

Konstruktion eines zweibeinigen humanoiden Roboters

Dipl.-Ing. Heiner Peters, Entwicklungsingenieur, Team „System Design“, Dr.-Ing. Marc Simnofske, Teamleiter „System Design“, Dr.-Ing. Peter Kampmann, Teamleiter „Hardware Architekturen“, DFKI Robotics Innovation Center, Bremen

Kurzfassung

In diesem Artikel wird ein Überblick über den am DFKI Robotics Innovation Center entwickelten humanoiden Roboter „RH5“ gegeben.

Der Roboter erfüllt mit einer Gesamtgröße von 200 cm bei einem Gewicht von 62 kg annähernd humanoide Dimensionen. Es wurden insgesamt 34 Freiheiten vorgesehen, von denen 12 Freiheiten auf die Beine, jeweils 3 auf eine Torso- und Halskinematik sowie 16 Freiheiten auf Arme und Greifer des Roboters entfallen.

Aus den Erfahrungen bei der Entwicklung von komplexen, mehrgliedrigen Robotersystemen am DFKI wurde bei der Entwicklung des Systems besonderer Augenmerk auf die multi-modale sensorische Ausstattung sowie die im System vorhandene Hardware gelegt. Im Zuge der Entwicklungen im Bereich der embedded Hardware kann hier die Feststellung gemacht werden, dass eine verteilte Rechnerarchitektur sowohl zur Erhöhung der Robustheit als auch zur Entlastung zentraler Datenverarbeitungseinheiten beiträgt. Mit der steigenden Rechenleistung und dem Aufweichen des Übergangs von klassischen Mikrocontrollern und Standardrechnern kann mittlerweile die Sensordatenverarbeitung von low-level und high-level Verarbeitung auf First- und Second-level Verarbeitung übergehen, da bereits in frühen Stadien der Verarbeitungskette komplexe Algorithmen ablaufen. Dadurch werden lokale Verarbeitungsschleifen möglich, die es erlauben, bereits Teilsysteme von Robotern mit einem hohen Grade an Autonomie zu betreiben.

Ein besonderer Fokus wurde auf die mechanische Entwicklung der zweibeinigen Laufplattform gelegt. Der humanoide Roboter kann damit, z.B. zur Verrichtung von Manipulationsaufgaben, sowohl statisch stabil stehen, als auch dynamische mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1 m/s laufen. Dazu wurde durch Topologieoptimierung eine möglichst steife Beinstruktur bei gleichzeitig geringem Gewicht realisiert. Zur Dimensionierung notwendige mechanische Randbedingungen wurden vorab durch Mehrkörpersimulationen ermittelt. Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens beim Laufen wurde der Massenschwerpunkt der Beine möglichst nah an den Rotationsachsen der

Hüftgelenke konzipiert. Durch den Einsatz von eigens für diesen Roboter entwickelten Linearantrieben konnte zum einen die Massenverteilung in den Beinen begünstigt werden, zum anderen wurde das, durch Variation der effektiven Hebellänge zwischen Gelenk und Angriffspunkt des Aktors verursachte, nicht konstante Übersetzungsverhältnis positiv genutzt. Durch sinnvolle Ausrichtung der Kraftangriffspunkte der Aktoren konnten passende Übersetzungsverhältnisse in Abhängigkeit der Gelenkwinkels gefunden werden.

Bei den in Vorwärtsrichtung (Pitch-Richtung) der Beingelenke eingesetzten Linearantrieben wurde eine optionale Möglichkeit zum Einsatz manuell einstellbarer Elastizitäten vorgesehen. Dadurch wird es möglich sein, schrittweise elastisches Laufverhalten zu implementieren.

Abstract

This article provides an overview of the humanoid robot RH5 developed at the DFKI Robotics Innovation Center.

The robot, with a total size of 200 cm and a weight of 62 kg, has an almost humanoid dimension. A total of 34 degrees of freedom were provided, of which 12 DOF are related to the legs, 3 each to a torso and neck kinematics as well as 16 DOF to the arms and grippers of the robot.

From the experience in the development of complex robotic systems at the DFKI, special attention was paid to the multi-modal sensor equipment and the hardware present in the system during the development of the system. In the course of the developments in the area of embedded hardware, it can be stated, that a distributed computer architecture contributes both to increasing the robustness as well as to the relief of central data processing units. With the increasing computing power and the increasing convergence of classical microcontrollers and standard computers, the processing of sensor data can now be transferred from low-level and high-level processing to first- and second-level processing, since complex algorithms already take place in the early stages of the processing chain. As a result, local processing loops are possible, which already allow subsystems of robots to be operated with a high degree of autonomy.

A special focus was placed on the mechanical development of the bipedal platform. The humanoid robot can thus, e.g. to perform manipulation tasks, both stand statically stable and walk dynamically at a speed of up to 1 m / s. Therefor a lightweight and stiff structure was achieved by optimizing the topology. The mechanical boundary conditions necessary for the dimensioning were determined beforehand by multibody simulations. In order to improve the dynamic behavior during walking, the mass center of the legs was designed as close as possible to the rotation axes of the hip joints. By the use of linear drives especially developed

for this robot the mass distribution in the legs could be promoted. On the other hand, the non-constant ratio caused by variation of the effective lever length between the joint and the attack point of the actuator was positively used. By suitable alignment of the force-acting points of the actuators, suitable gear ratios could be found depending on the joint angle.

In the linear drives used in the forward direction (pitch direction) of the leg joints, an optional possibility was provided for the use of manually adjustable serial elasticities. As a result, it will be possible to stepwise implement elastic walking behavior.

1. Einleitung

In der jüngeren Vergangenheit wurde eine Reihe von humanoiden Robotern neuentwickelt oder weiterentwickelt. Einen guten Überblick über den Stand der Technik vermittelt hier die „Darpa Robotic Challenge“, deren Finale im Jahr 2015 stattfand [1]. Die hier eingesetzten humanoiden Roboter wurden vor dem Hintergrund der Katastrophenhilfe konzipiert, sodass Aufgaben in schwer zugänglichen Gebieten teilautonom durchgeführt werden können. Besonders herauszustreichen sind hier die Roboter „DRC-HUBO“ (KAIST) [2], als Gesamtsieger des Wettbewerbs, der hydraulisch aktuierte Roboter „ATLAS“ (Boston Dynamics) [3] sowie die neu entwickelten Roboter „DURUS“ (Georgia Institute of Technology) [4] und „Valkyrie“ (NASA) [5]. Die beiden zuletzt erwähnten Roboter beschreiten neue Wege, indem hier gezielt Elastizitäten in die kinematischen Ketten der Lokomotionsextremitäten eingebracht werden, wodurch deutlich energieeffizientere Laufmuster unterstützt werden.

Nach der erfolgreichen Entwicklung verschiedener sechs- und vierbeiniger Laufroboter am „DFKI, Robotic Innovation Center“ in Bremen (z.B. [6], [7], [8]), sowie der Forschung an komplexen Manipulationssystemen (z.B. [9], [10], [11]) wurden, mit der Entwicklung eines zweibeinigen humanoiden Roboters, die institutsweiten Erfahrungen in einer umfassenden Roboterplattform zur Lokomotion und Manipulation zusammengeführt.

Der Roboter wurde als Assistenzroboter sowie vor dem Hintergrund langzeitautonomer Einsätze in für den Menschen gestalteter Umgebung, z.B. auf einer zukünftigen Mondstation, entwickelt. Sowohl für die Interaktion mit Menschen als auch für die Fortbewegung und Manipulation in einer Realumgebung, bietet sich eine humanoide Gestaltung des Roboters an. Neben dem autonomen und teilautonomen Einsatz soll der Roboter ebenfalls mittels eines Exoskeletts teleoperiert werden können, wobei die visuelle Wahrnehmung und wirkende Kräfte und Momente des Roboters mittels virtueller Realität der steuernden Person zur Verfügung gestellt werden.

3. Systemübersicht

Der hier entwickelte Roboter wurde unter Berücksichtigung möglichst menschenähnlicher Proportionen konzipiert. Es wurden gerade so viele Freiheiten vorgesehen, dass grundlegende menschliche Bewegungen adäquat abgebildet werden können. Insgesamt verfügt der Roboter über 34 Freiheiten, die gemäß Bild 1, Tabelle 1 auf das System verteilt wurden. Der gesamte Roboter wurde spiegelsymmetrisch um seine XZ-Ebene aufgebaut.

Tabelle 1: Gelenkwinkel im Roboter RH5

Gelenkachse		Bewegungsbereich [°]	
		min	max
Head			
HeadYaw	H1	-90	90
HeadPitch	H2	-20	15
HeadRoll	H3	-25	25
Body			
BodyRoll	B1	-25	25
BodyPitch	B2	-30	30
BodyYaw	B3	-35	35
Arms			
Shoulder1	A1	-180	180
Shoulder2	A2	-110	110
Shoulder3	A3	-180	180
Elbow	A4	-125	125
WristRoll	A5	-70	70
WristPitch	A6	-72	45
WristYaw	A7	-180	180
Gripper	A8		
Legs			
Hip1	L1	-180	180
Hip2	L2	-46	67
Hip3	L3	-70	17
Knee	L4	0	88
AnklePitch	L5	-51,5	45
AnkleRoll	L6	-57	57

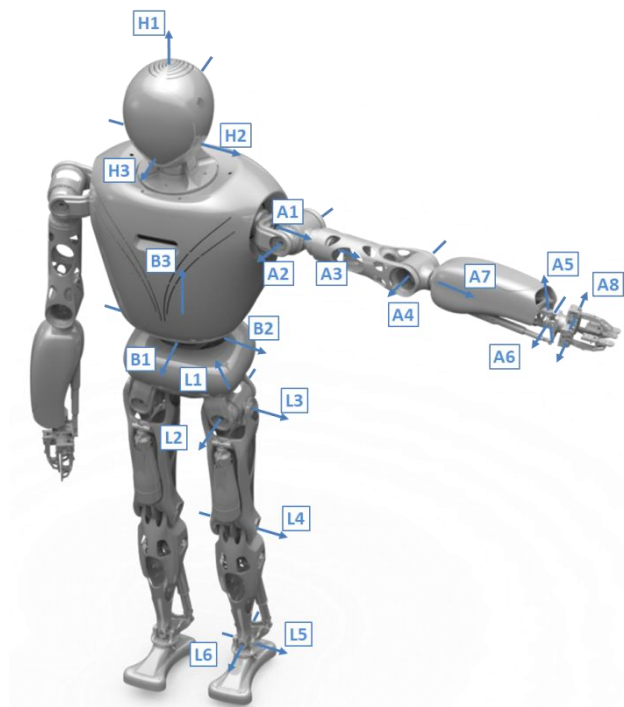


Bild 1: Gelenkachsen im Roboter RH5

3.1 Gelenkachsen

Die Lage der Gelenkachsen wurde so gewählt, dass der menschliche Bewegungsapparat möglichst gut abgebildet werden kann. Dazu wurde eine Gesamthöhe von 185 cm als Zielgröße definiert, woraus sich folgende geometrische Parameter ergeben.

Lokomotionsapparat: Jedes Hüftgelenk des Roboters verfügt über drei, sich in einem gemeinsamen Punkt schneidende Rotationsachsen. Der Schnittpunkt der Rotationsachsen liegt ungefähr auf der Hälfte der Gesamthöhe, hier bei 93 cm. Der Abstand zwischen Beiden Hüftgelenken beträgt 22 cm. Zur Anpassung des verfügbaren Bewegungsraums wurde die erste Gelenkachse um 15° bezüglich der XY-Ebene des Roboters gekippt. Die Längen des Ober- und Unterschenkels sind mit 41 cm und 42 cm annähernd identisch. Ober- und Unterschenkel werden durch ein Kniegelenk mit nur einer Rotationsachse verbunden. Das

Fußgelenk verfügt über zwei, sich in einem Punkt schneidende Rotationsachsen. Der Achsenschnittpunkt liegt 10 cm über der Fußaufstandsfläche.

Im Torso-, Kopf- und Armbereich des Roboters wurde teilweise auf Komponenten aus zuvor entwickelten Robotern zurückgegriffen, weshalb der durch ein Menschliches Vorbild bei einer Gesamtgröße von 185 cm definierte Bauraum an einigen Stellen überschritten wurde. Eine entsprechende Überarbeitung der betreffenden Komponenten steht aus.

Torso: Zur Erweiterung des Bewegungsraums im Hinblick auf höher entwickelte Laufmuster, Balancieverhalten und einen vergrößerten Manipulationsraum, wurde ein Torsogelenk mit 3 Freiheiten vorgesehen. Der gemeinsame Schnittpunkt der Achsen liegt auf einer Höhe von 114 cm über der Fußaufstandsfläche. Analog wurde der Sensorkopf des Roboters mit drei Freiheiten ausgestattet. Der Schnittpunkt der Kopfachsen liegt auf einer Höhe von 180 cm über der Fußaufstandsfläche. Die Gesamtgröße des Roboters beträgt damit 200 cm.

Manipulationsextremitäten: Jede Manipulationsextremität verfügt über 8 Freiheiten. Davon entfallen drei sich in einem Punkt schneidende Gelenkachsen auf das Schultergelenk. Die erste Achse wurde bezüglich der XZ-Ebene des Roboters um 14° nach vorne geneigt, um den Manipulationsbereich unmittelbar vor dem Torso des Roboters zu vergrößern. Der Abstand zwischen den beiden Schultergelenken beträgt 64 cm. Analog entfallen drei Freiheiten auf ein Handgelenk, deren Gelenkachsen sich ebenfalls in einem Punkt schneiden. Die Längen des Ober- und Unterarms betragen 35,5 cm bzw. 38,6 cm. Ober- und Unterarm werden durch ein Ellbogengelenk mit einem Freiheitsgrad gekoppelt. Als Endeffektor dient ein selbstadaptiver Drei-Finger-Greifer, dessen einzelne Finger simultan akuiert werden.

Die jeweils minimalen und maximalen Gelenkwinkel der einzelnen Gelenkachsen können Tabelle 1 entnommen werden. Es handelt sich bei diesen Angaben um die Extremstellungen bei eindimensionaler Bewegung um die jeweilige Gelenkachse. Der tatsächliche Arbeitsraum bei mehrdimensionaler Bewegung eines Gelenks wird hier nicht abgebildet.

3.2 Massenverteilung

Bei der Konstruktion des Roboters wurde besonderes Augenmerk auf ein geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Steifigkeit der tragenden Strukturen gelegt. Eine hohe Systemsteifigkeit ist von Vorteil für die vollständige kinematische Erfassbarkeit des Robotersystems. Eine geringe Masse ist vor allem im Bereich der Extremitäten notwendig, um die jeweilige Massenträgheit und somit die am Aktor wirkenden Beschleunigungskräfte gering zu halten. Im Bereich der Lokomotionsextremitäten wurden aus diesem Grund die Glieder der kinematischen Kette in der Art gestaltet, dass die zugehörigen Massenmittelpunkte möglichst nah an dem jeweiligen proximalen Gelenk liegen. Dazu

wurden unter anderem zur Aktuierung der Fußgelenke und des Kniegelenks Linearantriebe eingesetzt.

Die Strukturbauteile der Extremitäten wurden mittels iterativer FEM-Analysen optimiert. Dabei wurden schwach belastete Bereiche schrittweise entfernt. Weitere Öffnungen in der Struktur mussten montagebedingt freigehalten werden. Die Wandstärke der resultierenden Bauteile konnten weitestgehend auf die fertigungsbedingte Mindestwandstärke von 1,5 mm reduziert werden. Als Beispiel für die Optimierung der Strukturbauteile sei hier die Unterschenkelstruktur angeführt, die nach Optimierung bei einem Gesamtgewicht von 675 g liegt (Bild 2). Die Hauptstrukturbauteile der Lokomotionsextremitäten, der Hüftgelenke sowie der Oberarme und Schultern wurden als Aluminium Feinguss Teile (Legierung AlSi7Mg0.6) angefertigt.

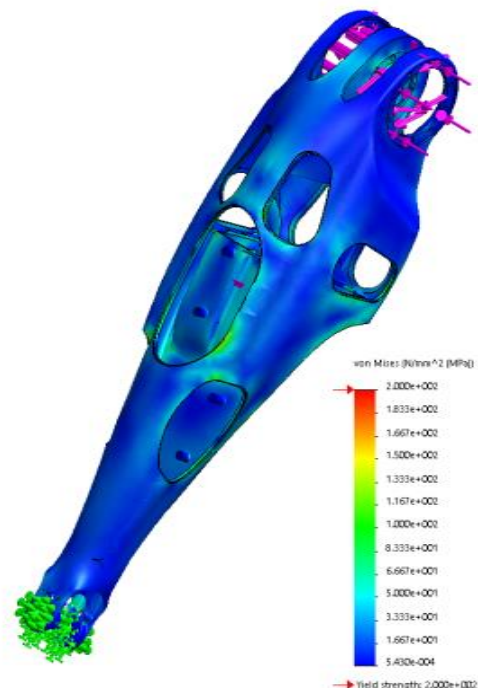


Bild 2: Darstellung der Spannungsanalyse einer Unterschenkelstruktur

Die Gesamtmasse des vollständig integrierten Roboters beträgt 62 kg. Davon entfallen 23,5 kg auf die Lokomotionsplattform inkl. der Torso-Freiheiten B1 und B2. 21,6 kg entfallen auf den Torso, 3,4 kg auf den Kopf und je 6,75 kg auf die Manipulationsextremitäten. Die Gesamtmasse des Roboters liegt dabei deutlich unter der Masse des durchschnittlichen menschlichen Körpers bei vergleichbarer Größe. Der BMI berechnet sich zu 15,52 kg/m². Verglichen mit der Massenverteilung im menschlichen Körper nach Dumas et al. (2007) [12] besteht eine signifikante Abweichung in der Massenverteilung zwischen oberer und unterer Körperhälfte zugunsten der Lokomotionsplattform. Die verglichenen Daten der einzelnen Roboterkomponenten können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Massenverteilung im Roboter RH5

Baugruppe	Masse (empirisch ermittelt) [g]	Massenverteilung nach Dumas, (männlich) [%]	Zielverteilung [g]	Differenz [g]
Kopf	3450	6,7	4160	710
Unterarm/Greifer	3150	2,3	1428	-1722
Oberarm	3600	2,4	1490	-2110
Torso gesamt	21599	33,3	20676	-923
Beine gesamt inkl. Verkleidung	23540	50,8	31541	8001
Gesamt	62089			

4. Antriebskonzept

Die Aktuierung der verschiedenen Freiheiten wurde gemäß der jeweiligen Gelenkwinkel, Drehzahl- und Drehmomentanforderungen mittels verschiedener Antriebskonzepte umgesetzt. In Gelenken, die einen großen Bewegungsraum erfordern, wurden serielle Ketten aus direkt auf den Gelenkachsen positionierten, rotatorisch wirkenden Antriebseinheiten aufgebaut. Zu diesen Gelenken gehören die Schultergelenke (A1-3) mit jeweils drei Freiheiten, sowie die ersten beiden Freiheiten der Hüftgelenke (L1-2). Es wurden dazu kompakte Antriebseinheiten mit integrierter Abtriebslagerung entwickelt. Jede Antriebseinheit umfasst einen ILM 70x10 BLDC Motor (TQ-Systems) mit integrierter Hall-Sensorik sowie eine CPL 25 Wellgetriebestufe (HarmonicDrive) mit einer Übersetzung von 1:100 bzw. 1:160. Abtriebsseitig wurde ein Absolut-Encoder (IC-Haus) zur Bestimmung des Gelenkwinkels vorgesehen. Das abtriebsseitige Spitzenmoment der Antriebseinheiten liegt bei 135 Nm bzw. 215 Nm bei einer Leerlaufgeschwindigkeit von 210 °/sec bzw. 131 °/sec.

Eine kleinere Antriebseinheit wurde analog aufgebaut und in den Gelenken A4, A7 und A8 sowie in Gelenk B3 eingesetzt. Die Aktuierung erfolgt durch jeweils einen ILM 50x8 Motor (TQ Systems) in Kombination mit einem CPL 14 Wellgetriebe (HarmonicDrive) mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:50 bzw. 1:80. Es wird ein durch das Getriebe limitiertes Spitzenmoment von 18 Nm bzw. 23 Nm erreicht. Die Leerlaufdrehzahl beträgt 660 °/sec bzw. 413 °/sec.

Für die Aktuierung der Kopffreiheiten H1-H3 wurden Servomotoren (SB2290G, Savöx) mit einem Spitzenmoment von 4,9 Nm und einer Maximaldrehzahl von 462 °/sec eingesetzt.

Im Sinne der unter 3.2 beschriebenen Verlagerung der einzelnen Massenmittelpunkte der Robotergelenke in Richtung des jeweils proximalen Gelenks, wurden in den Gelenken L3-L6, B1, B2 sowie A5 und A6 linear wirkende Antriebseinheiten verwendet.

In den Handgelenksantrieben A5 und A6 wurden jeweils zwei Antriebseinheiten, bestehend aus einem Bürstenlosen EC 22 Motor (Maxon) sowie einem Spindelgetriebe GP 22 s (Maxon) verwendet. Die maximale Vorschubkraft eines Aktuators beträgt 495 N bei einer Geschwindigkeit von 5 mm/s.

In den Antrieben der Fußgelenke (L5, L6) wird eine Kugelumlaufspindel (FBI 6x1, Eichenberger) direkt durch einen BLDC Außenläufer Motor (EC45 flat, Maxon) angetrieben. Die Spindelsteigung beträgt 1 mm. Es wird bei Spitzenmoment des Motors eine Vorschubkraft von 754 N erreicht. Die maximale Lineargeschwindigkeit beträgt 81 mm/sec.

Zur Aktuierung der Beinfreiheiten L3 und L4 wurde eine aus einem BLDC Motor (ILM 70x18, TQ-Systems) und einer Kugelumlaufspindel (FBR 15x5, FBR12x4, Eichenberger) bestehende Antriebseinheit entwickelt. Dabei wird bei stillstehender Spindel die

Umlaufmutter direkt durch den BLDC Motor angetrieben. Bei einer Spindelsteigung von 5 mm (L3) und 4 mm (L4) kann so eine maximale Vorschubkraft von 4740 N bzw. 5845 N generiert werden. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei Leerlaufdrehzahl beträgt 175 mm/sec bzw. 140 mm/sec. Optional wurde in diesen Antriebseinheiten die Integration von seriellen Elastizitäten vorgesehen, wodurch bei Zug und Druckbelastung eine maximale Einfederung von ± 10 mm ermöglicht wird. Zur sensorischen Erfassung der Einfederung wurden DMS-basierte Zug/Drucksensoren (8435, Burster) verbaut. Bei bekannter Federkennlinie kann somit gleichzeitig die Einfederung und die Aktorkraft erfasst werden. Bild 3 zeigt die beschriebene Linearantriebseinheit.

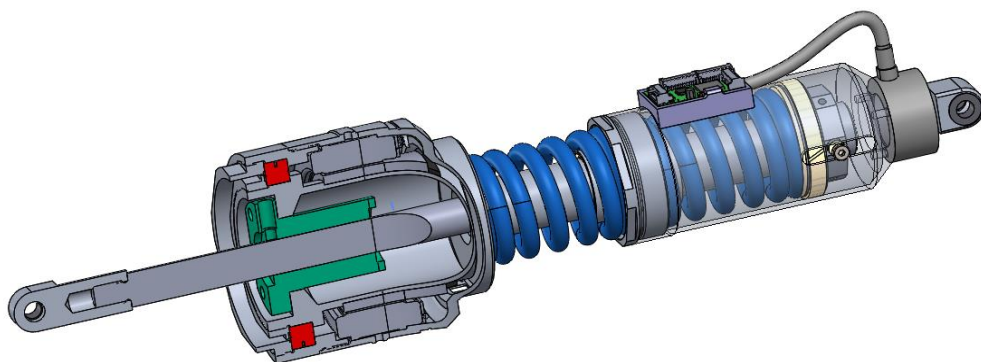


Bild 3: elastische Linearantriebseinheit

Eine kleine Version dieses Antriebs, ohne seriell elastische Erweiterungsoption wurde am Torsogelenk (B1, B2) eingesetzt. Die Aktuierung erfolgt hier durch einen ILM70x10 Motor (TQ-Systems). Die Spindelsteigung beträgt 5 mm. Es wird damit eine maximale Vorschubkraft von 2716 N erreicht. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei Leerlaufdrehzahl beträgt 291 mm/sec.

Lineare Antriebskonzepte bieten in einigen Gelenken einen zusätzlichen Mehrwert, indem ein diskontinuierliches Übersetzungsverhältnis auf die Drehmoment- und Drehzahlanforderungen abgestimmt werden kann. Dieser Effekt wurde vor allem in den Gelenken für die Vorwärtsbewegung der Lokomotionsextremitäten L3-L6 berücksichtigt. Beispielfhaft sei hier das Antriebskonzept der Vorwärtsbewegung des Hüftgelenks genannt.

Der zur Aktuierung des Gelenks eingesetzte Linearantrieb bringt über einen Hebelarm mit einer konstanten Länge $a = 114$ mm bei konstanter Vorschubkraft F_A ein Moment auf das Gelenk auf. Durch die Veränderung der Länge des effektiven Hebelarms entlang der Gelenkwinkelstellung φ ergibt sich die in Abbildung Bild 4 dargestellte, diskontinuierliche Drehzahl- Drehmoment Verteilung.

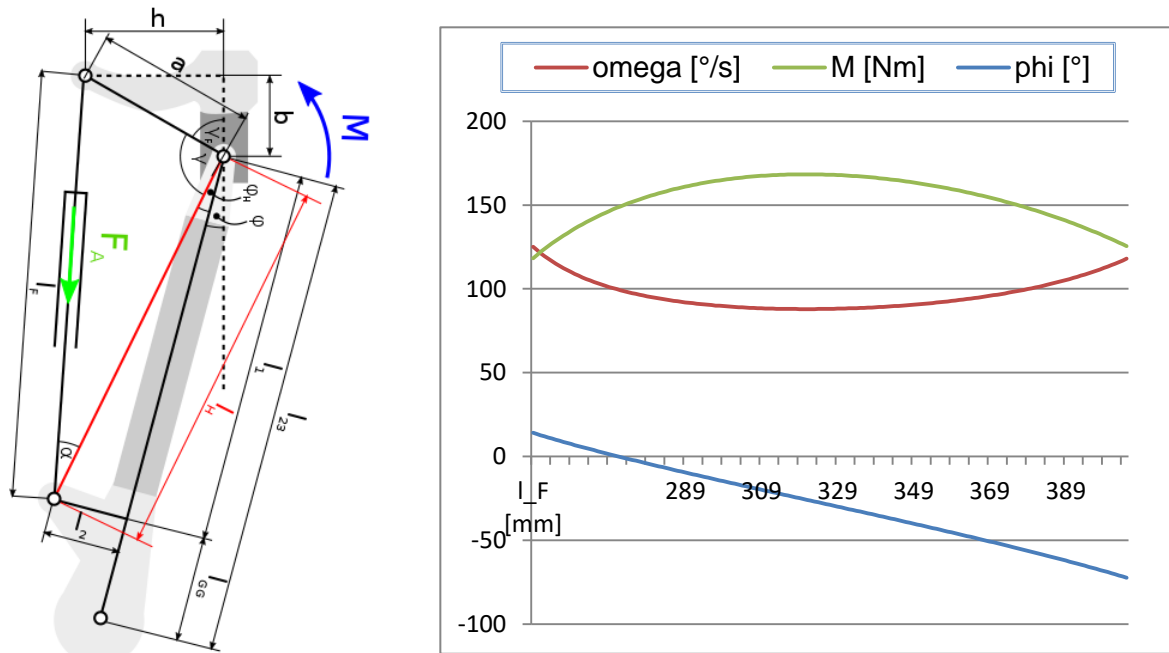


Bild 4: Diskontinuierliches Übersetzungsverhältnis bei der Aktuierung des Hüftgelenks (pitch)

Das größte Nennmoment von 168 Nm wird demnach bei einem Gelenkwinkel von -25° und einer Winkelgeschwindigkeit von $94^\circ/\text{sec}$ erreicht. Bei maximaler Auslenkung von 14° beträgt das Nennmoment 118 Nm bei einer Winkelgeschwindigkeit von $125^\circ/\text{sec}$. Das nichtkontinuierliche Übersetzungsverhältnis ermöglicht dem Gelenk in diesem Fall eine schnelle Bewegung aus der Ruhelage sowie ein erhöhtes Drehmoment im Bereich der größten zu erwartenden Gelenkbeugung während eines durchschnittlichen Gangmusters bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s (Vergleiche Zoss et al. [13]). Die Aktuierung des Kniegelenks wurde in vergleichbarer Art umgesetzt.

Im Bereich der Fuß- und Handgelenke (L5, L6 und A5, A6), sowie in den ersten beiden Freiheiten des Torso- und Kopfgelenks (B1,B2 und H2,H3) wurde jeweils eine parallelkinematische Aktuierung eingesetzt. Durch geringere erforderliche Gelenkwinkel, spielt die Einschränkung des Bewegungsraums, welche die Verwendung von Parallelkinematiken üblicherweise mit sich bringt, hier eine untergeordnete Rolle. Dagegen können positive Effekte, wie die kumulierte Antriebsleistung auf den einzelnen Gelenkachsen, sowie eine erhöhte Steifigkeit der kinematischen Kette genutzt werden.

Die Fuß- und Handgelenke sowie das Torsogelenk wurden jeweils als Kreuzgelenke aufgebaut, die durch je zwei parallel angeordnete Linearantriebe aktuiert werden. Die Achsen H2 und H3 des Kopfgelenks werden mittels eines Kegelrad-Differenzials angetrieben.

5. Hardware Komponenten

Die Auswahl der Hardwarekomponenten für das Robotersystem erfolgte nach dem Ansatz, eine dezentrale Hardwarearchitektur zu realisieren, bei der möglichst viele Informationen an der Messstelle direkt verarbeitet werden und auf die Signale entsprechend reagiert wird. Auf diese Weise erhält man ein Robotersystem mit weitestgehend unabhängig voneinander arbeitenden Teilsystemen, die lediglich auf einem hohen Abstraktionsgrad untereinander kommunizieren. Dieses Vorgehen bietet gegenüber klassischen Ansätzen, bei denen Sensordaten einem zentralen Rechner zugeführt werden den Vorteil, dass ein Zentralrechner weniger stark durch die

Sensordatenverarbeitung ausgelastet wird und damit Rechenkapazität für die Ausführung von Autonomiefunktionen in den oberen Verhaltensebenen zur Verfügung steht. Dieser Ansatz wird von den aktuellen Entwicklungen von Hardwarekomponenten unterstützt. Die Vielfalt spezialisierter Komponenten für unterschiedlichste Aufgaben steigt rasant, gleichzeitig werden die Komponenten zunehmend kostengünstiger. Beispiele für solche Entwicklungen sind Mixed-Signal Mikrocontroller, die über parametrisierbare analoge Bauelemente für die Signalverarbeitung verfügen und damit kompakte Designs für die Signalwandlung analoger Mess-Signale erlauben. Weitere Komponenten sind mobile GPUs wie die NVIDIA Jetson Boards sowie Applikationsprozessoren aus dem Smartphone-

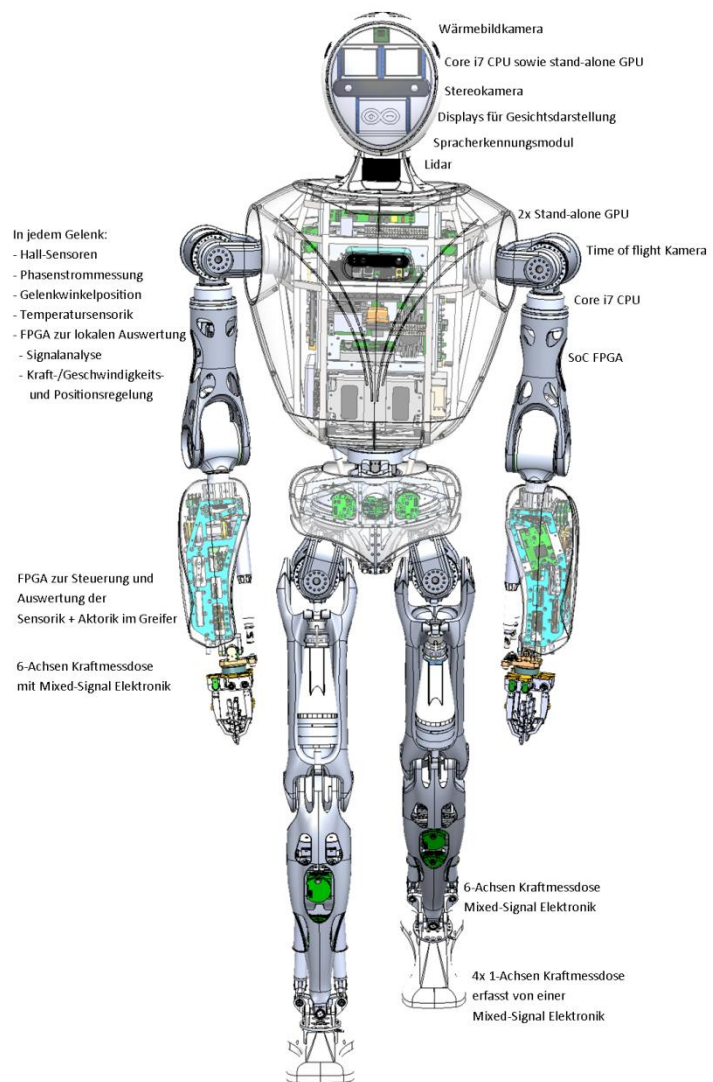


Bild 5: Hardwarearchitektur im humanoiden Roboter RH5

Segment, die mit einer Vielzahl von Funktionen, welche sich für die Nutzung in einem Roboter eignen, ausgestattet sind.

Bild 5 skizziert das im Roboter RH5 realisierte Hardwarearchitekturkonzept. Insgesamt verfügt der Roboter derzeit über 2 Standardrechner, 3 GPUs, 10 Mixed-Signal Prozessoren sowie über 35 FPGAs und 5 Standard Mikrocontroller.

6. Datenverarbeitung

Die steigende Rechenkapazität eingebetteter Systeme erlaubt die Realisierung von immer komplexeren Algorithmen in zeitlich gesehen frühen Instanzen der Signalanalysekette. Für die verschiedenen Datenverarbeitungsschritte wurden daher im Roboter auf die Aufgabe optimierte Recheneinheiten ausgewählt. So kann beispielsweise die Berechnung kinematischer Ketten auf einer, für die Ausführung von Matrizenoperationen optimierten Hardware erfolgen. Hierfür wurden dedizierte GPU Systeme integriert, auf denen die Kinematik der Arme des Roboters errechnet werden kann. Langfristig ist hierbei geplant, die Bewegungsmöglichkeiten der Arme zu jeder Pose kontinuierlich zu errechnen, um so flüssigere Bewegungsabläufe im Betrieb zu realisieren.

Die Nutzung mehrerer Kraftmessdosen im System erfordert auf Grund der ausgewählten Komponenten eine Signalwandlung der analog ausgegebenen Messdaten aus diesen Sensoren. Die hierzu notwendigen analogen Bauteile wie Operationsverstärker, Multiplexer und Analog-Digital Converter werden über eine Mixed-Signal Elektronik realisiert und im Mikrocontrollerbereich der Elektronik direkt mit der Kalibriermatrix verrechnet. Jeder Freiheitsgrad des Robotersystems wird mit einer intelligenten Motorsteuerung auf Basis eines FPGAs angesteuert. Dieser ist direkt neben den Motoren platziert und nimmt zur Motorsteuerung notwendige Messsignale auf und führt mit Kenntnis über die an der jeweiligen Stelle im Roboter vorherrschenden kinematischen Bedingungen die Motorregelung auf Ebene von Drehmomenten, Geschwindigkeiten sowie der Gelenkposition durch. Der Informationsaustausch zu und von den Gelenken wird über ein am Institut entwickeltes Kommunikationsprotokoll [NDLCom] realisiert. Die Datenpakete werden über LVDS mit einer Übertragungsrate von 320 Mbit/s transportiert. Die zu den Zentralrechnern fließenden Informationen werden mit einem System on Chip FPGA Design erfasst und per Ethernet an die Zentralrechner weitergeleitet. Die GPU im Kopf des Roboters ist für die Berechnung des stereoskopischen Kamerabildes zusammen mit einer Gesichtserkennung auf Basis von Convolutional Neural Networks vorgesehen. Die Wärmebildkamera soll dabei die Region of Interest für die Gesichtserkennung realisieren. Die durch das Stereobild erhaltenen Tiefeninformationen der Umgebung können durch die Sensordatenfusion mit den

Informationen aus dem Lidar abgeglichen und dadurch das Vertrauen in die erhaltenen Mess-Signale erhöht werden. Die im Robotertorso integrierte Time-of-flight Kamera ist leicht nach unten ausgerichtet und erfasst dadurch den Bereich unterhalb des Kopfs vor dem Roboter. Dieser Sensor kann während der Durchführung von Manipulationsaufgaben für den Abgleich der Informationen aus den Kameradaten verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DARPA, "Darpa Robotic Challenge, Finals 2015," 2013. [Online]. Available: <http://archive.darpa.mil/roboticschallenge/index.htm>.
- [2] H. Wang and Y. F. Zheng, "DRC-Hubo Walking on Rough Terrains," 2014.
- [3] Boston Dynamics, "ATLAS," 2017. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [4] J. Reher, E. A. Cousineau, A. Hereid, C. M. Hubicki, and A. D. Ames, "Realizing Dynamic and Efficient Bipedal Locomotion on the Humanoid Robot DURUS," pp. 1794–1801, 2016.
- [5] N. A. Radford *et al.*, "Valkyrie : NASA ' s First Bipedal Humanoid Robot," vol. 32, no. 3, pp. 397–419, 2015.
- [6] S. Bartsch *et al.*, "SpaceClimber : Development of a Six-Legged Climbing Robot for Space Exploration," pp. 1265–1272, 2010.
- [7] S. Bartsch *et al.*, "Development and Control of the Multi-Legged Robot M ANTIS," vol. 2016, pp. 379–386, 2016.
- [8] D. Kuehn, M. Schilling, T. Stark, M. Zenzes, and F. Kirchner, "System Design and Testing of the Hominid Robot Charlie," vol. 34, no. 4, pp. 666–703, 2017.
- [9] E. A. Kirchner, H. Woehrle, and F. Kirchner, "Recupera-Reha : Exoskeleton Technology with Integrated Biosignal Analysis for Sensorimotor Rehabilitation Recupera-Reha : Exoskeleton Technology with Integrated," no. February 2017, 2016.
- [10] M. Mallwitz, N. Will, J. Teiwes, and E. A. Kirchner, "THE CAPIO ACTIVE UPPER BODY EXOSKELETON AND ITS APPLICATION FOR TELEOPERATION," pp. 1–8.
- [11] J. Lemburg and others, "AILA - Design of an autonomous mobile dual-arm robot," *Submitt. to ICRA*, pp. 5147–5153, 2001.
- [12] J. Verriest, R. Ã. Dumas, and L. Che, "Adjustments to McConville et al . and Young et al . body segment inertial parameters," vol. 40, pp. 543–553, 2007.
- [13] E. E. Bleex, A. B. Zoss, H. Kazerooni, and A. Chu, "Biomechanical Design of the Berkeley Lower," vol. 11, no. 2, pp. 128–138, 2006.