

# EU Projekt FourByThree

Auf dem Weg zu eigensicheren Robotern

José de Gea Fernández, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz  
und Marc Ronthaler, Ground Truth Robotics GmbH

Seit einiger Zeit ist zu beobachten, dass Eigenschaften von Haushalts- oder Servicerobotern in Produktionsumgebungen Einzug halten, wo sie Kooperation ermöglichen und damit die Voraussetzung für einen von Mensch und Maschine gemeinsam genutzten Arbeitsraum schaffen. Dieser Beitrag stellt einige der bereits kommerziell erhältlichen Systeme vor, untersucht die technologischen Voraussetzungen, die über die letzten Jahre am DFKI Robotics Innovation Center auf diesem Gebiet entwickelt wurden und gibt einen Ausblick anhand der aktuellen Entwicklungen im EU Projekt FourByThree.

Bis vor einiger Zeit wurden die meisten Industrieroboter durch Käfige gesichert, in denen sie mit hoher Geschwindigkeit und millimetergenau arbeiteten. Externe Sensoren überwachten die Annäherung von Personen an den Arbeitsbereich des Roboters, um Unfälle durch eine Kollision mit dem üblicherweise großen und schweren Roboter zu vermeiden. Diese Situation ändert sich zunehmend.

Zwar ist nicht zu erwarten, dass die klassischen Anwendungen für Industrierobotik mittelfristig kooperativ von Mensch und Roboter umgesetzt werden: Industrieroboter, die bspw. schweißen oder lackieren, werden sich auf lange Zeit nicht verändern. Hingegen ist bereits jetzt zu erkennen, dass in bislang überwiegend oder ausschließlich manuell geprägten Anwendungsfeldern, in denen menschliche Kognition, (manuelle) Geschicklichkeit oder langjährige Erfahrung unersetzlich sind, Roboter zur Unterstützung des Menschen eingesetzt werden. Hier müssen sich Mensch und Roboter den Arbeitsraum zumindest zeitweilig teilen und ein Körperkontakt kann nicht ausgeschlossen werden.

Beispiele für im Handel erhältliche Roboter

Diese neue Generation von Robotern ist darauf ausgelegt, maximale Flexibilität in der intuitiven Programmierung für eine große Bandbreite von Aufgaben zu bieten, sodass Anwender ohne besondere Kenntnisse in kurzer Zeit den Roboter für neue Aufgaben einsetzen können.

Andererseits sind diese Roboter aus naheliegenden Gründen nicht so präzise, schnell oder stark wie herkömmliche Industrieroboter: Es ist also ein Kompromiss nötig zwischen der Eigensicherheit in Folge einer leichten, potenziell flexiblen und damit nicht so präzise einsetzbaren Struktur und einer hohen Präzision in Folge großer struktureller Steifigkeit, die mit hohem Gewicht und damit einem großen Gefährdungspotenzial einhergeht.

Im Folgenden werden einige der Unterscheidungsmerkmale dieser neuen Roboter aufgezählt:

- Keine großen, sondern humane Geschwindigkeiten und Lasten.
- Kooperation mit Menschen bei repetitiven Aufgaben mit geringem kognitivem Anspruch, kein bloßer Ersatz des Menschen.
- Explizit ausgelegt, um sicher mit Menschen zusammenarbeiten zu können.
- Einsatz in kurzlaufenden Produktionsszenarien mit hoher Dynamik, an die sie sehr schnell adaptiert werden können.
- Intuitiv zu programmieren von beinahe jeder Fachkraft am Einsatzort. Benötigen nur sehr wenig Zeit, bis sie für eine neue Aufgabe konfiguriert sind.

Ziel einer schnellen Amortisation

Das erste Beispiel von im Handel erhältlichen Robotern, die eine Berührung von Mensch und Maschine erlauben, sind Baxter und Sawyer,

## European Project FourByThree: Towards Inherently-Safe Robots

In recent years some of the characteristics of robots designed for home or service robotics have been introduced in the industrial sector, enabling the collaboration and the sharing of common workspaces between human and robots. This article reviews some of the commercially available new generation robots, the enabling technologies being developed at DFKI Robotics Innovation Center over the last years, as well as the current developments within the European project FourByThree.

### Keywords:

human robot cooperation, intrinsically safe robots, workspace sharing, robotics in manufacturing, safety



Dr. José de Gea Fernández arbeitet als Teamleiter des Teams „Roboterregulierung“ im Robotics Innovation Center des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Bremen.



Dr. Marc Ronthaler ist Geschäftsführer der Ground Truth Robotics GmbH in Bremen.

robotik@dfki.de  
www.dfki.de/robotik

die von Rethink Robotics [1] entwickelt wurden. Ersterer ist ein zweiarmiges System überwiegend für den Einsatz in der Forschung, letzterer ein robustes einarmiges System für den industriellen Einsatz. Das wesentliche Merkmal dieser Roboter ist ihre intrinsische Sicherheit in der Arbeit mit Menschen: Ihre Arme sind (mechanisch) nachgiebig, sodass eine Kollision ausreichend gedämpft wird. Ermöglicht wird dies durch elastische Elemente (in Serie angebrachte mechanische Federn) in den Motoren der Arme, sodass auch im Falle einer Softwarefehlfunktion oder eines Stromausfalls der Roboter sich immer (mechanisch) nachgiebig im Kontakt verhält.

Ein weiteres Beispiel sind die Roboter der dänischen Firma Universal Robots [2] – eine Ausgründung der University of Southern Denmark – die auf der Grundlage der aktuellen Standards zertifizierbar sind für den Einsatz in den meisten Anwendungen, die eine Mensch-Roboter-Kooperation voraussetzen.

Ebenfalls Ergebnis des Transfers aus der Wissenschaft in die Wirtschaft ist der KUKA LBR iiwa Roboter [3], der auf vom DLR entwickelten leistungsstarken Aktuatoren beruht, die erstmals

Drehmomentsensoren in jedem Gelenk verfügbar machen und so präzise dynamische Kontrolle des Roboters und damit Nachgiebigkeit durch aktive Impedanzregelung ermöglichen. Auf diese Weise kann die Nachgiebigkeit des Roboters innerhalb von Millisekunden an externe Kräfte angepasst werden, um Kollisionen zu dämpfen – ähnlich wie mit einer

mechanischen Feder, aber in diesem Fall allein durch den Einsatz von Software. Die Drehmomentsensoren geben zudem sofortigen Aufschluss über einen Kontakt des Roboters mit der Umwelt und erlauben so eine Kollisionserkennung und eine schnelle Reaktion.

Vier Modi der Mensch-Roboter-Kooperation (ISO Norm 10218)

Der ISO Norm 10218 ("Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter") fol-

gend sind derzeit vier Modi der Mensch-Roboter-Kooperation definiert:

- Sicherheitszertifizierter, überwachter Systemstopp, in dem kein Kontakt zwischen Mensch und Maschine besteht und der Roboter sich nicht bewegt, wenn der Mensch den gemeinsamen Arbeitsraum betritt, um bspw. den Roboter zu be- oder entladen. Erst nachdem der Mensch den Arbeitsraum verlassen hat, nimmt der Roboter die Arbeit wieder auf.
- Handführung, bei der der Roboter sich nur durch direkte Führung des Menschen bewegt, bspw. indem der Mensch den Endeffektor des Roboters führt.
- Geschwindigkeits- und Distanzüberwachung mithilfe eines externen Sensors (üblicherweise Kamera oder Laserscanner), der zu jeder Zeit einen Minimalabstand zwischen Mensch und Roboter sicherstellt. Der Mensch kann in unmittelbarer Nähe zum nicht umzäunten Roboter arbeiten, der bei Unterschreitung einer Mindestdistanz stoppt.
- Schließlich und heutzutage am interessantesten, die Beschränkung von Leistung und Kraft des Roboters durch inhärente Designmerkmale oder durch Steuerungssoftware. In diesem Modus ist der physische Kontakt zwischen Mensch und Roboter erlaubt, wobei allerdings der Roboter dahingehend zertifiziert sein muss, dass die Kontaktkräfte bestimmte Schwellwerte nicht überschreiten.

Die ersten drei Kooperationsmodi können in den meisten heute existierenden Anwendungsszenarien für Industrieroboter angewandt werden. Der vierte Modus jedoch erfordert wie beschrieben eine neue Generation von Robotern, die sicherstellt, dass die maximalen Kontaktkräfte eingehalten werden.

Baxter und der neue Sawyer erfüllen die Anforderungen des vierten Modus der Mensch-Roboter-Kooperation der ISO Norm 10218 von 2006. Allerdings enthält die aktuelle ISO Norm 10218 von 2012 keine Grenzwerte für Leistung und Kraft – diese werden erst in der für Ende 2015 erwarteten technischen Spezifikation ISO TS 15066 definiert und sollen nachfolgend in die ISO 10218 integriert werden.

Im Gegensatz zum Baxter sind die Roboter von Universal Robots nicht inhärent sicher, sondern nutzen verschiedene Maßnahmen, die im ISO Standard beschrieben werden: Geschwindigkeitsreduktion, wenn externe Sensoren die Annäherung einer Person feststellen und insbesondere die Begrenzung der maximalen Kräfte. Letzteres wird durch ein patentiertes Verfahren

**Bild 1: Aktiv nachgiebiger Roboter COMPI (Quelle: Annemarie Hirth, DFKI GmbH).**



erreicht, das ohne einen zusätzlichen Sensor, allein auf den Motorströmen basierend, die Drehmomente der Gelenke bestimmt und daraus die maximale Kraft des Endeffektors ableitet. Die KUKA iiwa Roboter können ebenfalls den vierten Modus der ISO Norm erfüllen, da durch die Drehmomentsensoren in jedem Gelenk eine Begrenzung der Kräfte möglich ist.

Entwicklungen auf diesem Gebiet am DFKI Robotics Innovation Center

Am DFKI Robotics Innovation Center wurden im Laufe der letzten Jahre verschiedene Technologien für diesen Kooperationsmodus entwickelt:

Einerseits wurde an der Kontrollsoftware gearbeitet, um Nachgiebigkeit durch aktive Impedanzregelung und eine präzise dynamische Regelung des Roboters zu erreichen. Ein erstes Beispiel für diese Arbeiten ist der Leichtbaurobter COMPI [4], der Entwicklungen und Ergebnisse des Projekts BesMan [5] im Bereich der dynamischen Regelung aufgreift, um Mensch-Roboter-Kooperation in einem industriellen Szenario zu ermöglichen. Dynamische Regelung beruht auf der Identifikation des Modells der Dynamik des Roboters und dem Einsatz dieses Modells für die präzise Impedanzregelung. Ein aktiv nachgiebiger Roboter berechnet mithilfe des Modells die exakt benötigten Drehmomente, um sich zu bewegen oder um eine Position zu halten. Diese Drehmomente sind das Minimum, um die Bewegung durchzuführen oder die Position zu halten – jede externe Kraft wird den Roboter aus seiner Trajektorie oder von seiner Zielposition entfernen. Dies wird in einigen Anwendungsfällen unerwünscht sein, ist zugleich aber von entscheidender Bedeutung, wenn die externe Kraft aus dem Kontakt mit einem Menschen resultiert, der den Arbeitsraum mit dem Roboter teilt.

Der Roboterarm verwendet eine verteilte Gelenkregelung, indem jedes einzelne Gelenk mit einer eigenen Elektronik inkl. Rechenkapazität, Leistungselektronik und lokaler Sensorik für bspw. Gelenkposition und Motorströmen ausgestattet ist. Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine sehr gute Performanz in der Positionsverfolgung sowie in der Nachgiebigkeit gegenüber externen Kräften (siehe Video in [6]). Weiterhin erlaubt die dynamische Regelung die Auswahl verschiedener, zur Laufzeit verfügbarer Kontrollmodi:

- Gravitationskompensation (der Roboter hält sein eigenes Gewicht und kann mit der Hand an jede beliebige Position gebracht werden)

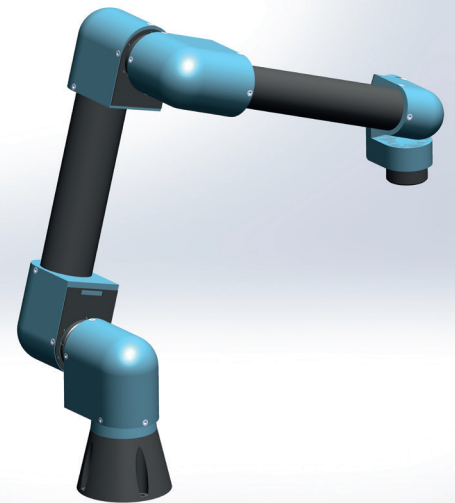
- variable Steifigkeit (der Roboter kann eine Position mit einem einstellbaren Widerstand halten, d. h. er kehrt nach einer Ablenkung an die ursprüngliche Position zurück)
- Folgen einer bestimmten Trajektorie, um eine bestimmte Aufgabe mit hoher Präzision zu erfüllen und zugleich nachgiebig gegenüber externen Kräften wie bspw. unerwarteten Kollisionen oder Kontakten zu sein

Diese Systemeigenschaften werden derzeit im Projekt HySociaTea [7] eingesetzt und mit anderen multimodalen Eingabequellen wie bspw. Gestenerkennung angereichert.

Parallel dazu wurde ein eigensicheres Roboterdesign mit passiver Nachgiebigkeit basierend auf sogenannten elastischen Aktuatoren eines Exoskeletts im Rahmen des Projekts CAPIO [8] entwickelt. Diese Aktuatoren verfügen – im Gegensatz zu früheren DFKI Aktuatoren [9] – über eine mechanische Feder seriell zu den Motoren [10], die auf diese Weise einen sogenannten seriell elastischen Aktuator (SEA) erzeugen. Im Besonderen handelt es sich hier um einen rotatorischen SEA, ähnlich zu den Aktuatoren in dem zuvor beschriebenen Baxter. Im Fall von CAPIO lag die Idee zugrunde, die Drehmomente in den Gelenken auf eine vergleichsweise einfache und kompakte Weise zu messen, um die dynamische Regelung eines Exoskeletts zu implementieren und um aus Sicherheitsgründen die Drehmomente zu überwachen.

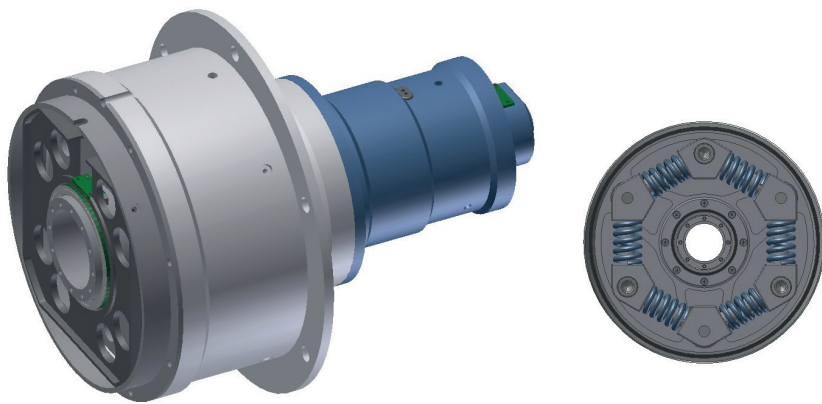
Das Projekt FourByThree [11] hat zum Ziel, eine neue Generation modularer industriell robotischer Lösungszu entwickeln, die eine effiziente Aufgabenausführung in Zusammenarbeit mit Menschen sicher ermöglichen und darüber hinaus einfach in der Handhabung und durch einen Werkstattmitarbeiter ohne besondere Vorkenntnisse zu programmieren sind. Das Akronym des Projekts verweist auf die beiden Schwerpunkte des Projekts, nämlich die vier wesentlichen Eigenschaften eines zukünftigen FourByThree Roboters (Modularität, Sicherheit,

**Bild 2: Konzeptuelles Design einer der möglichen Konfigurationen eines FourByThree Manipulators (Quelle: ZEMA GmbH).**



#### Literatur

- [1] Rethink Robotics. URL: <http://www.rethinkrobotics.com>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [2] Universal Robotics. URL: <http://www.universal-robots.com/de>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [3] KUKA LBR iiwa. URL: <http://www.kuka-lbr-iiwa.com>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [4] Bargsten, V.; de Gea Fernández, J.: COMPI: Development of a 6-DOF Compliant Robot Arm for Human-Robot Cooperation. In: Proceedings of the 8th International Workshop on Human-Friendly Robotics (HFR) 2015.
- [5] Projekt BesMan Behaviors for Mobile Manipulation. URL: <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/besman.html>, Abrufdatum 22.11.2015.



**Bild 3: Aktueller Stand des Designs eines elastischen Aktuators im Projekt FourByThree. Links: kompletter Antrieb, rechts: Detail des elastischen Elements (Quelle: Holger Sprengel / DFKI GmbH).**

Nutzerfreundlichkeit und Effizienz) sowie die drei wesentlichen Akteure (Mensch, Roboter, Umgebung) in Produktionsszenarien.

In diesem Projekt ist das DFKI RIC für die Entwicklung der neuen modularen Aktuatoren verantwortlich, die als Basis für den Bau der je nach Aufgabe morphologisch unterschiedlichen robotischen Manipulatoren dienen. Im Projekt wird an einer Kombination der beiden zuvor beschriebenen Konzepte gearbeitet: Nachgiebigkeit durch aktive Impedanzregelung (Verwendung von Dynamikmodellen, Überwachung der Motorströme zur Bestimmung der Drehmomente in den Gelenken etc.) und der Einsatz passiv elastischer Elemente, um relative Sicherheit im Fall von Kollisionen zu gewährleisten sowie eine sekundäre Quelle (im Sinne von Redundanz) für die Bestimmung der Drehmomente zu erhalten. Ein konzeptuelles Design des zukünftigen FourByThree Manipulators wird in Bild 2 gezeigt. Diese Roboter müssen in verschiedenen Einsatzszenarien flexibel verwendbar und daher einfach und schnell zu reprogrammieren sein.

Ausgehend vom CAPIO Design wurden die mechanischen Federn „weicher“ ausgelegt, um einen nicht intendierten Kontakt zu dämpfen – insbesondere im Falle eines Stromausfalls, der andere aktive sensorgestützte Sicherheitsstrategien verhindert. Eine geringere Steifigkeit macht die Aktuatoren (bis zu einem gewissen Grad) sicher, nachgiebiger und besser geeignet für eine robuste und präzise Kraftkontrolle, zugleich aber auch nicht so präzise in der Positionierung. Es ist also ein Kompromiss nötig zwischen der Positioniergenauigkeit und der Genauigkeit der Kraftkontrolle und der Nachgiebigkeit des Roboters. Weiterhin soll das in FourByThree entwickelte Element leicht und kompakt sein, weil ein daraus aufgebauter Leichtbauarm geringere Massenträgheit aufweist und damit die Sicherheit des Gesamtsystems erhöht, obwohl es natürlich auf die Paarung Masse/Geschwindigkeit ankommt. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass die mechanisch elastischen Elementen

te für verschiedene Anwendungen einfach austauschbar sein sollen: Im Rahmen des Projekts werden drei verschiedene Aktuatorgrößen mit Drehmomenten von 30Nm, 50Nm und 120Nm (Abtriebsseite) gebaut, sodass der Integrator mit dieser Auswahl für die in Frage stehende Anwendung einen spezifischen Manipulator erstellen kann. Die maximale Geschwindigkeit der Aktuatoren wird niedrig sein, weil Aufgaben im Rahmen der Mensch-Roboter-Kooperation wie oben erwähnt normalerweise keine hohen Geschwindigkeiten verlangen und zudem Sicherheitsvorschriften in der Mensch-Roboter-Kooperation hohen Geschwindigkeiten entgegenstehen. In den meisten Fällen sind Elastizitäten im Sinne der Sicherheit hilfreich, da Massen voneinander entkoppelt werden und die effektive Kollisionsmasse reduziert wird. Jedoch können mit elastischen Robotern auch höhere Geschwindigkeiten als bei klassischen Leichtbaurobotern erreicht werden, die wiederum die Gefahr erhöhen. Eine Beschränkung der Geschwindigkeit führt zu einer Reduktion der Verletzungen in Folge eines Zusammenstoßes [12] und erhöht so die intrinsische Sicherheit des Gesamtsystems.

Den gegenwärtigen Stand des Aktuatordesigns mit Schraubenfederkupplung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit zeigt Bild 3.

### Fazit

Industrieroboter haben ihre Stärken in vielen industriellen Anwendungen bewiesen, in denen sie einen hohen Grad an Präzision, Geschwindigkeit und Effizienz bieten. Wenn jedoch die Anwendung eine Kooperation von Mensch und Roboter erfordert, insbesondere einen gemeinsamen Arbeitsraum, dann sind unter Sicherheitsaspekten herkömmliche Industrieroboter nicht geeignet. Eine neue Generation von Robotern wird seit kurzer Zeit in echten Produktionsumgebungen eingesetzt. Industrie und Forschung arbeiten eng zusammen, um diese Roboter weiterzuentwickeln und in Anwendungsgebieten einzusetzen, für die es bislang keine oder kaum Automatisierungslösungen gibt.

### Schlüsselwörter:

Mensch-Roboter-Kooperation (MRK), eigensichere Roboter, gemeinsamer Arbeitsraum, Roboter in der Produktion, Sicherheit

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „FourByThree“, das von der Europäischen Kommission gefördert wird (grant agreement no: 637095; H2020-FoF-06-2014).*

- [6] COMPI Video. URL: [http://robotik.dfki-bremen.de/fileadmin/content/ric/media/videos/20150706\\_COMPI\\_Video\\_mit\\_info\\_web\\_720p.mp4](http://robotik.dfki-bremen.de/fileadmin/content/ric/media/videos/20150706_COMPI_Video_mit_info_web_720p.mp4), Abrufdatum 22.11.2015.
- [7] Projekt HySociaTea. URL: <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/hysociatea.html>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [8] Projekt CAPIO. URL: <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/capio.html>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [9] Bartsch, S.; Birnschein, T.; Langosz, M.; Hilljegerdes, J.; Kuehn, D.; Kirchner, F.: Development of the six-legged walking and climbing robot SpaceClimber. In: Journal of Field Robotics 29 (2012) 3, Special Issue on Space Robotics, S. 506-532.
- [10] Mallwitz, M.; Will, N.; Teiwes, J.; Kirchner, E. A.: The CAPIO Active Upper Body Exoskeleton And Its Application for Teleoperation. At ESA Symposium Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA) 2015.
- [11] Projekt FourByThree, URL: <http://fourbythree.eu/>, Abrufdatum 22.11.2015.
- [12] Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Safe physical human-robot interaction: measurements, analysis and new insights. In: Robotics Research 2011, S. 395-407.