



Eine neue Robotergeneration für Raumfahrt, Dienstleistung und Chirurgie

A new Roboter-Generation for Space, Service and Surgery

Gerd Hirzinger, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung Häufig wird die Robotik – insbesondere die Dienstleistungs- oder Service-Robotik – in ihrer Bedeutung für das neue Jahrhundert mit der Gen- und Biotechnologie verglichen. Vor allem Japan und Korea haben sich zum Ziel gesetzt, die erwarteten Milliarden-Märkte frühzeitig für sich zu erobern. Gefragt ist eine neue Generation von Robotern mit leichten, energieoptimalen Armen und geschickten mehrfingerigen Händen, die ein kleines Trägerfahrzeug oder eine Laufmaschine nicht überlasten. Die Anforderungen der Raumfahrt an mechatronische Höchst-Integration, Extrem-Leichtbau und minimalen Energieverbrauch tragen dazu bei, diesem Technologie-Defizit zu begegnen. Die entsprechenden Entwicklungen des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik und ihre Anwendungsperspektiven auf die terrestrische Service- und Chirurgierobotik sind die Kernelemente dieses

Beitrags. ▶▶▶ **Summary** Quite often robotics – particularly service-robotics – is compared with genetic- and bio-technology research concerning the impact on the new century. Japan and Korea are aiming towards capturing the billion dollar markets at an early stage. In vision is a new generation of robots incorporating lightweight, energy-optimised arms and dexterous multi-fingered hands that do not overload a small carrier vehicle or a walking mechanism. The requirements on space technology with respect to high mechatronic integration, extreme lightweight construction and minimal energy consumption help to fill this technology gap. The recent developments of DLR's Institute of Robotics and Mechatronics and the perspective of their applications for terrestrial service and surgery robots are key topics of this paper.

KEYWORDS I.2.9 [Computing Methodologies: Artificial Intelligence: Robotics] J.2 [Computer Applications: Physical Sciences and Engineering: Areospace] J3 [Computer Applications: Life and Medical Sciences] robotics, service robots, surgery robots / Robotik, Serviceroboter, Chirurgierobotik

1 Die Leichtbau-Robotik (LBR)-Entwicklungen des DLR

1.1 Struktur und Antriebstechnik

Drei Generationen von neuartigen Leichtbau-Robotern wurden in den letzten 15 Jahren am DLR-Institut für Robotik und Mechatronik entwickelt.

Allen drei Generationen waren (bzw. sind) zwei wesentliche Eigenschaften gemein:

- kinematische Redundanz, d. h. sieben Bewegungsfreiheitsgrade wie beim menschlichen Arm, so dass der Ellbogen „verdrehbar ist“, während sich die Handposition/-lage nicht verändert, und

- Drehmomentregelung in allen Gelenken und damit Einstieg in die Technologie der „soft robotics“.

Für die Leichtbauweise eines Roboters sind nicht so sehr die Armstrukturen ausschlaggebend (bei Faserverbund-Werkstoffen fast vernachlässigbar), sondern die Aktuatorik, also die Gelenk-Antriebe.

Entwicklungsziel der 1999 begonnenen dritten Leichtbauroboter-Generation LBR III war es daher, aufbauend auf den Erfahrungen mit LBR I und II (Bild 1) ein an die Grenzen des heute technisch Machbaren gehendes System zu realisieren.

Das neue Konzept zielte auf ein modulares Baukastensystem aus ultraleichten Faserverbundschalen-

strukturen mit wenigen Grundkomponenten ab, aus denen man Roboter individuell konfigurieren kann, d. h. wahlweise mit symmetrischer oder asymmetrischer Kinematik. Zu jedem Gelenk gehören drei hochintegrierte kreisförmige Platinen (inklusive der Signalprozessorplatine für die 3 kHz-Gelenkregelung), die nach Abnahme der zugehörigen Abdeckung in der „aufgeschnit-

tenen“ Faserverbundstruktur direkt zugänglich sind für Wartungs- und Reparatur-Arbeiten (Bild 2 und Bild 6).

Die hochintegrierten Gelenkantriebe (Bild 4) zeichnen sich durch eine komplette Zustandserfassung über miniaturisierte Sensoren aus, für die abtriebsseitige Positionserfassung ein lasergetrimmtes Leitplastik-Potentiometer und zur abtriebsseitigen Messung der Gelenkdrehmomente ein neuer Gelenkmomenten-Sensor (Bild 3). Auf den radial angeordneten vier Biegebalcken wurden jeweils zwei Dehnungsmessstreifen angebracht und zu zwei Vollbrücken aufgebaut, die zur Kompensation von Störkräften und -momenten verschaltet wurden.

Die vergleichsweise elastischen Harmonic Drive Getriebe im LBR III forderten eine aktive Schwingungsdämpfung geradezu heraus. Aufgrund des hohen Gewichtes kommerzieller Sicherheitsbremsen wurde eine Neuentwicklung einer nur 130 g schweren elektromagnetischen Bremse nötig.

Den entscheidenden Innovationssprung bei der Entwicklung von LBR III aber brachte der nach aufwändigen multiphysikalischen Simulationen entwickelte Multipol-Motor ROBODRIVE. Sein Konzept der Einzelpolwicklung wurde ganz gezielt auf die Anforderungen der Robotik (hohe Dynamik bei ständig reversierender Bewegung, aber mäßiger Geschwindigkeit) hin optimiert (Bild 5). So entstand ein Motortyp, der nur mehr das halbe Gewicht und die halbe Verlustleistung, verglichen mit den besten kommerziell verfügbaren Motoren, aufwies.

Entstanden ist letztendlich eine auch ästhetischen Ansprüchen genügende, formschöne Robotergeneration, die inzwischen mit mehreren Designpreisen ausgezeichnet wurde (Bild 6).

1.2 Regelung der Arme

Die multisensorielle Ausstattung der Leichtbauroboter (mit motor- und abtriebsseitigen Positionsen-

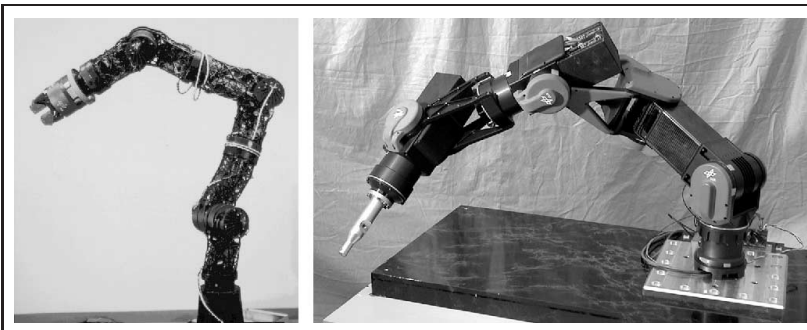


Bild 1 Entwicklungshistorie: LBR I (ca. 1994, links) und LBR II (im Jahre 1999, rechts).

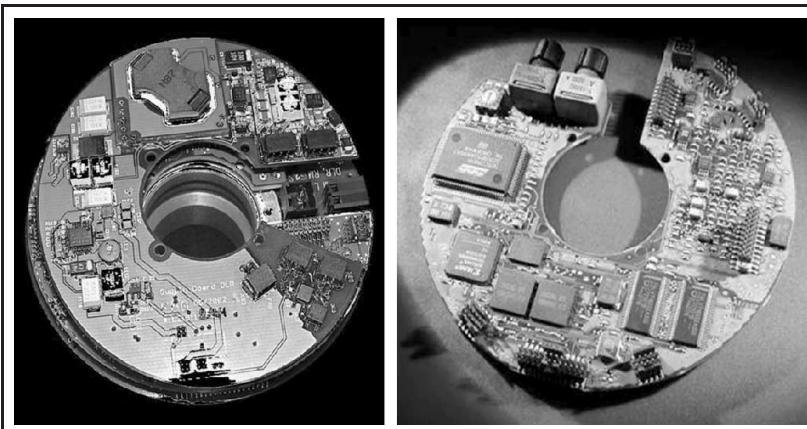


Bild 2 Hochintegrierte Versorgungselektronik (links) und Signalverarbeitungsplatine (rechts).

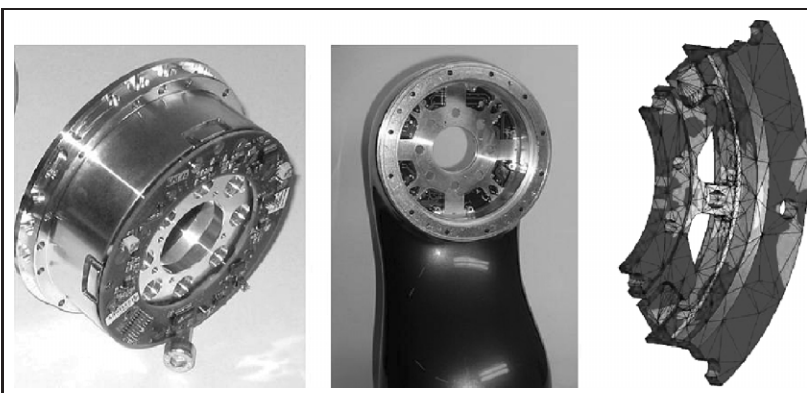


Bild 3 Drehmomentsensor als Speichenrad auf DMS-Basis, optimiert mit FEM-Methoden.

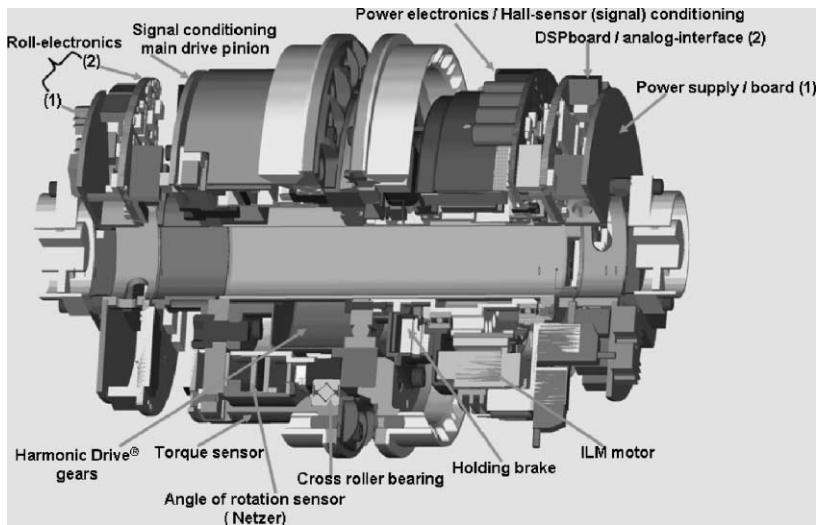


Bild 4 Hohe Integrationsdichte im LBR III-Gelenk.

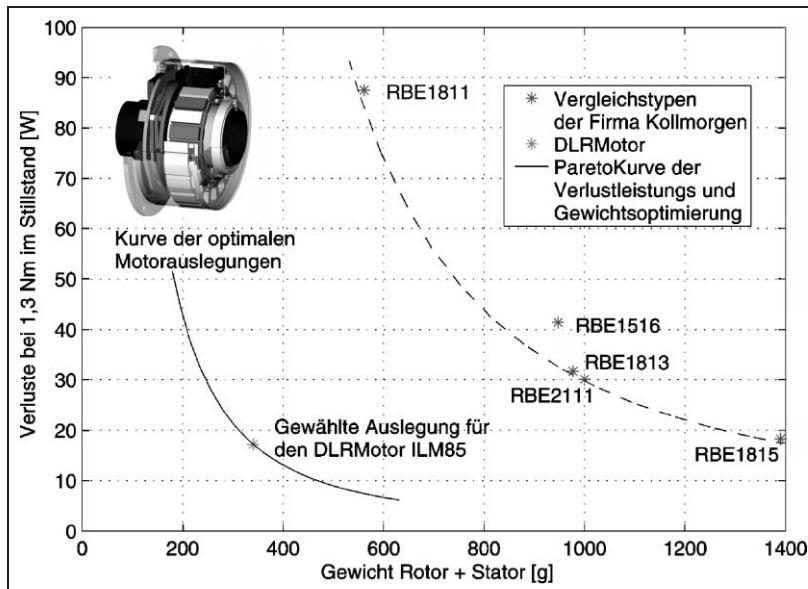


Bild 5 Vergleich des DLR-Motors mit den besten kommerziell verfügbaren High-End Motoren.

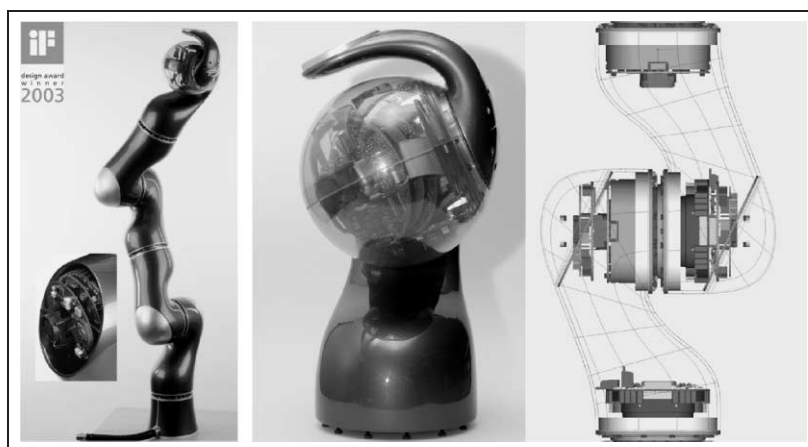


Bild 6 Realisierung des LBR III mit rekonfigurierbarem, kugelförmigem 2-Achs-Handgelenk und vollständig integrierter Elektronik.

soren sowie mit Drehmomentsensoren in jedem Gelenk) machte die Implementierung neuartiger Regelungskonzepte (Bild 7) möglich, die z. B. Gravitationskompensation erlauben, aber auch eine Reaktions-schnelligkeit auf externe Kräfteinwirkungen (entlang der gesamten Armstruktur) gewährleisten, die mit konventioneller Kraftmessung an der Roboterspitze nicht erreicht werden kann. Dadurch wird die Geschwindigkeit bei Ausführung von Montageaufgaben vergleichbar mit der eines Menschen.

Jedes Robotergelenk verfügt über einen lokalen Signalprozessor zur Regelung der schnellen dynamischen Vorgänge im Gelenk (3kHz). Durch Vorgabe der gewünschten Steifigkeit kann der Regler online zwischen Drehmoment-, Positions- oder Steifigkeits-Regelung umschalten. In der zentralen Robotersteuerung wird die dynamische Verkopplung zwischen den Gelenken kompensiert sowie die koordinierte kartesische Bewegung des Roboters gesteuert. Hier erfolgt auch die optimale Einstellung der Gelenkregler abhängig von der aktuellen Roboterkonfiguration.

Durch wenige Parameteränderungen kann dem Arm beliebige kartesische Impedanz verliehen werden, so dass er z. B. als frei programmierbare Feder wirkt (ggf. unterschiedlich steif in unterschiedlichen Raumrichtungen) oder mehr einer trägen Masse gleicht, die man feinfühlig wegschieben kann (Bild 8). Mit seiner letztlich über den ganzen Arm verteilten Nachgiebigkeit kann er die Umgebung gefahrlos abtasten („explorieren“). Er kann aber auch durch einfaches „bei der Hand nehmen“ (und gleichzeitig aktiver Schwerkraft-Kompensation) durch den menschlichen Operateur im Bereich weniger Minuten schwierige Fügevorgänge erlernen, die er dann (z. B. bei viel höherer Geschwindigkeit) unter Nutzung seiner inhärenten, gefühlvollen Nachgiebigkeit sofort wiederholt.

Die Antriebseinheiten (Motor, Getriebe, Bremsen, Lager usw.) der

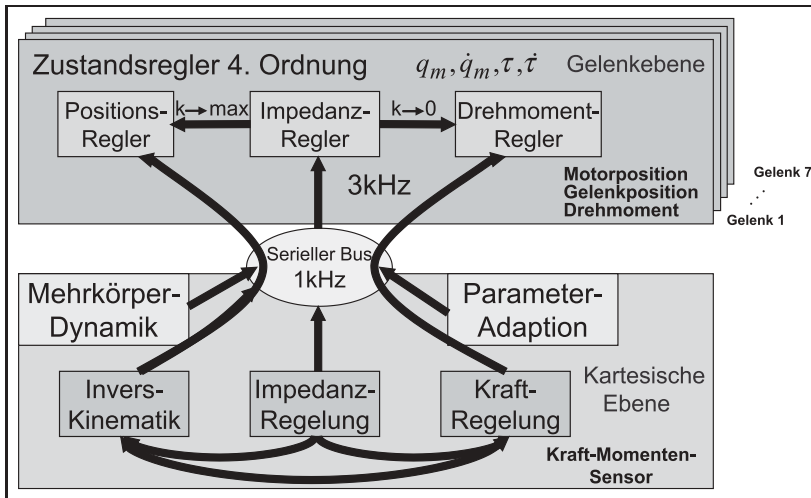


Bild 7 Reglerarchitektur für die DLR-Leichtbau-Roboter.



Bild 8 LBR II wischt einen Tisch ab und weicht gleichzeitig den Berührungen des Menschen aus (Nullraumbewegung des Ellbogens).

unteren Achsen liegen typischerweise nur mehr bei 1,2–1,4 kg, bei abgegebenen Drehmomenten bis zu 180 Nm. Mit den kaum mehr als 100 g wiegenden Faserverbund-Arm-Segmenten und der vollintegrierten Elektronik plus komplett durch die Hohlwellen geführter Verkabelung liegt das 7-Achs-Armgewicht für einen 1,20 m Arm bei 13 kg mit einer Traglast, die bei ca. 20 kg, also spürbar darüber liegt. Ganze drei Kabel sind noch im Inneren des Arms geführt, und der maximale Energieverbrauch liegt bei nur 150 Watt – eine Größenordnung niedriger als bei herkömmlichen industriellen Systemen.

2 Die DLR-Hände

2.1 Entwicklungsziele

Sollen Roboter in Umgebungen arbeiten, die eigentlich für den Men-

schen entwickelt wurden und in denen dieser ggf. gemeinsam mit dem Roboter als Assistenten agieren soll, dann kommt man mittelfristig um die Entwicklung „anthropomorpher“, also der menschlichen Hand nachempfunderer künstlicher Hände nicht herum.

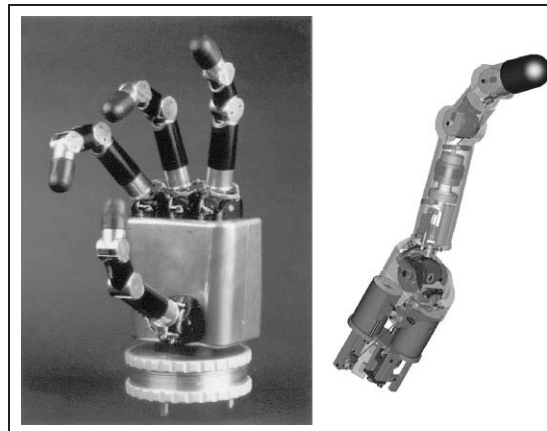


Bild 9 Hand I, stark auf Seilzugtechnik basierend.

Entsprechend wurden die Arm-Entwicklungen des DLR ergänzt durch die Entwicklung künstlicher 4-Finger-Hände mit 12 bzw. 13 Bewegungsfreiheitsgraden. Bereits die erste, 1998 einsetzbare DLR-Hand I (Bild 9) galt mit ihren nahezu 1000 mechanischen und 1500 elektrischen Komponenten als die weltweit komplexeste aller bisher gebauten Roboter-Hände. Zum ersten Mal war es gelungen, alle 12 Antriebe in die Hand zu integrieren. Die dabei eingesetzten Seilzüge (sie sollten die menschlichen Sehnen imitieren) in Verbindung mit dem auf der weltweit patentierten DLR-Spindel beruhenden „künstlichen Muskel“ wiesen allerdings Mängel in Bezug auf Wartung und Dauerbelastung auf.

Die zweite Generation der DLR-Hand, erstmals 2002 vorgestellt, besteht u. a. durch einen noch wesentlich höheren Grad der Elektronik-Integration. Ein 13. Aktuator erzeugt sogar eine rekonfigurierbare Handfläche (d.h. seitliche Bewegung der Daumenwurzel) und statt 400 sind nunmehr 12 Leitungen zur „Außenwelt“ erforderlich (Bild 10).

Ziel der Neuentwicklung war es darüber hinaus, Störparameter wie Hysterese, Reibung, usw. zu minimieren, Geschwindigkeit und Maximalkraft der Finger zu steigern sowie die Wartbarkeit zu verbessern.

Beide DLR-Hände bzw. deren Finger wurden systematisch auf ihre Manipulationsfähigkeit und die



Bild 10 LBR III mit Hand II.

Optimalität ihrer Kinematik untersucht, insbesondere bzgl. der Gliedlängenverhältnisse der einzelnen Finger. Ein wichtiges Designziel der DLR-Hände war (trotz des fehlenden fünften Fingers) die Ähnlichkeit zur menschlichen Hand.

2.2 Die Antriebstechnik und Sensorik der Hand II

Für die häufigsten Arten der Manipulation sind zwei Freiheitsgrade in der Basis notwendig. Die DLR-Hand II realisiert einen Mechanismus, bei dem sowohl die Leistung als auch die Momente beider Aktuatoren gleichzeitig für „Abduktion und Adduktion“ des Fingers herangezogen werden. Dies wird durch Einsatz eines differentiellen Kegelradgetriebes erreicht (Bild 11).

Insgesamt wurde die maximale Kraft, die senkrecht zur ausgestreckten Fingerspitze ausgeübt werden kann, auf 30 N erhöht. Die Leistungselektronik zur Ansteuerung der elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren ist direkt in den Finger integriert, in unmittelbarer Nähe der Motoren. Dadurch wird die Verkabelung reduziert und mögliche Störungen werden minimiert.

Der deutlich höhere Wirkungsgrad des Antriebs bewirkt neben der Erhöhung der Greifkraft eine Erhöhung der maximalen Verfahrgeschwindigkeiten im Basisgelenk von 120°/s auf 360°/s und von 180°/s auf 400°/s im Finger.

Für einen dauerhaften Einsatz war ein wartungsfreundlicher Aufbau der Finger in Form einer Skelettstruktur notwendig. Damit ist ein Wechseln der Zugmittel innerhalb nur weniger Minuten möglich. Zur Bestimmung der Gelenkwinkel wurde ein Leitplastikpotentiometer entwickelt, das sich optimal in die mechanische Struktur des Fingers einpasst und sich für alle Gelenke gleichermaßen eignet. Die Finger verfügen über drei Gelenkmomentensensoren in den Gelenken und einen sechsdimensionalen Kraft-Momenten-Sensor in der Fingerspitze (Bild 12).

2.3 Elektronik und Kommunikation

Mit miniaturisierten Bauelementen werden in den Fingern alle Sensorsignale vor Ort analog-digital gewandelt und seriell zum Regelungssystem übertragen (Bild 13). So enthalten die Finger in jedem Fingerglied einen seriellen A/D-Wandler mit jeweils acht Kanälen. Diese Konfiguration ermöglicht eine optimale Signalqualität, da keine analogen Signale mehr an potenziellen Störquellen vorbeigeführt werden müssen. Im Finger wurden die früher verwendeten Kabel durch eine teilflexible Leiter-

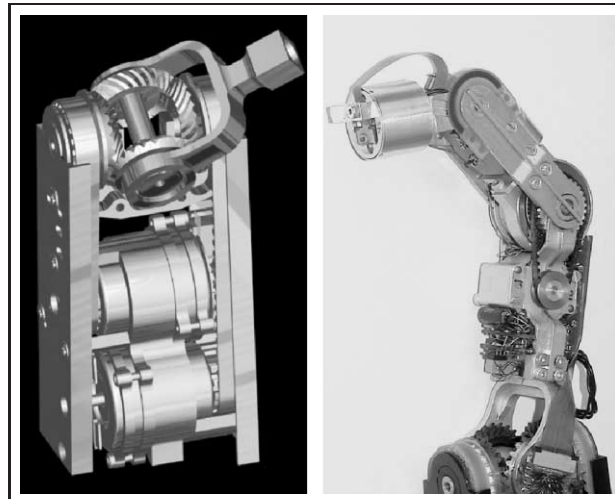


Bild 11 Differenzielles Kegelradgetriebe in der Finger-Basis, komplette Basiseinheit (links) und Skelettstruktur der Finger (rechts).

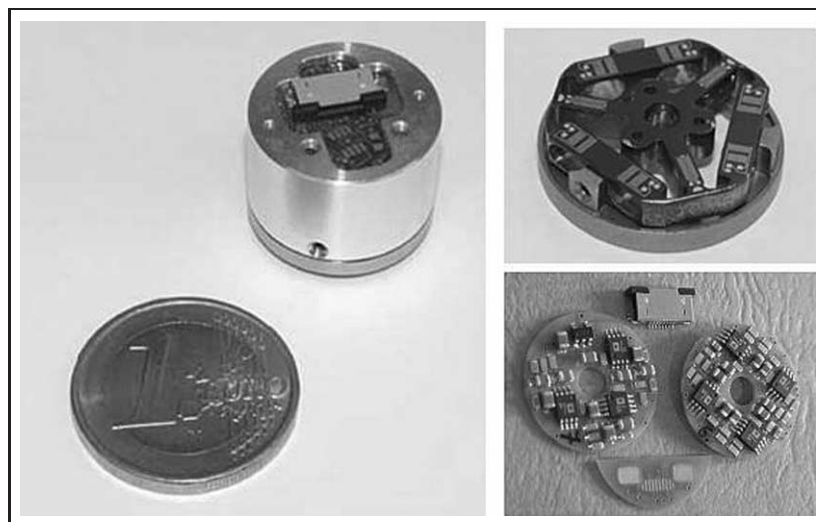


Bild 12 Miniaturisierter Fingerspitzen-Kraftmomentensensor mit Elektronik (3 Kräfte / 3 Momente mit 16 kHz seriell).

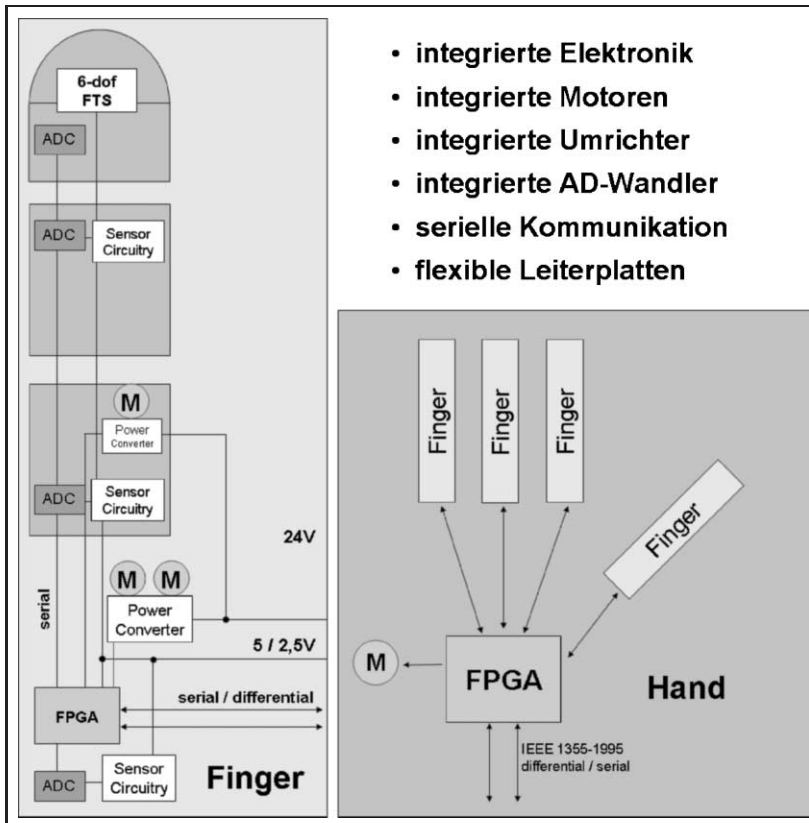


Bild 13 Signal-Fluss-Plan.

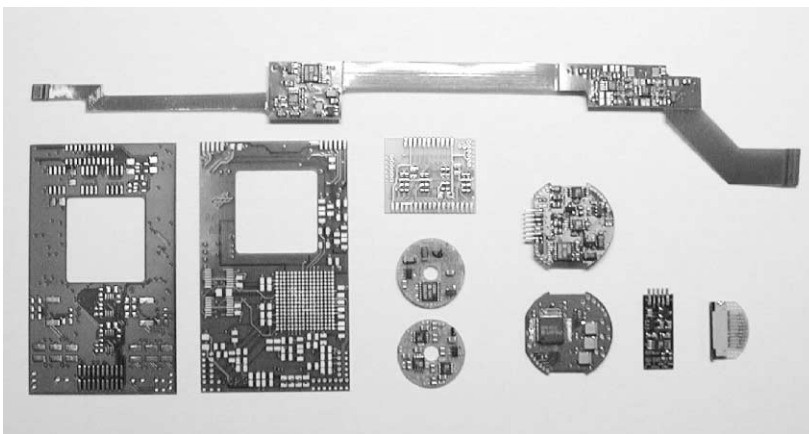


Bild 14 Platinen und Verkabelungssatz für einen Finger.

platte ersetzt, die von der Fingerspitze bis in das Basisgelenk reicht (Bild 14). Durch den Einsatz eines seriellen Hochgeschwindigkeitsbusses kann auf einen Rechner direkt in der Hand oder in deren Nähe verzichtet werden. Die wahlweise differenzielle oder optische Übertragung mit Lichtwellenleiter ermöglicht relativ große Entfernungen zwischen Hand und Rechner.

Durch den drastisch gesteigerten Integrationsgrad der Elektronik und die konsequente Digitalisierung aller Signale bzw. das eingesetzte Bus-Konzept ist eine völlig modulare Roboterhand entstanden, die alle 13 Antriebe integriert, aber nur mehr 12 Leitungen (Signale; Steuerung; Versorgung) nach außen führt; und zwar über einen Schwellwechseladapter, über den sich die Hand in weni-

gen Sekunden an- oder abbauen lässt (Bild 15). Der Adapter führt die Hand-Anschlüsse im Inneren des Leichtbau-Roboters weiter, so dass keinerlei Verkabelungen mehr sichtbar sind.

2.4 Kraft- und Fingerspitzengriffe

Auf Basis effizienter Verfahren zur Planung verschiedener Griffarten berühren wahlweise nicht nur die Fingerspitzen das zu greifende Objekt, sondern auch mehrere Punkte an der Handfläche und den Fingern (Bild 16).

Mit einem Algorithmus zur Berechnung eines Greifmaßes können mehrere Griffkandidaten bewertet und der beste ausgewählt werden. Arbeiten in diesem Umfeld, die automatisch kraftvolle, stabile Griffe generieren und auch zur abtastenden „Exploration“ unbekannter Objekte führen, wurde internationale Anerkennung zuteil ([7] Best Paper Award „manipulation“ auf der ICRA 2003 in Taipeh).

2.5 Reglerentwicklung und Handsteuerung

Um Regelalgorithmen parallel entwickeln und einfach in die Finger-Steuerung integrieren zu können, wurde ein Rahmen mit schmalbandiger Schnittstelle für Regleralgorithmen realisiert. Ein Tool (Stethoskop) visualisiert Sensorsignale und benutzerdefinierte Signale (z. B. interne Reglerzustände). Bei unvorhergesehenen Zuständen des Reglers oder fehlerhaften Reaktionen der Hand lässt sich das Verhalten der Regler bzw. der Hand-Steuerung aufgrund der Signalthistorie der letzten 10 Sekunden rekonstruieren.

„Applikationen“ realisieren elementare Funktionen der Hand, wie etwa das Anfahren von Positionen, das Verfolgen von Trajektorien, die durch einen Datenhandschuh kommandiert werden, koordinierte Kraftregelung aller Finger beim Greifen, Festhalten von Objekten mittels Steifigkeitsregler, usw. Des Weiteren wurde eine Schnittstelle

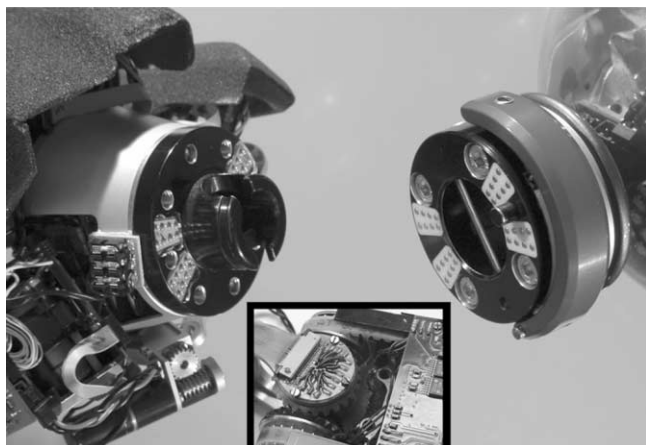


Bild 15 Der Schnellwechseladapter lässt einen Austausch von Händen in wenigen Sekunden zu.



Bild 16 Reale Kraftgriffe (oben) und Fingerspitzengriffe (rechts und unten).

basierend auf Remote Procedure Calls implementiert, mit der von einer übergeordneten Instanz zur aufgabenorientierten Programmierung Abfolgen von parametrisierten Applikationen kommandiert, bzw. die Messwerte der Hand-Sensorik ermittelt werden können.

3 Einhändige und zweihändige Hand-Arm-Demonstrationen

Zahlreiche Demonstrationen haben die Dynamik, Feinfühligkeit und

Leistungsfähigkeit der Arm-Hand Kombinationen aus dem DLR-Labor überzeugend nachgewiesen. Dazu gehörten u. a. Fernsteuerungen mit Telepräsenzcharakter (d. h. Stereobild- und Kraft-Rückkopplung) und das Klavierspielen: Hier konnte demonstriert werden, dass die Fingerdynamik, bei 10 Hz liegend, der menschlichen nicht mehr nachsteht (Bild 17).

Beim Fangen zugeworfener Bälle wird besonders hohe Dynamik und „Geschicklichkeit“ der

Arm-Hand-Kombination in Verbindung mit Echtzeit-Stereo-Bildverarbeitung verlangt (Bild 18, links).

Die „Robutler“-Demonstration, wie sie erstmalig auf der AUTOMATICA 2004 in München gezeigt wurde, beinhaltet das Servieren von Getränken, insbesondere die Erkennung von Gläsern und Flaschen sowie deren Öffnung (Bild 18, rechts) und das Einschenken des Getränks auf gesprochenes Kommando sowie das Aufwischen verschütteter Flüssigkeit nach einem einmaligen Lernen-durch-Vormachen-Prozess, der typische Wischbewegungen „vorzeigt“. Für zukünftige Generationen von Servicerobotern, die in häuslicher Umgebung Alltagsaufgaben erledigen sollen, bieten sich anthropomorphe Systeme an. Unter diesen Gesichtspunkten wurde am DLR ein „humanoider“ Oberkörper „JUSTIN“ zum Studium komplexer beidhändiger Manipulationsaufgaben aufgebaut (Bild 19, [17]). Dieses System mit 41 drehmomentgeregelten Gelenken setzt sich aus zwei DLR-Leichtbauarmen, zwei vierfingerigen DLR-Händen [1], einem beweglichen Torso (ebenfalls auf LBR-Technologie basierend) und einem multisensoriellen 3D-Modellierkopf zusammen.

Für die beidhändigen Manipulationsaufgaben wird eine passivitätsbasierte Regelung, aufbauend auf der Impedanzregelung der DLR-Leichtbauarme eingesetzt. Beim Entwurf des gewünschten Impedanzverhaltens wird nun speziell den Besonderheiten der beidhändigen Manipulation Rechnung getragen (Bild 20).

Basierend auf den aktuellen Positionen der einzelnen Fingerspitzen wird für jede Hand ein eigenes virtuelles Hand-Koordinatensystem berechnet. Die Fingerspitzen werden dann über (eindimensionale) virtuelle Federn mit dem Ursprung dieses Koordinatensystems verbunden. Durch Veränderung der freien Weglänge dieser Federn lassen sich die Greifkräfte für beide Hände einstellen [19]. Zusätzlich zu diesen auf



Bild 17 Klavierspielen.

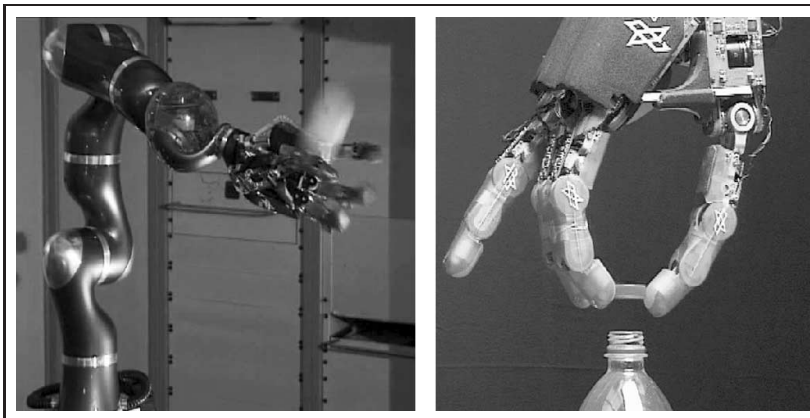


Bild 18 Fangen von zugeworfenen Bällen (links) und Flasche öffnen (rechts).

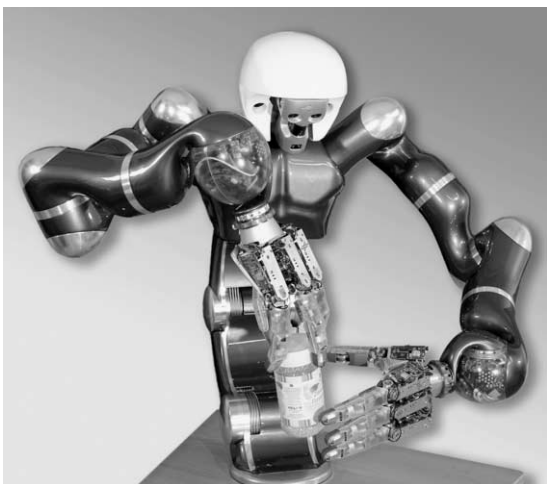


Bild 19 Der anthropomorphe 2-Arm-Manipulator „JUSTIN“ beim Aufschrauben einer Dose.

die Fingerspitzen bezogenen Federn werden zwei räumliche virtuelle Federn verwendet, um die Bewegung der Arme zu regeln. Durch die erste Feder werden die relative Lage sowie die virtuelle Steifigkeit zwischen den

beiden Armen festgelegt. Über die zweite Feder, die so genannte Objekt-Feder, können die beiden Arme miteinander bewegt werden. Wenn nun ein Objekt mit beiden Händen gegriffen wurde, so kann dieses

Objekt intuitiv bewegt werden, indem man die virtuelle Ruhelage der Objekt-Feder verändert. Die beiden räumlichen virtuellen Federn für die Arme können nun sehr einfach mit den Federn für die Fingerspitzen kombiniert werden, indem man die räumlichen Federn nicht direkt mit den Armen, sondern mit den virtuellen Hand-Koordinatensystemen verbindet. Durch Abbildung aller Kräfte der virtuellen visko-elastischen Federn über die entsprechenden Jacobi-Matrizen auf Gelenkebene lassen sich auf diese Weise Gesamtkörperbewegungen generieren, in denen die Bewegungen des Torso, der Arme und der Hände koordiniert geregelt werden. Die konkrete Haltung des Oberkörpers kann durch eine zusätzliche Nullraumregelung festgelegt werden. Demonstriert wurde bisher vor allem das Transportieren eines mit beiden Händen gegriffenen Objektes sowie das Aufschrauben einer Dose (Bild 19) [18].

4 Aspekte der Kommerzialisierung

Der führende deutsche Roboterhersteller KUKA hat inzwischen mit dem Nachbau der DLR-Leichtbauarme begonnen (Bild 21).

Nach Kopplung der KUKA-Programmierungsumgebung mit der DLR-Leichtbau-Roboter-Technologie (BMBF-Verbundprojekt PAPAS) konnte die schnelle, intuitive Programmierung von Montagevorgängen über „Lernen durch Vormachen“ demonstriert werden.

Die Wehrtechnik-Firma Diehl hat Ende 2004 bereits den ersten mobilen Minenräumroboter mit den Antriebskomponenten aus der LBR-Entwicklung aufgebaut (Bild 22).

In enger Kooperation mit dem Harbin Institute of Technology (HIT) in China wurde eine etwas weniger komplexe und auch schwächere DLR-HIT-Hand entwickelt. Sie weist eine ähnlich hohe Dynamik wie die DLR-Hand auf, integriert ebenfalls 13 Aktuatoren auf kleinstem Raum, und besitzt die

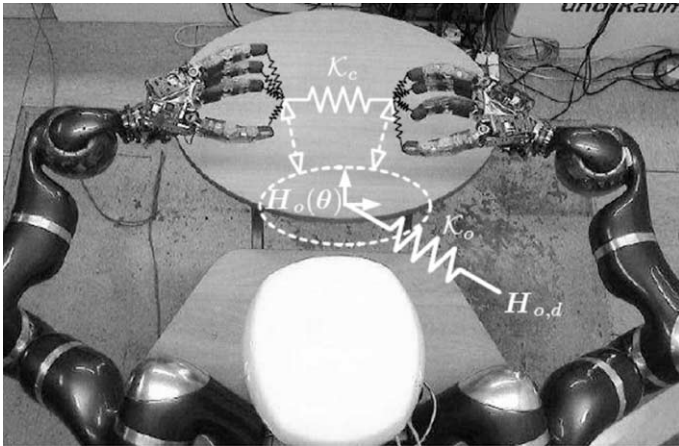


Bild 20 Realisierung eines beidhändigen Impedanzverhaltens durch Kombination von virtuellen visko-elastischen Federn für die Arme (in schwarz) und Hände (in weiß).

gleichen winzigen Kraft-Momenten-Sensoren in den Fingerspitzen. Allerdings betragen die an den Fingerspitzen ausübenden Kräfte nur 10 N (statt 30 N). Die Hand verfügt über den gleichen Schnellwechselladapter wie die DLR-Hand und

die noch geringere Anzahl von fünf Steuer-, Signal- und Versorgungsleitungen nach außen. 2005 wurde der industrielle Nachbau in enger Kooperation mit der Greifertechnik-Firma SCHUNK, Lauffen/Neckar in Angriff genommen (Bild 23).

5 Zur Zukunft der Dienstleistungs-, Raumfahrt- und Chirurgie-Robotik

Die terrestrische Dienstleistungsrobotik steht noch ganz am Anfang. Einerseits wird es um neuartige, schnell und intuitiv anlernbare Produktassistenten gehen, die den Arbeiter in der Fabrik in direkter Interaktion unterstützen (daher die Forderung nach „soft robotics“ und programmierbarer Nachgiebigkeit). Es besteht begründete Hoffnung, dadurch in Billiglohnländer abgewanderte Produktionsprozesse wieder nach Deutschland zurückholen zu können. Andererseits verlangt die zunehmende Überalterung unserer Gesellschaft nach intelligenten „Personal Assistants“, die rund um die Uhr Kranken und Bettlägerigen Hol- und Bringdienste auf gesprochene Anweisung hin leisten können. Mit den erwähnten Demonstrationen konnte bereits ge-

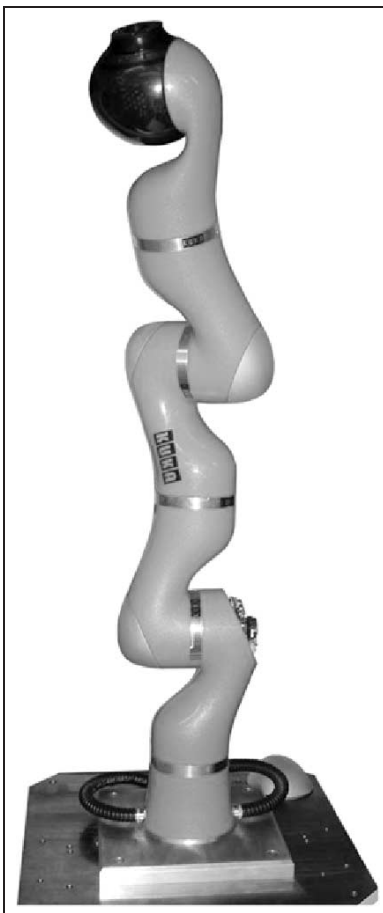


Bild 21 Der KUKA-LBR.

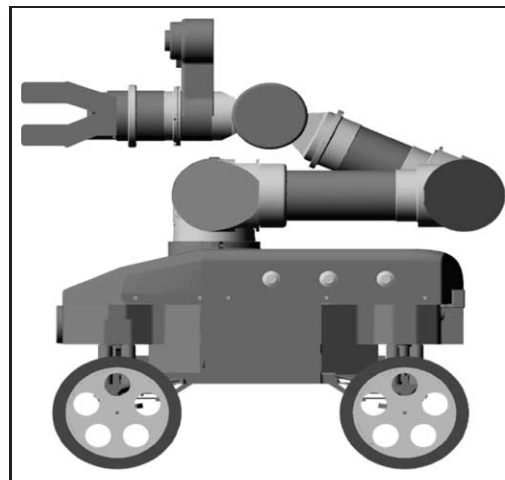


Bild 22 Minenräumroboter CO-BOLD der Fa. Diehl auf Basis der DLR-Leichtbau-Antriebe.



Bild 23 Die DLR-HIT-Hand als Produkt der Firma SCHUNK, inzwischen mit dem IF-Design Award und dem EURON Technology-Transfer-Award ausgezeichnet.

zeigt werden, wie in ersten Ansätzen eine solche „mechatronische Assistenz“ im Bereich des „elderly care“ aussehen würde.

Auch in der Raumfahrt rücken 2-armige, freifliegende „Robonaut“-Konzepte für „Servicing und Exploration“ immer mehr in den Vordergrund (Bild 24).

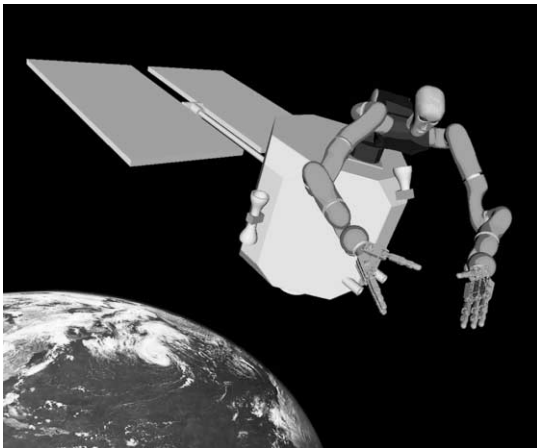


Bild 24 DLR-Grob-Konzept eines freifliegenden „Robonauten“.

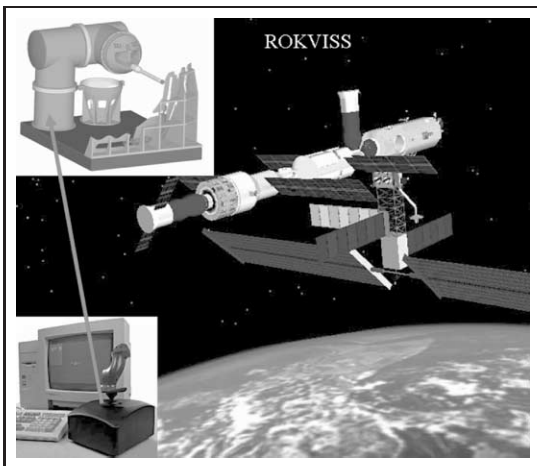


Bild 25 ROKVISS auf der Raumstation-Verifizierung der raumfahrtqualifizierten LBR-Gelenke

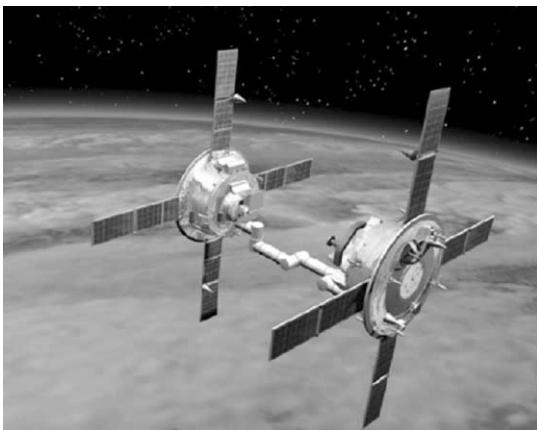


Bild 26 Einarmige Service-Roboter fangen Satelliten ein.

Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg war für das DLR die Raumfahrtqualifizierung der LBR-Gelenke im Rahmen des ROKVISS-Experiments (Robotik-Komponenten Verifikation auf der internationalen Raumstation ISS), das Anfang 2005 begann (Bild 25). Ihre Raumfahrttauglichkeit ist in-

zwischen durch zahlreiche Betriebsstunden „außen“ am russischen Modul der Raumstation nachgewiesen, u. a. auch durch Telepräsenz-Demonstrationen, bei der der 2-Gelenk-Arm über einen kraftreflektierenden Joystick am Boden feinfühlig an einer Kontur entlang geführt wird: Der Operator hat dann sowohl den Stereo-Bild-Eindruck und spürt auch die von den Drehmomentsensoren in den Gelenken ermittelten Kontaktkräfte.

Der folgerichtige nächste Schritt wäre jetzt die Realisierung eines (zunächst einarmigen) freifliegenden Robotersystems, das z. B. defekte oder der Erde gefährlich werdende Objekte ergreift und gezielt zum Absturz in die Ozeane bringt. Ein entsprechendes Demonstrationsprojekt ist in Vorbereitung (Bild 26).

Besonders attraktiv für die künftige Exploration von Planeten erscheinen einerseits mobile Robonauten z. B. auf Basis des Torsos JUSTIN (Bild 27), als auch der neue „Krabbelkäfer“ des DLR, eine 6-beinige Laufmaschine, deren Beine mit den Fingern der DLR-Hand II realisiert wurden (Bild 28).

Besonders interessante Perspektiven der Servicerobotik zeichnen sich in der Medizin ab. Nach unserer Ansicht wird die Chirurgie dieses Jahrhunderts immer mehr versuchen, auf die große traumatische Körperöffnung zu verzichten und statt dessen mit zwei robotergeführten, im Inneren des Patienten abwinkelbaren Instrumenten minimal invasiv (d. h. nur durch kleine Körperöffnungen) zu arbeiten, und zwar typischerweise durch komfortable Fernsteuerung vom Steuerpult aus, wenige Meter vom Patienten entfernt. Erste, noch nicht wirklich befriedigende Realisierungen kommen aus USA. Erklärtes Ziel des DLR-Instituts ist die Übertragung der kinematisch redundanten drehmomentgeregelten Leichtbau-Roboter-Technologien („soft robotics“) auf den Chirurgie-Einsatz (Bild 29). Vorbereitet wird dabei bereits das Arbeiten am bewegten Organ, indem der (dritte) endo-

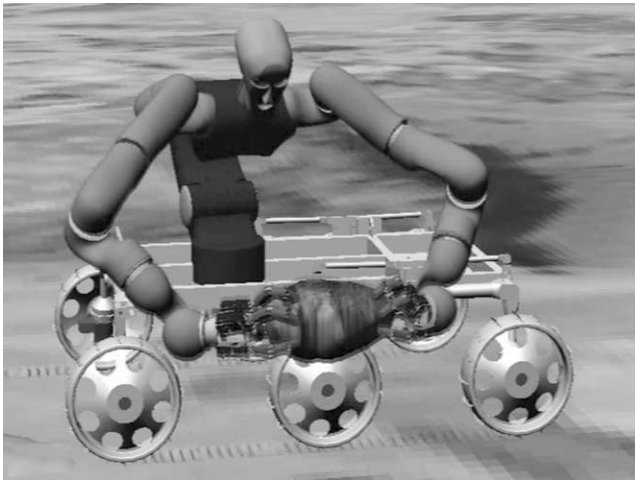


Bild 27 Mobiler „Rovonaut“.



Bild 28 DLR-„Krabbelkäfer“.

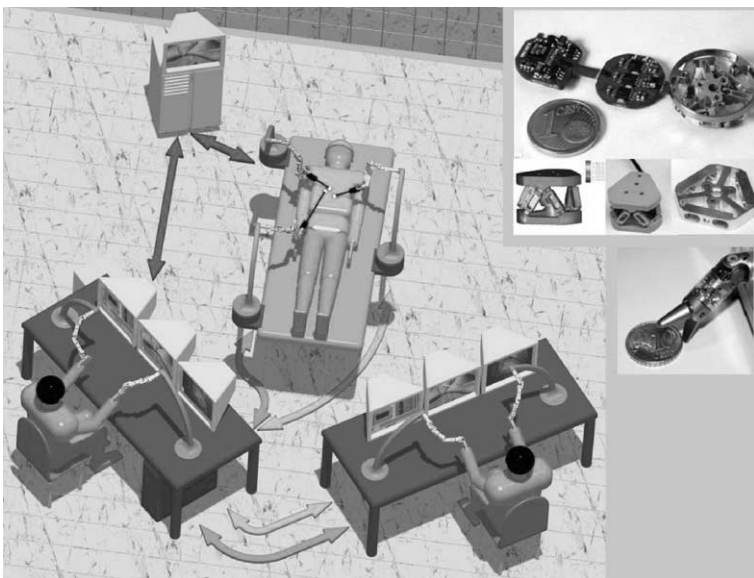


Bild 29 Universelles, d. h. offen und minimal invasiv einsetzbares Chirurgie-Roboter-System der Zukunft mit winzigen, in die Instrumente integrierten Kraft-Momenten-Sensoren KMS zur Visualisierung oder Rückkopplung „taktiles Gefühls“.

skopführende Roboter die Organ- (z. B. Herz-) Bewegung schätzt und die Operationsroboter zur synchronen Bewegung ansteuert, so dass der Chirurg am vermeintlich stillstehenden Organ arbeitet – Herzstillstand und belastende Herz-Lungenmaschine wären dann bei einer Bypass-Operation nicht mehr nötig.

Grundsätzlich ist das ferngesteuerte Manipulieren, Hantieren und Reparieren an einem dem Menschen nur mit großem Aufwand zugänglichen Ort (typisches Beispiel Weltraum) ein Problem der Telepräsenz mit Übertragung von Stereobildern, haptischen Signalen, ggf. auch von Temperatur, Geräuschen usw. In terrestrischen Anwendungen wie der Chirurgie geht es dabei eher um die Überwindung von Barrieren, nicht so sehr von großer Distanz wie in der Raumfahrt.

Der erste eigenentwickelte Chirurgie-Roboter-Arm KINEMEDIC des DLR (Bild 30), gefördert durch die Bayerische Forschungstiftung und weiterentwickelt im Auftrag der Medizintechnik-Firma BRAINLAB, ist nicht nur als erste Komponente für das o. a. minimal invasive Gesamtsystem gedacht, sondern auch für „offene“ Anwendungen wie Biopsie, Setzen von Pedikelschrauben in der Wirbelsäulenchirurgie oder das Schneiden von Knochenpartien mit Laser-Systemen (statt Fräsen und Sägen). Er basiert auf der LBR-Technologie, ist aber kleiner (ca. 80 cm) und kann daher auch nur einige Kilo Gewicht zuverlässig bewegen. Sein Steuerungskonzept ist so angelegt, dass der Chirurg den Roboter mit seiner Hand führt, dass der Robot-Arm aber nur innerhalb der von der OP-Planung und dem integrierten Navigationssystem vorgegebenen „virtuellen Trichtern“ feinfühlig nachgibt, so dass nicht versehentlich Berührungen oder Verletzungen des Patienten in verbotenen Regionen entstehen können. Auch der KINEMEDIC-Arm wurde 2007 mit dem EURON Technology-Transfer-Award ausgezeichnet.

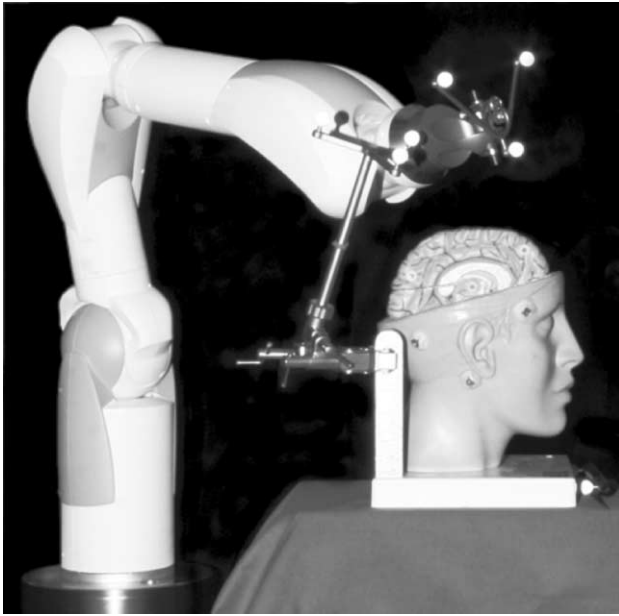


Bild 30 Chirurgie-Robot-Arm KINEMEDIC.

6 Ausblick

Die Bedeutung der Mechatronik für die Entwicklung der künftigen Robotersysteme ist oft unterschätzt worden. Auch in internationalen Förderprogrammen wird oft der Eindruck erweckt, als gehe es in der Robotik nur mehr um Kognition und künstliche Intelligenz, alles andere sei weitgehend gelöst. De facto aber wird weltweit intensiv daran gearbeitet, mit immer ausgefeilteren Komponenten der Sensorik und Aktuatorik dem menschlichen Bewegungsverhalten an Kraft und Dynamik immer näher zu kommen. Zwar werden auch fluidische Aktuatoren (pneumatisch/hydraulisch) ständig verbessert, doch macht auch die Entwicklung elektromagnetischer Antriebe weitere Fortschritte. Am DLR wurde inzwischen mit der Entwicklung integrierter Hand-Arm-Systeme nach dem Prinzip des autogonistischen Muskels begonnen; inhärente Nachgiebigkeit bei Kollisionen der Hand oder des Arms ist dabei eines der Hauptziele. Jedenfalls zeichnet sich ab, dass es innerhalb der nächsten 10 Jahre gelingen könnte, „humanoide Oberkörper“ zu bauen, die von Abmessung, Kraft, Dynamik und Geschicklichkeit der des Menschen sehr nahe

kommen. Für Service-Robotik-Visionen im Bereich „elderly care“ ist dies wohl eine der wichtigsten Voraussetzungen.

Literatur

- [1] Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H., Hirzinger, G.: DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In: IEEE ICRA Int'l Conf. on Robotics and Automation, (2001).
- [2] Fischer, M., Hirzinger, G.: Fast planning of precision grasps for three-dimensional objects. In: Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Grenoble, France, pp. 120–126, (1997), IROS Finalist for the Best Conf. Paper Award, (1997).
- [3] Fischer, M., Smagt, P. van der, Hirzinger, G.: Learning Techniques in a Dataglove Based Telemanipulation System for the DLR Hand. In: Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 1603–1608, ICRA Finalist for the Best Conf. Paper Award, (1998).
- [4] Gombert, B., Hirzinger, G., Plank, G., Schedl, M.: Modular concepts for a new generation of light weight robots. In: IECON'94, Bologna, Italy, IECON Best Conf. Paper Award, (1994).
- [5] Haidacher, S., Butterfaß, J., Fischer, M., Grebenstein, M., Jöhl, K., et al.: DLR Hand II: Hard- and Software Architecture for Information Processing. In: Proc. 2003 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan, (2003).
- [6] Haidacher, S., Hirzinger, G.: Contact Point Identification in Multi-Fingered Grasps Exploiting Kinematic Constraints. In: Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation ICRA, Washington D.C., USA, May 2002, pp. 1597–1603, ICRA Finalist for the Best Conf. Paper Award, (2002).
- [7] Haidacher, S., Hirzinger, G.: Estimating Finger Contact Location and Object Pose from Contact Measurements in 3-D Grasping. Wegbreit Best Manipulation Paper Award. In: ICRA 2003 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Taipei, pp. 1805–1810, (2003).
- [8] Hirzinger, G., Albu-Schäffer, A., Haehnle, M., Schaefer, I., Sporer, N.: On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. In: Proc. ICRA Int'l Conf. on Robotics & Automation, Seoul, Korea, pp. 3356–3363, (2001).
- [9] Hirzinger, G., Brunner, B., Lampariello, R., Landzettel, K., Schott, J., et al.: Advances in Orbital Robotics. In: Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, USA, pp. 898–907, (2000).
- [10] Hirzinger, G., Butterfaß, J., Fischer, M., Grebenstein, M., Haehnle, M., et al.: A Mechatronics Approach to the Design of Light-Weight Arms and Multifingered Hands. In: Proc. Int'l Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, USA, pp. 46–54, (2000), ICRA Finalist for the Best Conf. Paper Award.
- [11] Hirzinger, G., Fischer, M., Brunner, B., Koeppel, R., Otter, M., et al.: Advances in Robotics: The DLR Experience. In: The International Journal of Robotics Research, Special Issue on Robotics at the Millennium, Vol. 18, Nr. 11, (1999), pp. 1064–1087.
- [12] Hirzinger, G., Sporer, N., Albu-Schäffer, A., Haehnle, M., Krenn, R., et al.: DLR's torque-controlled light weight robot III – are we reaching the technological limits now?. In: Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation ICRA, Washington D.C., USA, pp. 1710–1716, (2002).

- [13] Hirzinger, G., Sporer, N., Schedl, M., Butterfuß, J., Grebenstein, M.: Torque-Controlled Lightweight Arms and Articulated Hands: Do We Reach Technological Limits Now? In: International Journal of Robotics Research, 23, 4–5, pp. 331–340, (2004).
- [14] Ott, C., Albu-Schäffer, A., Kugi, A., Hirzinger, G.: Decoupling Based Cartesian Impedance Control of Flexible Joint Robots. In: Proc. 2003 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan, 2003, (2003).
- [15] Ott, C., Albu-Schäffer, A., Kugi, A., Stramigioli, S., Hirzinger, G.: A Passivity Based Cartesian Impedance Controller for Flexible Joint Robots – Part I: Torque Feedback and Gravity Compensation. In: Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation ICRA, New Orleans, USA, pp. 2659–2665, (2004).
- [16] Ott, Ch., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G.: Comparison of Adaptive and Nonadaptive Tracking Control Laws. In: Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Lausanne, Switzerland, Oct. 2002, pp. 2018–2024, (2002).
- [17] Ott, Ch., Eiberger, O., Friedl, W., Bäuml, B., Hillenbrand, U., Borst, Ch., Albu-Schäffer, A., Brunner, B., Hirschmüller, H., Kielhöfer, S., Konietschke, R., Suppa, M., Wimböck, T., Zacharias, F., Hirzinger, G.: A Humanoid Two-Arm System for Dexterous Manipulation. In: IEEE-RAS Int'l Conf. on Humanoid Robots, S. 276–283, Genua/Italien, (2006).
- [18] Wimböck, T., Ott, Ch., Hirzinger, G.: Impedance Design for Two-handed Manipulation: Design and Experiment. In: IEEE/RSJ ICRA Int'l Conf. on Robotics and Automation, Rom/Italien, (2007).
- [19] Wimböck, T., Ott, Ch., Hirzinger, G.: Passivity-Based Object-Level Impedance Control for a Multifingered Hand. In: IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems 2006, S. 4621–4627, Peking/China, (2006).



Prof. Dr.-Ing. Gerd Hirzinger leitet das DLR-Institut für Robotik und Mechatronik, welches sich mit Entwicklungen zur Raumfahrt-Robotik, Telerobotik, Mensch-Maschine-Interaktion, Medizintechnik, Fahrzeug- und Flugzeugführung bzw. den mechatronischen Komponenten hierzu befasst. Prof. Hirzinger hat für seine Arbeiten zahlreiche hochrangige Auszeichnungen erhalten, u. a. den Leibniz-Preis, den IEEE Field Award und das Bundesverdienstkreuz. Adresse: DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Oberpfaffenhofen, Institut für Robotik und Mechatronik, 82234 Wessling, Tel. 08153 28-2401, Fax: 08153 28-1134, <http://www.robotic.dlr.de> E-Mail: Gerd.Hirzinger@dlr.de,