

Entwicklung der modernsten Armprothese der Welt mit Model-Based Design

Von James Burck, Michael J. Zeher, Robert Armiger und James D. Beaty,
Applied Physics Laboratory der Johns Hopkins University

NUR WENIGEN VON UNS IST DAS SENSIBLE WECHSELSPIEL

neuraler, mechanischer und sensorischer Systeme bewusst, das erforderlich ist, um so simple Aufgaben wie etwa das Aufheben eines Balls zu bewältigen.

Wenn man eine Armprothese mit natürlichem Bewegungsprofil schaffen will, dann muss man sowohl all diese komplexen Einzelsysteme als auch ihre diffizilen Interaktionen mithilfe modernster Aktuatoren, Sensoren, Mikroprozessoren und eingebetteter Regelungs- und Steuerungssoftware nachbilden.

Dieser Herausforderung stellten sich Forscher der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) in ihrem Programm „Revolutionizing Prosthetics“.

Das Applied Physics Laboratory (APL) der Johns Hopkins University hat die Federführung in einem aus Regierungseinrichtungen, Universitäten und privatwirtschaftlichen Unternehmen bestehenden, weltweiten Team, das sich die Entwicklung einer Armprothese zum Ziel gesetzt hat, die alle bislang verfügbaren Prothesen weit übertreffen soll. Die endgültige Version des Arms wird über Regelungsalgorithmen verfügen, die durch Nervenimpulse gesteuert werden und es dem Träger ermöglichen, mit der Geschwindigkeit, Geschicklichkeit und Kraft eines echten Arms zu agieren. Durch modernste Sensor-Feedback-Methoden wird man damit zudem physikalische Eindrücke wie Druck, Kraft und Temperatur fühlen können. Ein zentraler Meilenstein des Projekts war die Entwicklung der Virtual Integration Environment (VIE), einer mithilfe von MathWorks-Tools und Model-Based

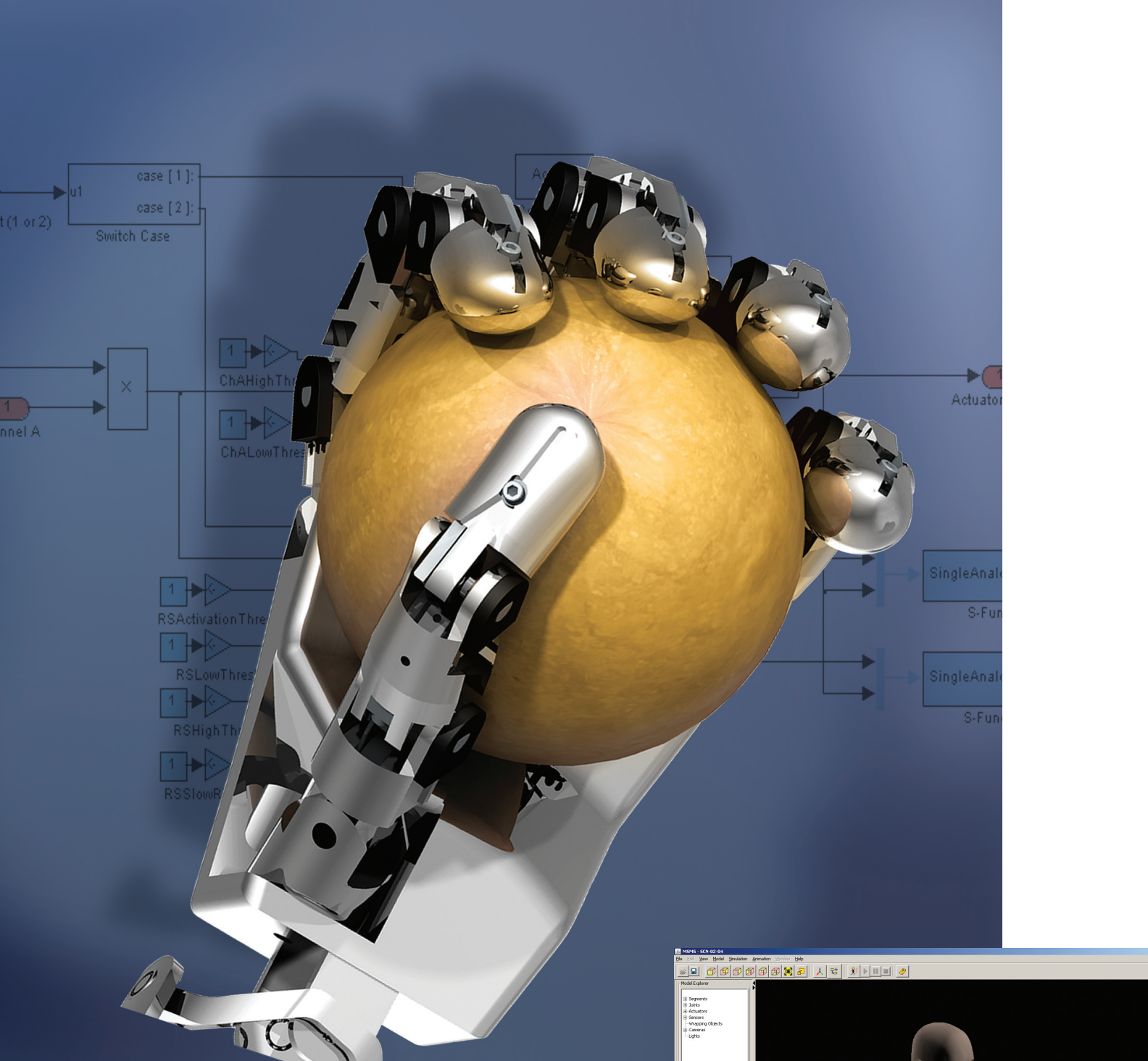
Design aufgebauten Umgebung zur Simulation kompletter Gliedmaßensysteme.

Durch ihre standardisierte Architektur und wohldefinierten Schnittstellen ermöglicht die VIE die Kooperation von Fachexperten aus über zwei Dutzend Partnerorganisationen. Model-Based Design mit MathWorks-Tools kam auch in anderen Schlüsselphasen der Entwicklung zum Einsatz: Bei der Modellierung der Gliedmaßenmechanik, dem Testen neuer neuraler Dekodier-Algorithmen und der Entwicklung und Verifikation der Steuerungs- und Regelungsalgorithmen.

Architektur der Virtual Integration Environment

Die Architektur der VIE besteht aus fünf Hauptmodulen: Eingang, Signalanalyse, Steuerung/Regelung, Regelstrecke und Darstellung. Das Eingangsmodul enthält sämtliche Eingabegeräte, mit deren Hilfe Patienten

ihre Absichten signalisieren können: Oberflächen-Elektromyogramme (EMGs), kortikale und periphere Neuroimplantate, implantierbare myoelektrische Sensoren (IMESs) und konventionellere digitale und analoge Eingaben für Schalter, Joysticks sowie andere in der klinischen Forschung verwendete Steuereingabegeräte. Die entscheidende Aufgabe dieses Moduls ist aber, die Rohdaten mithilfe von Mustererkennungs-Algorithmen zu interpretieren, daraus die Absichten des Nutzers abzuleiten und an das Regelungsmodul weiterzugeben. Im Regelungsmodul werden diese Befehle in Motorsignale umgewandelt, welche gezielt die einzelnen zur Bewegung von Arm, Hand und Fingern vorhandenen Aktuatoren ansteuern. Das Regelstrecken-Modul besteht aus einem physikalischen Modell der Mechanik des Arms. Das Darstellungsmodul schließlich erzeugt eine dreidimensionale (3D) Animation der Armbewegung (Abb. 1).



Die zwei für die DARPA entwickelten Gliedmaßen-Prototypen nutzten die gezielte Muskel-Reinnervation, eine von Dr. Todd Kuiken vom Rehabilitation Institute of Chicago entwickelte Methode. Dabei werden die Nervenenden eines amputierten Gliedes mit ungenutzten, nahe an der Verletzung gelegenen Muskelpartien verbunden. In einem klinischen Test konnte ein Patient mit dem ersten Prototypen verschiedene funktionale Aufgaben bewältigen wie etwa eine Kreditkarte aus der Tasche ziehen.

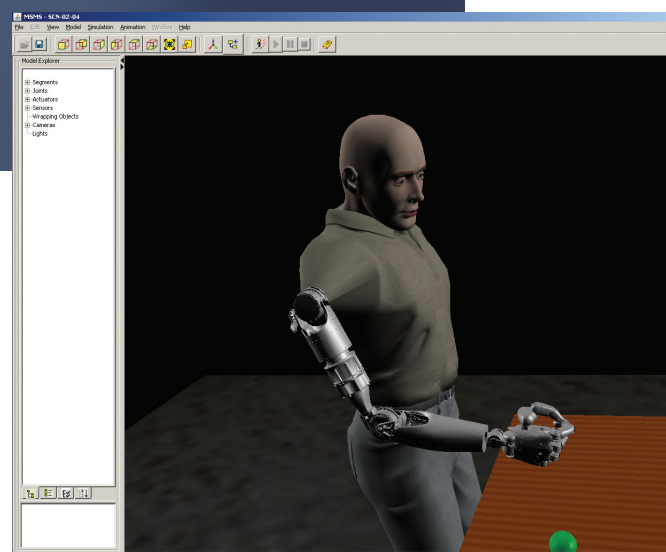


ABB 1: 3D-Animation der Armprothese.

Entwicklung eines naturgetreuen Systems nach strengen Zeitvorgaben

Ein mechatronisches System, das natürliche Bewegungen exakt nachbildet, in nur vier Jahren (wie von der DARPA vorgegeben) zu entwickeln und für klinische Tests zur Verfügung zu stellen, erfordert radikale Neuerungen auf den Gebieten der neuralen Ansteuerung und sensorischen Stimulation, modernste Aktuatoren und Mechanik sowie eine völlig neue Prothesenkonstruktion. Die derzeit besten Armprothesen haben typischerweise nur drei aktive Freiheitsgrade: Beugen/Strecken des Ellbogens, Handgelenksdrehung sowie Öffnen und Schließen der Hand. Proto 1, der erste Prototyp des APL, erweitert dies um fünf zusätzliche Freiheitsgrade: Zwei an der Schulter (Beugen/Strecken und Innen-/Außenrotation), Handgelenksbeugung/-streckung und zusätzliche Griffe für die Hand. Um die volle natürliche Beweglichkeit nachzubilden, waren aber selbst die Fortschritte mit Proto 1

erst der Anfang. Proto 2, eigentlich ein elektromechanisches Proof-of-Concept-Modell, verfügte über mehr als 22 Freiheitsgrade, darunter zusätzliche Seitwärtsbewegungen an der Schulter (Abduktion/Adduktion), des Handgelenks (Beugen Richtung Elle/Speiche) sowie unabhängige Fingerbewegungen. Die

Hand kann außerdem mehrere komplexe Handgriffe ausführen.

Das Modular Prosthetic Limb – die für die DARPA bestimmte Version – wird über 27 Freiheitsgrade sowie die Fähigkeit verfügen, Temperaturen, Berührungen, Druck und Vibrationen zu fühlen.



Griffvarianten von Proto 2.

Verbindung mit dem Nervensystem

Simulink® und die VIE waren unentbehrliche Bestandteile bei der Entwicklung einer Schnittstelle, mit der sich die Prothese auf natürliche und intuitive Weise steuern lässt. Die Forscher zeichnen Daten von implantierten Neurochips auf, während die Probanden in der virtuellen Umgebung Aufgaben wie das Greifen nach einem Ball ausführen. Die modularen Eingabesysteme der VIE empfangen diese Daten, aus denen MATLAB®-Algorithmen die Absicht des Probanden durch eine Mustererkennung ableiten, die die Nervenaktivität in Beziehung zur Bewegung des Probanden setzt (Abb. 2). Die Ergebnisse werden in die VIE zurückgespeist, mit der sich solche Experimente in Echtzeit durchführen lassen. Mit dem gleichen Workflow wurde eine ganze Reihe von Eingabegeräten entwickelt, von denen einige bereits von Menschen mit Prothesen am Rehabilitation Institute of Chicago getestet werden.

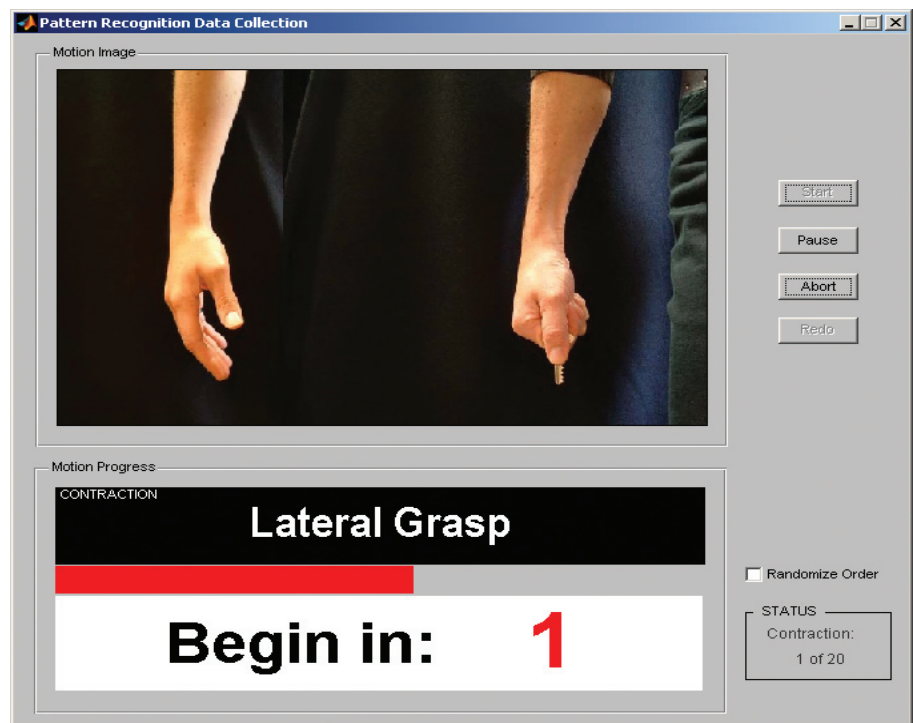


Abb. 2: Eine von der University of New Brunswick entwickelte MATLAB-Anwendung, die Bewegungsdaten für die Mustererkennung aufzeichnet.

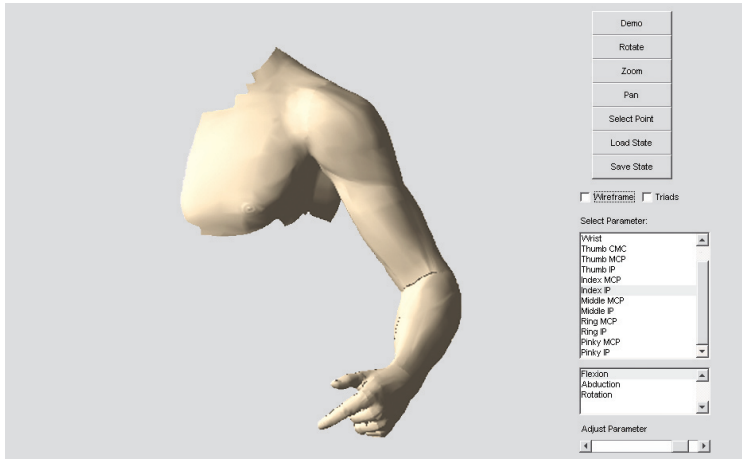


ABB. 3: Eine MATLAB-basierte Benutzeroberfläche zur Konfiguration verschiedener Prothesen-Parameter.

Aufbau von Prototypen einer Echtzeitsteuerung

Die Signalanalyse- und Regelungs-Module der VIE bilden das Herz des Steuerungs- und Regelungssystems, das am Ende der Entwicklung in der Armprothese zum Einsatz kommen werden wird. Am APL wurde die Software für diese Module entwickelt. Die einzelnen Algorithmen wurden mit dem Embedded MATLAB™ Subset entwickelt und dann als Funktionsblöcke in ein Simulink-Modell des Systems integriert. Zum Aufbau eines Echtzeitprototypen des Steuerungs- und Regelungssystems erzeugte das Team mit Real-Time Workshop® Programmcode für das gesamte aus Simulink- und Embedded MATLAB-Komponenten bestehende System und testete den Code auf einem xPC Target™ Echtzeitsystem.

Diese Vorgehensweise bot viele Vorteile. Mit Model-Based Design und Simulink ließ sich das gesamte System modellieren und dann in Simulationen optimieren und verifizieren. Der Prototyp konnte mittels Rapid Prototyping aufgebaut und lange vor der Entscheidung für eine bestimmte Hardwareplattform getestet werden. Mit Real-Time Workshop Embedded Coder™ wurde schließlich Zielsystem-spezifischer Code für den gewählten Prozessor aus dem Simulink-Modell des Systems generiert. Dieses Simulink-Modell war mittels Simulationen hinsichtlich Sicherheit getestet und veri-

fiziert worden, und es war keinerlei manuelle Programmierung erforderlich, die Fehler oder unbeabsichtigtes Verhalten hätte einschleppen können. Die Entwickler konnten also darauf vertrauen, dass sich ihr ‚Modular Prosthetic Limb‘ exakt so verhält wie beabsichtigt.

Physikalische Modellierung und Visualisierung

Um Closed-Loop-Simulationen des Steuerungs- und Regelungssystems durchführen zu können, entwickelte das APL ein Streckenmodell, das die Trägheitseigenschaften des Arms wiedergab. Den Ausgangspunkt bildeten von Partnern in SolidWorks® entwickelte CAD-Assemblies der Armkomponenten, aus denen automatisch ein SimMechanics™-Modell des Arms generiert und das an das Steuerungs- und Regelungssystem in Simulink gekoppelt wurde. Dieses Streckenmodell wurde dann mit einer an der University of Southern California entwickelten Java™ 3D-Grafik-Engine verbunden, mit der die Bewegung des Arms in einer simulierten Umgebung animiert werden kann.

Klinische Anwendung

Auf Basis des leistungsfähigen virtuellen Systems konnte das APL zusätzlich eine intuitive Umgebung für die klinische Arbeit schaffen, mit der das System konfiguriert und trainiert werden kann. Die klinischen Forscher können mithilfe einer in

MATLAB erzeugten grafischen Benutzeroberfläche Parameter in der VIE konfigurieren und Testsitzungen mit freiwilligen Probanden durchführen (Abb. 3). Die Ärzte interagieren mit der auf einem Host-PC laufenden Anwendung, die wiederum mit dem xPC Target-System kommuniziert, auf dem die Steuerungs- und Regelungssoftware in Echtzeit ausgeführt wird. Ein dritter Rechner übernimmt das 3D-Rendering und die Darstellung des virtuellen Arms. In Tests mit echten Gliedmaßen können Ansteuersignale korreliert und visualisiert werden, während sich der Proband bewegt.

Ausblick

Mit Model-Based Design hat das „Revolutionizing Prosthetics“-Team die Versionen Proto 1 und Proto 2 sowie die erste Version der VIE erheblich früher als geplant fertiggestellt. Zurzeit wird an einem detaillierten Design des Modular Prosthetic Limb gearbeitet, der Version, die schließlich an die DARPA übergeben wird.

Viele Partnerinstitutionen nutzen die VIE als Testumgebung für die weitere Verbesserung ihrer Systeme. Die VIE wird voraussichtlich noch für einige Jahre die Plattform für weitere Entwicklungen in der Prothetik und Neurowissenschaft bleiben. Das APL-Team hat einen Entwicklungsworkflow aufgestellt, mit dem sich Systeme in kurzer Zeit aus wiederverwendbaren Modellen aufbauen und auf Prototypenhardware implementieren lassen, und von dem nicht nur das Projekt „Revolutionizing Prosthetics“ profitiert, sondern auch weitere angeschlossene Programme. ■

Ohne Einschränkung zur Veröffentlichung freigegeben.

🔍 **Quellen**

**APPLIED PHYSICS LABORATORY
DER JOHNS HOPKINS UNIVERSITY**
www.jhuapl.edu

MODEL-BASED DESIGN
www.mathworks.de/nn9/mbd