschiedenen Konfigurationen und für verschiedene Probanden so dimensioniert werden konnten, dass sie reguläre dynamische Laufbewegungen für einen vollständig gelähmten Patienten antreiben konnten [Koch2015].

Ein interdisziplinäres Projekt zur Neuentwicklung von Exoskeletten speziell für ältere und alte Menschen wird derzeit vorbereitet.

12 Nicht-technologische Fragestellungen bei der Entwicklung von Assistenzrobotern

Langfristiges Ziel der technologischen Forschung an Mobilitätsassistenzsystemen ist die Bereitstellung von Unterstützungssystemen für Nutzer zum Erhalt oder zur Wiederherstellung der individuellen Mobilität. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die technologische Entwicklung in einem konstanten Dialog mit benachbarten Disziplinen stehen und betroffene Personengruppe und Interessenverbände frühzeitig einbinden.

Die psychologische Altersforschung untersucht etwa die Entscheidungsfindungs- und Planungsaspekte menschlicher Mobilität. Nur durch ein grundlegendes Verständnis der zugehörigen kognitiven Prozesse kann ein Mobilitätsassistenzsystem mit einer intelligenten Regelung ausgestattet werden, die die Absichten der Nutzer erkennt und auf eine für den einzelnen Nutzer intuitive Weise Unterstützung bietet – auf der jeweils angemessenen Ebene zwischen abstrakter Handlungsplanung und konkreter motorischer Bewegungsausführung. Auch die Frage, wie sich technologische Assistenzsysteme in den Alltag der Nutzer integrieren lassen, ist in erster Linie keine technologische. Das Funktionieren der Technik ist hier notwendige Voraussetzung. Die Techniknutzung älterer und alter Menschen bzw. die Akzeptanz technischer Systeme durch ältere und alte Nutzer

wird in großem Maße von psychologischen Faktoren beeinflusst. Diese zu verstehen ist essentiell, um die technologischen Systeme so zu gestalten, dass sie von den Nutzern möglichst intuitiv genutzt werden können und keine Ängste oder Abwehrhaltungen erzeugen.

Die Entwicklung technischer Assistenzsysteme muss immer einhergehen mit einer Betrachtung der zugehörigen ethischen und politischen Implikationen. Insbesondere im Bereich der Assistenzsysteme müssen zahlreiche Abwägungen getroffen werden, die nicht-technologischer Natur sind – etwa die Balance zwischen erhöhter Sicherheit durch technische Assistent und der (potentiellen) Beschneidung der individuellen Autonomie der Nutzer. Auch müssen neben positiven Aspekten wie der Steigerung der Qualität von Therapie, Rehabilitation und Pflege durch die Integration von technischer Assistenz immer auch die Gefahr einer damit verbundenen Infragestellung von Therapie-, Rehabilitations- und Pflegestandards sowie die sozial gerechte Anwendung neuer Assistenzprodukte diskutiert werden. Schließlich treten bei der Entwicklung von Assistenzsystemen zahlreiche rechtliche Forschungsfragen auf. Neben naheliegenden Fragen wie der Verantwortungszurechnung bei Fehlfunktionen (semi-)autonomer Assistenzsysteme entstehen durch die Möglichkeit der Erhebung und Verarbeitung verschiedenster Daten durch das System Fragestellungen aus den Bereichen der informationellen Selbstbestimmung bzw. des Datenschutzes, des Sozialrechts sowie der Berufsrechte, etwa zur Frage, inwiefern Messdaten von Mobilitätsassistenzsystemen in die Entscheidungen der Ärzte über sozialrechtliche Ansprüche einbezogen werden sollten.

Um die genannten Themen angemessen zu berücksichtigen, ist ein konstanter Austausch zwischen der technologischen Entwicklung, den angrenzenden Forschungsgebieten, beteiligten Personengruppen, den Repräsentanten von Krankenkassen, Ärzte- und Pflegeverbänden sowie politischen Entscheidungsträgern bereits während der technischen Entwicklungsphase neuer Assistenzsysteme dringend notwendig. Ein entsprechendes interdisziplinäres Forschungsprojekt zwischen Mathematik, (Technischer) Informatik, Psychologie, Medizin und Rechtswissenschaften ist derzeit in Vorbereitung. Die Universität Heidelberg ist hier glücklicherweise sehr gut aufgestellt und besitzt mit dem Netzwerk Alternsforschung (NAR) sowie zahlreichen weiteren Arbeitsgruppen in der Psychologie oder den Rechtswissenschaften exzellente Kooperationsmöglichkeiten für uns als technisch forschende Arbeitsgruppe.

13 Fazit

Assistenzroboter, welche ihre Nutzer aktiv bei ihren Bewegungen unterstützen, existieren derzeit vor allem als Prototypen, d.h. in Forschungslaboren. Der Einzug kommerziell verfügbarer Systeme in unseren Alltag wird von Experten innerhalb der kommenden zehn Jahre erwartet. Dabei werden spezialisierte Robotersysteme, die beispielsweise ausschließlich das Heben schwerer Objekte unterstützen, früher verfügbar sein als flexible Assistenzroboter, die etwa älteren Menschen bei einer Vielzahl von Aufgaben assistieren können. Je weiter sich die Assistenzroboter von spezialisierten Geräten zu allgemeinen Assistenzrobotern hin entwickeln, desto mehr werden auf technologischer Seite individualisierte und komplexere Systeme sowie Regelungsalgorithmen notwendig. Hier sind optimierungsbasiertes Hardwaredesign sowie hybride Kontrollalgorithmen aus modellprädiktiver Regelung und maschinellem Lernen vielversprechende Konzepte. Je weiter Assistenzroboter außerdem in den Alltag der Menschen vordringen, desto wichtiger wird es, parallel zum technischen Fortschritt auch die politischen und ethischen Implikationen dieser Entwicklung zu diskutieren.

Literatur

- [Asbeck2015] A. T. Asbeck, K. Schmidt, I. Galiana, D. Wagner and C. J. Walsh, Multi-joint soft exosuit for gait assistance, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, 2015, pp. 6197–6204, 2015.
- [Asbeck2016] A. T. Asbeck, S. M.M. De Rossi, K. G. Holt, and C. J. Walsh, A biologically inspired soft exosuit for walking assistance, International Journal of Robotics Research, Vol. 34, no. 6, pp. 744–762, 2016.
- [Chen2016] B. Chen, H. Ma, I.-Y. Qin, F. Gao, K.-M. Chan, S.-W. Law, L. Qin, and W.-H. Liao, Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons, Journal of Orthopaedic Translation, Vol. 5, pp. 26–37, 2016.
- [Chugo2007] D. Chugo, W. Matsuoka, S. Jia, and K. Takase, Rehabilitation walker with standing-assistance device, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 19, no. 6, p. 604, 2007.
- [Dinh2017] B.K. Dinh, M. Xiloyannis, C.W. Antuvan, L. Cappello, and L. Masia, A soft wearable arm exoskeleton based on hierarchical cascade controller for assistance modulation, IEEE Robotics and Automation Letters, Issue: 99, 2017.
- [Dollar2008] A.M. Dollar, and H. Herr, Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. IEEE Transactions on Robotics. Vol. 24, February. pp. 144–158, 2008.

- [Dubowsky2000] S. Dubowsky, F. Genot, S. Godding, H. Kozono, A. Skwersky, H. Yu, and L. S. Yu, PAMM - a robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: A helping-hand for the elderly, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 1, pp. 570–576, 2000.
- [Fotinea2014] S.-E. Fotinea, E. Efthimiou, A.-L. Dimou, T. Goulas, P. Karioris, A. Peer, P. Maragos, C. Tzafestas, I. Kokkinos, K. Hauer, K. Mombaur, I. Koumpouros, and B. Stanzyk, Data Acquisition towards defining a Multimodal Interaction Model for Human-Assistive Robot Communication, Universal Access in Human-Computer Interaction. Aging and Assistive Environments, C. Stephanidis and M. Antona (Eds.), UAHCI/HCI 2014, Part III, Lecture Notes in Computer Science: 8515, pp. 615–626, Springer, 2014.
- [FrailtyScale2007] Clinical Frailty Scale, Dalhous University, Halifax, Canada, 2007. <https://camapcanada.ca/FrailtyScale.pdf>
- [Glover2003] J. Glover, A robotically-augmented walker for older adults, 2003.
- [Graf2001] B. Graf and M. Hägele, Dependable interaction with an intelligent home care robot, in Proceedings of ICRA-Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, pp. 21–26, 2001.
- [Hans2002] M. Hans, B. Graf, and R. Schraft, Robotic home assistant care-o-bot: Past-present-future. Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robotics, Robot and Human Interactive Communication, pp. 380–385, IEEE, 2002.
- [Hirata2004] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, Passive-type intelligent walking support system, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vol. 4, pp. 3871–3876, 2004.
- [HoHoang2015a] K.-L. Ho Hoang and K. Mombaur, Optimal Design of a Physical Assistive Device to Support Sit-to-Stand Motions, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5891-5897, May, 2015.
- [HoHoang2015b] K.-L. Ho Hoang and K. Mombaur, Adjustments to de Leva-anthropometric regression data for the changes in body proportions in elderly humans, Journal of Biomechanics, Vol. 48, no. 13, pp. 3732–3736, October, 2015.
- [Kazerooni2008] H. Kazerooni, Exoskeletons for Human Performance Augmentation, Springer, 2008.
- [Kittmann2015] R. Kittmann, T. Fröhlich, J. Schäfer, U. Reiser, F. Weisshardt, and A. Haug, Let me Introduce Myself: I am Care-O-bot 4, a Gentleman Robot, 2015.
- [Koch2015] K. H. Koch, and K. Mombaur, ExoOpt – a framework for patient cetered design optimization of lower limb exoskeletons, IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2015), 2015.

- [Kolakowsky-Hayner2013] S. A. Kolakowsky-Hayner, J. Crew, S. Moran, and A. Shah, Safety and Feasibility of using the Ekso™ Bionic Exoskeleton to Aid Ambulation after Spinal Cord Injury. *J Spine S4:003*. doi: 10.4172/2165-7939.S4-003, 2013.
- [Lacey2008] G. Lacey and D. Rodriguez-Losada, The evolution of guido, *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, Vol. 15, no. 4, pp. 75–83, 2008.
- [Lee2000] C.-Y. Lee and J.-J. Lee, Walking-support robot system for walking rehabilitation: design and control, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 4, no. 4, pp. 206–211, 2000.
- [Médéric2004] P. Médéric, V. Pasqui, F. Plumet, P. Bidaud, and J. Guinot, Design of a walking-aid and sit-to stand transfer assisting device for elderly people, 7th International Conference on Climbing on Walking Robots (CLAWAR04), Madrid, Spain, 2004.
- [Mombaur2017] K. Mombaur and K.-L. Ho Hoang, How to best support sit to stand transfers of geriatric patients: Motion optimization under external forces for the design of physical assistive devices, *J. Biomechanics*, Vol. 58, pp. 131–138, 2017.
- [Montemerlo2002] M. Montemerlo, J. Pineau, N. Roy, S. Thrun, and V. Verma, Experiences with a mobile robotic guide for the elderly, *AAAI/IAAI*, pp. 587–592, 2002.
- [Morris2003] A. Morris, R. Donamukkala, A. Kapuria, A. Steinfeld, J. T. Matthews, J. Dunbar-Jacob, and S. Thrun, A robotic walker that provides guidance. *Proceedings of ICRA'03, Robotics and Automation, IEEE International Conference on Robotics*, Vol. 1, pp. 25–30, IEEE, 2003.
- [Pollack2002] M. E. Pollack, L. Brown, D. Colbry, C. Orosz, B. Peintner, S. Ramakrishnan, S. Engberg, J. T. Matthews, J. Dunbar-Jacob, C. E. McCarthy, et al., Pearl: A mobile robotic assistant for the elderly, *AAAI workshop on automation as eldercare*, pp. 85–91, 2002.
- [Rentschler2008] A. J. Rentschler, R. Simpson, R. A. Cooper, and M. L. Boninger, Clinical evaluation of guido robotic walker, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 45, no. 9, pp. 1281–1294, 2008.
- [Rockwood2005] K. Rockwood, X. Song, C. MacKnight, H. Bergman, D. B. Hogan, I. McDowell, and A. Mitnitski, A global clinical measure of fitness and frailty in elderly people, *CMAJ*, Vol. 173, no. 5, pp. 489–495, 2005.
- [Saint-Bauzel2009] L. Saint-Bauzel, V. Pasqui, and I. Monteil, A reactive robotized interface for lower limb rehabilitation: clinical results, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, no. 3, pp. 583–592, 2009.
- [Salah2011] O. Salah, A. Ramadan, S. Sessa, and A. Abo-Ismael, A systematic approach for design a lowcost mobility assistive device for elderly people, in *Proceedings of Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Engineering (ICBCBBE), International Conference on*, pp. 571–576, 2011.

- [Shim2005] H.-M. Shim, E.-H. Lee, J.-H. Shim, S.-M. Lee, and S.-H. Hong, Implementation of an intelligent walking assistant robot for the elderly in outdoor environment, in 9th IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp. 452–455, 2005.
- [Siciliano2016] B. Siciliano and O. Khatib, Springer Handbook of Robotics, 2nd edition, Springer, 2016.
- [Wall2015] A. Wall, J. Borg, and S. Palmcrantz, Clinical Application of the Hybrid Assistive Limb (HAL) for Gait Training—a Systematic Review, *Frontiers in Systems Neuroscience* 9, 48, 2015
- [Xiloyannis2016] M. Xiloyannis, L. Cappello, D. B. Khanh, C. W. Antuvan, and L. Masia, Preliminary design and control of a soft exosuit for assisting elbow movements and hand grasping in activities of daily living, *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering (RATE)*, October, 2016.
- [Yu2003] H. Yu, M. Spenko, and S. Dubowsky, An adaptive shared control system for an intelligent mobility aid for the elderly, *Autonomous Robots*, Vol. 15, no. 1, pp. 53–66, 2003.

Über die Autoren

Katja Mombaur hat Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart und in Toulouse studiert und im Jahr 2001 in Mathematik promoviert. Nach Stationen in Südkorea und Frankreich wurde sie 2010 Professorin am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg und wechselte 2017 ans Institut für Technische Informatik (ZITI). Dort leitet sie den Lehrstuhl „Optimierung, Robotik und Biomechanik“ sowie das zugehörige Robotiklabor und das „Heidelberg Center for Motion Research“.

Katja Mombaur ist als Principal Investigator an den Europäischen H2020-Projekten SPEXOR and Eurobench, der Graduiertenschule Heidelberger Graduiertenschule HGS MathComp und mehreren nationalen Projekten beteiligt. Sie koordinierte sie im Rahmen des EU FP7-Programms das Projekt Koroibot und wirkte als PI an den Projekten MOBOT and ECHORD-GOP mit. Sie ist Gründungsvorsitzende des Technischen Komitees der IEEE RAS für Modell-basierte Optimierung in der Robotik. Die Schwerpunkte ihrer wissenschaftlichen Arbeit umfassen die Erforschung der grundlegenden Prinzipien menschlicher Bewegungen und den Transfer dieser Kenntnisse zur Verbesserung der Bewegungen von Menschen und humanoiden Robotern in verschiedenen Situationen und zur Entwicklung und Regelung von Exoskeletten, Prothesen und externen physischen Assistenzsystemen zur Bewegungsunterstützung.

Davide Corradi hat Biomedizinische Ingenieurwissenschaften und Robotik an der Universität von Genua und der Ecole Centrale de Nantes studiert. Zwischen 2013 und 2016 hat er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Optimierung, Robotik und Biomechanik“ an der Universität Heidelberg zum Thema Mobilitätsassistenzroboter gearbeitet. Seit 2016 ist er Software Entwickler bei der SAP SE.

Khai-Long Ho-Hoang hat im Jahr 2017 seine Promotion in angewandter Mathematik an der Universität Heidelberg abgeschlossen. Bis dahin hat er in der Arbeitsgruppe Optimierung, Robotik & Biomechanik am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen sowie im Bewegungslabor der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie am Universitätsklinikum Heidelberg hauptsächlich zu Fragen zur Stabilität der menschlichen Fortbewegung im Kontext mit intelligenten Mobilitätsassistenzsystemen und Oberschenkelprothesen geforscht. Seine Arbeit wurde von 2010 bis 2013 durch die Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences (HGSMathComp) sowie von 2013 bis 2016 durch das EU-Projekt MOBOT gefördert. Seit 2018 ist er als Softwareentwickler und IT-Berater bei der iteratec GmbH, München tätig.

Alexander Schubert studierte Mathematik und Physik an der Universität Heidelberg, wo er 2017 auch promoviert wurde. Im Rahmen seines unter anderem durch die Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences (HGSMathComp) geförderten interdisziplinären Promotionsprojekts arbeitete er an der Schnittstelle zwischen Mathematik und Robotik sowie Psychologie und Kunst. Seit März 2018 ist er Scientific Manager des „Heidelberg Center for Motion Research“.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Katja Mombaur
Institut für Technische Informatik (ZITI)
Universität Heidelberg
Berliner Str. 45
69120 Heidelberg
E-Mail: katja.mombaur@ziti.uni-heidelberg.de
Homepage: <http://www.orb.uni-hd.de>