Ausarbeitung zum Vortrag des Seminars:
Humanoide Roboter

Thema: **Kontrollkonzepte für pneumatische Muskeln**
Autor: **Frank Schlomann**

1 Gliederung

- Einleitung
  Um in das Thema der Steuerungskonzepte pneumatischer Muskeln einzusteigen, spielt die Betrachtung der Physik dieser Muskeln eine wesentliche Rolle für das Verständnis. Daher erfolgt zunächst eine Rückblende auf die bereits in früheren Vorträgen vorgestellten pneumatischen Muskeln, gefolgt von einer für diesen Vortrag spezifischen Problemstellung und abschließenden Lösungsansätzen.

- Steuerebene
  Auf der folgenden Steuerebene beschäftigt sich der Vortrag mit den Geometriefaktoren der Muskeln, die maßgeblich durch die Anwendung bestimmt werden, der Ventilauswahl sowie mit der Steuerung der Gaszufuhr.

- Regelebene
  Auf der Regelebene werden Regelelemente vorgestellt, die üblicherweise in Kaskadenregelkreisen zum Einsatz kommen sowie eine Möglichkeit vorgestellt, teure Messungen durch ein Beobachtersystem zu ersetzen und auch damit gute Ergebnisse zu erzielen.

2 Einleitung

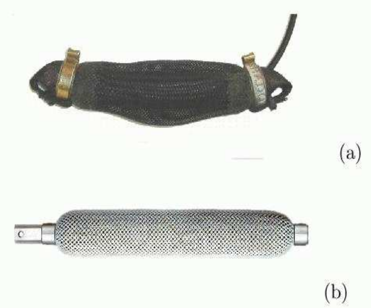


Fig. 3. Shadow (a) and Bridgestone (b) artificial muscles

In den von Shadow und Bridgestone hergestellten Muskeln handelt es sich um McKibben-Muskeln, bei denen ein Geflecht eines nicht dehnbaren Materials einen Ballon eines dehnbaren und gasundurchlässigen Materials umgibt. Bei einer Druckerhöhung dieses Ballons erhöht sich das Volumen des Muskels durch Vergrößerung des Durchmessers. Durch das umgebende Geflecht wird die Länge des Muskels reduziert.

Eine andere Art, künstliche Muskeln[1] zu entwerfen, besteht darin, das Ballonmaterial parallel zur Längsachse des Muskels zu falten. Das Material selbst darf sich nicht oder nur geringfügig ausdehnen und muss, wie auch bei den McKibben-Muskeln, gasundurchlässig sein. Dadurch entfallen die durch das umgebende Material bei den McKibben-Muskeln auftretenden Spannungen und Reibungen. Allerdings benötigt diese Muskelvariante, wie auf den folgenden Bildern zu sehen ist, mehr Platz.

Fig. 1: Photograph of deflated PPAM

Fig. 2: Photograph of inflated PPAM

[1] PPAM = pleated pneumatic artificial muscles

Um ein Gelenk in beiden Richtungen bewegen zu können, sind zwei Muskeln nötig - Agonist und Antagonist. Dies entspricht dem natürlichen Vorbild, da auch natürliche Muskeln nur Kraft in eine Richtung ausüben können.

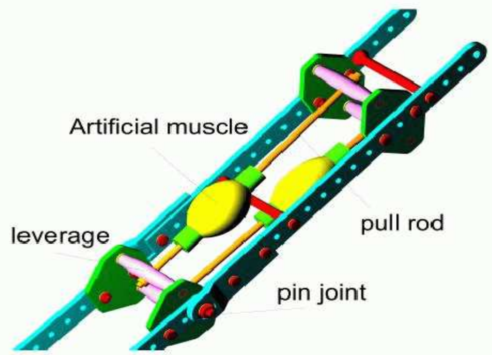


Fig. 4. Antagonistic working joint

Aus der Verwendung pneumatischer Muskeln ergibt sich ein Problem, das sich bei Verwendung elektrischer Antriebe sehr leicht lösen lässt: die möglichst genaue Einstellung eines Gelenkwinkels.

Die Lösung dieses Problems umfasst zunächst eine genau auf die Anwendung abgestimmte Auswahl der Hardware, d.h. Bestimmung der Größe der Muskeln durch benötigte Kraftmenge und Kontraktionsstrecke, Anzahl und Anordnung der Ventile bei zeitkritischen Anwendungen (z.B. zweibeiniges Laufen) sowie nötige Sensorik zur Bestimmung des Ist-Zustandes. Darüber hinaus empfielt sich, eine Regelkaskade zum Einsatz zu bringen.

3 Steuerebene

3.1 Geometriefaktoren

Auf der Steuerebene spielen die Geometriefaktoren der Muskeln eine wesentliche Rolle. Im Folgenden wird dies am Beispiel der PPAM verdeutlicht. Passives Verhalten (Elastizität) der Muskeln bleibt unberücksichtigt. Dies müsste bei einer Anwendung, bei der das zu kritischen Effekten führt, in die Berechnungen einbezogen werden.

Die Kraft eines Muskels lässt sich wie folgt berechnen:

$$F_t = pl^2 f_t \left(\epsilon, \frac{l}{R} \right) \tag{1}$$

Hierbei sind p = Druck [Pa], l = maximale Muskellänge, R = Radius des Muskels ohne Druck, ϵ = Kontraktion und f = dimensionslose Formel für einen Muskel mit entsprechender Geometrie und Kontraktion.

Die folgende Graphik zeigt Funktionsgraphen bei verschiedenen Verhältnissen von $\frac{R}{l}$.

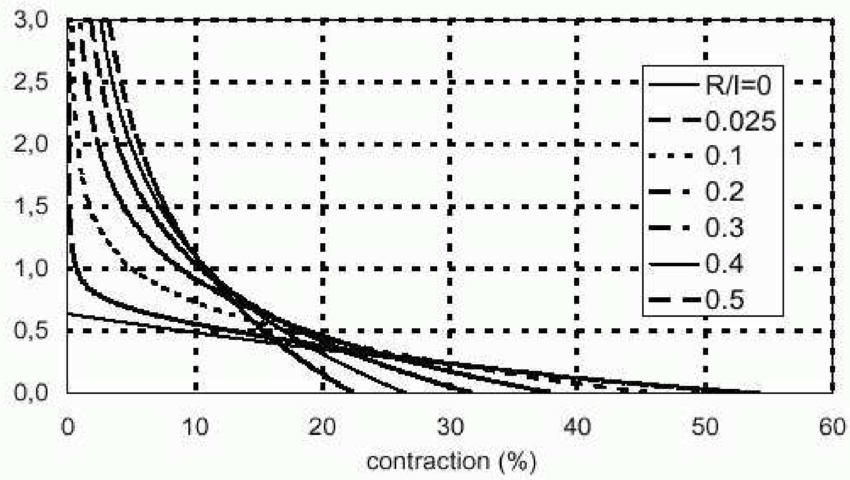


Fig. 3: Dimensionless function f_t

Der sinnvolle Kontraktionsbereich eines Muskels ist in Abhängigkeit von $\frac{R}{l}$ begrenzt auf 5% bis 35% der Muskellänge. Je größer R ist, desto größer ist die erzeugte Kraft, allerdings verringert sich dadurch die Kontraktion. Hat der Muskel seine maximale Länge und es wird Druck eingesteuert, so entwickelt der Muskel zunächst sehr große Kraft, die mit zunehmender Kontraktion stark nachlässt.

Bei einem vorgegebenen Radius (25 cm) und einer Druckbegrenzug (3 bar) ist die Muskellänge (100 mm) der maßgebliche Designfaktor. Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die unterschiedlichen Krafterzeugungen bei verschiedenen Drücken und Kontraktionen zwischen 5% und 35% in Abhängigkeit von $\frac{R}{l}$.

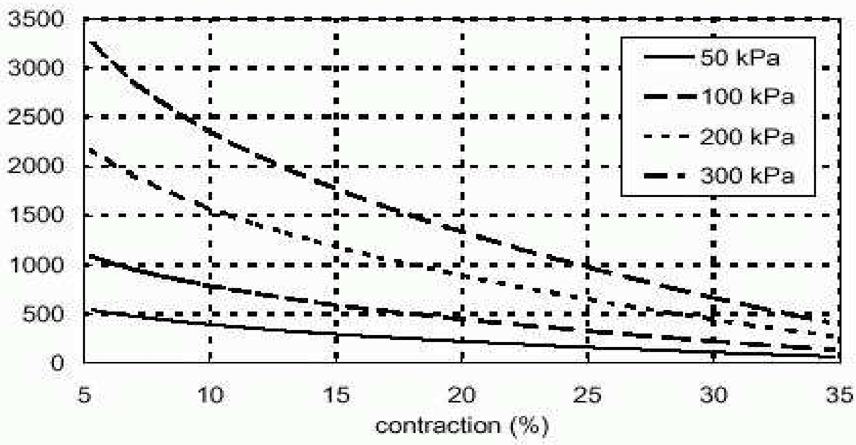


Fig. 4: Generated forces (N)

Der Designfaktor für die Größe Kraft ist der Muskeldurchmesser R, für die Kontraktionsstrecke ist dies die Muskellänge. Sind alle Geometriefaktoren applikationsspezifisch bestimmt, bleibt nur noch der Druck als Steuergröße. Um Druckänderungen steuern zu können, benötigen wir Ventile, die wiederum speziellen Anforderungen genügen müssen.

3.2 Ventile

3.2.1 Ventilauswahl

Die hierfür nötigen Ventie müssen schnell schalten können, sollen möglichst wenig Platz und Gewicht kosten und sollen schließlich ökonomisch mit der notwendigen Energie umgehen.

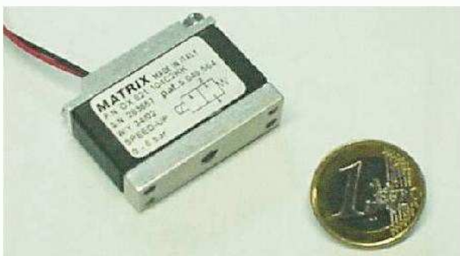


Fig. 5: Photograph of Matrix 821 2/2 *NC* Valve

3.2.2 Steuerung der Gaszufuhr

Die Vorteile dieser Schnellschaltventile liegen zum einen in ihrem geringen Gewicht (25g) und zum anderen in ihren Verschlusszeiten (< 1ms). Alternative Proportionalventile sind demgegenüber zu schwer und zu langsam und träge für zeitkritische Anwendungen (zweibeiniges Gehen). Um einen wirklich zügigen Gasdurchsatz und eine maximal genaue Steuerung zu erzielen, empfielt der Hersteller mit einer Überspannung während der Öffnungsphase zu arbeiten. Hierzu sind für ca. 2,5 ms 24 Volt anzulegen und danach mit einer Haltespannung von 5 Volt weiterzuarbeiten. Dies vermindert die Wärmeentwicklung und damit den Energieverlust, verkürzt die Ventilöffnungszeit und verlängert durch die verringerte mechanische und thermische Beanspruchung die Lebensdauer des Bauteils. Zur Erhöhung des Gasdurchsatzes sind Ventile parallel zu schalten.

Der Ventilverschluss erfolgt durch eine federgetriebene Verschlussklappe. Dabei beeinflussen die Federspannung, die Spulenspannung (Haltespannung, s.o.) und der Druck im System die Verschlusszeit. Um auch hier Bauteilbedingte Verzögerungen zu minimieren, ist die Entmagnetisierung der Spule durch einen Widerstand im Entladekreis und einer Gegenspannung zu beschleunigen.

Bei zeitkritischen Anwendungen wie dem zweibeinigen Gehen (BiPed LUCY) wird ein einfacher 2-state Controller eingesetzt, der folgende Charakteristik aufweist:

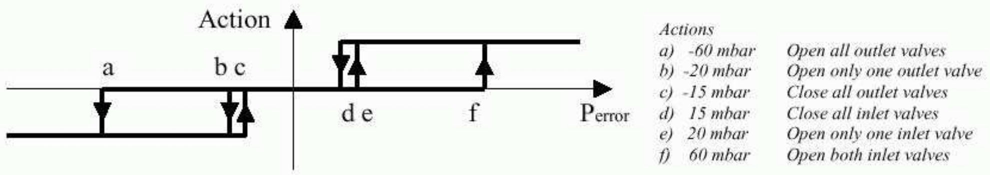


Fig. 13: Visualization of the actions of the bang-bang controller

4 Regelebene

4.1 Proportional-Regler

Ein P-Regler reagiert proportional zum Eingangssignal, er kann Störungen der Regelstrecke nicht ausgleichen, dadurch bleibt eine Regeldifferenz. Er reagiert unmittelbar auf eine Regelgröße, ist stabil, jedoch ungenau.

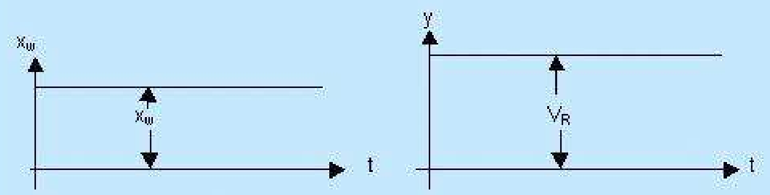


Abb. 3.2-10: Übergangsfunktion eines idealen P-Regers

4.2 Integral-Regler

Die Sprungantwort des Integral-Reglers ist ein linearer Anstieg. Der I-Regler neigt zu Schwingungen, ist daher instabil, benötigt für den Regelvorgang mehr Zeit als der P-Regler, stellt dafür allerdings die Regelgrößen exakt auf die Führungsgrößen ein.

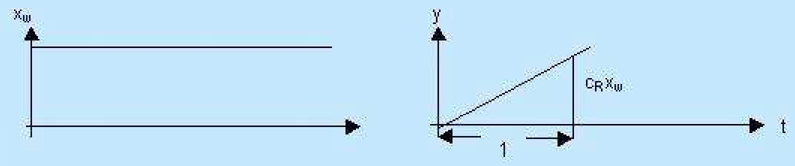


Abb. 3.2-15: Übergangsfunktion eines I-Reglers

4.3 Differential-Regler

Die Sprungantwort eines Differentialreglers ist ein theoretisch unendlich großer Nadelimpuls. Er gibt nur eine Stellgröße ab, solange sich das Eingangssignal ändert und regelt eine konstante Regeldifferenz daher nicht aus. Er ist allein als Regler unbrauchbar und daher nur mit anderen Grundtypen (P,I) einsetzbar. Der Grund für den Einsatz eines D-Reglers ist eine wesentlich schnellere Ausregelung von Störungen.

4.4 PID-Regler

Dieser Regler vereint die Übertragungsfunktionen aller vorherigen Regler zu einer. Dadurch werden die Vorteile der einzelnen Reglergrundtypen einbezogen und Nachteile teilweise ausgeglichen. Die Sprungantwort des PID-Reglers ist ein theoretisch unendlich hoher Nadelimpuls des D-Reglers, gefolgt vom Proportionalsprung des P-Reglers und dem linearen Anstieg des I-Reglers. Er zeigt eine optimale Anpassung an verschiedene Regelstrecken, liefert ein schnelles Vorhalten, gezieltes Anfahren in die Nähe des Sollwertes und abschließendes präzises Ausregeln der Regeldifferenz.

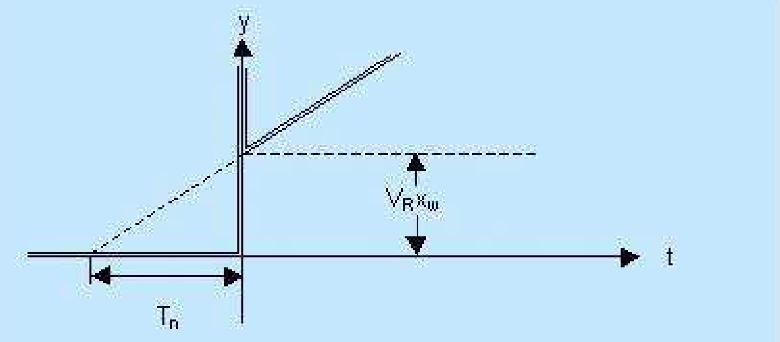
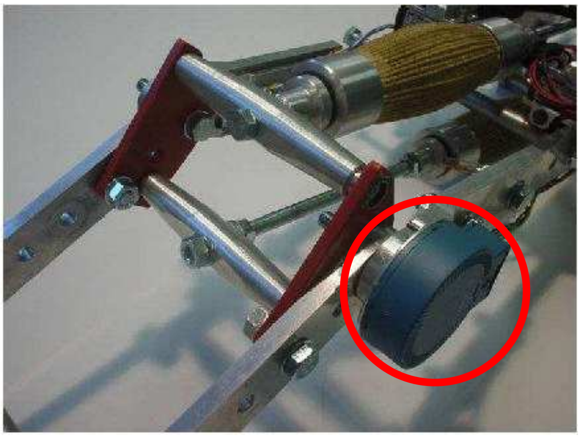


Abb. 3.2-20: Übergangsfunktion eines (idealen) PID-Reglers

Der Nachteil einer solchen Regelkaskade ist jedoch, dass Messwerte von Ist-Werten von Druck in den Muskeln und Gelenkwinkeldaten nötig sind. An dem zweibeinigen Laufroboter LUCY wurden deswegen an allen Beingelenken Gelenkwinkelencoder montiert.



Das Schema einer solchen Kaskadenregelung sieht wie folgt aus:

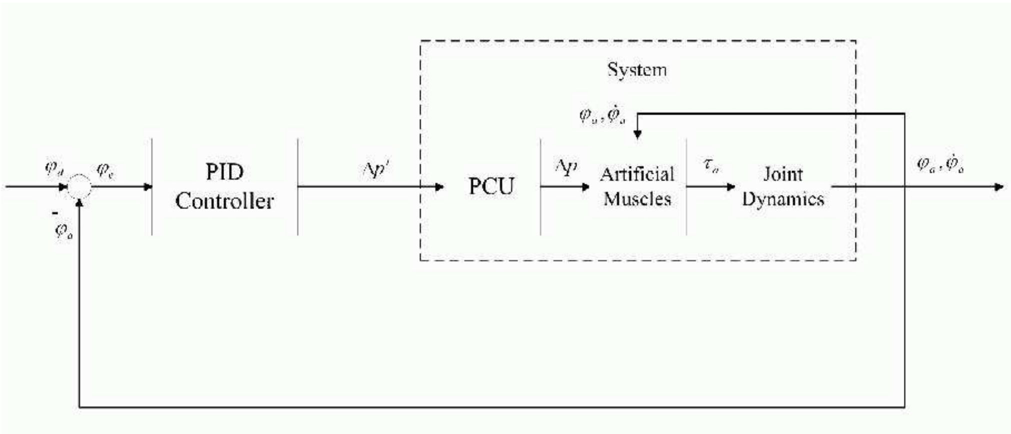


Fig. 11. Implementation of a regular PID controller

PCU = pressure control unit

In den meisten Fällen reicht ein normaler PID-Regler, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Bei den durch die künstlichen Muskeln zu erwartenden Nichtlinearitäten jedoch empfielt sich eine andere Architektur, um den Fehler des Positionskontrollregelkreises zu korrigieren. Daher wurde hier ein innerer Drehmomentregelkreis implementiert. Das Schema der modifizierten Kaskadenregelung sieht wie folgt aus:

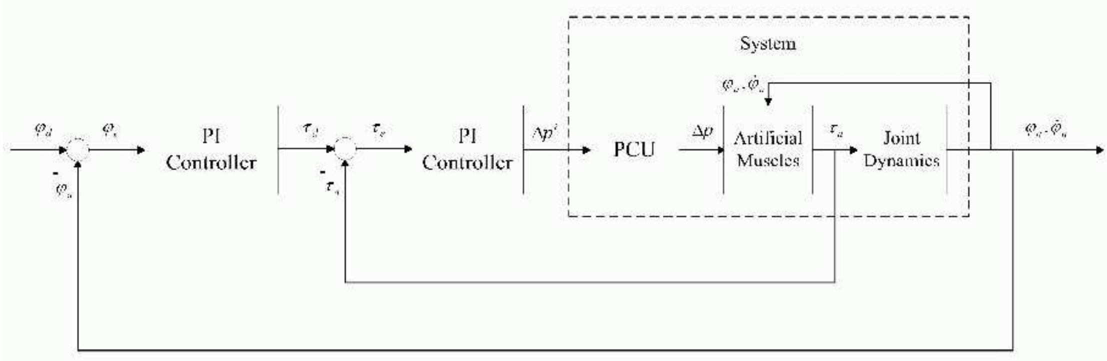


Fig. 15. PID controller with subsidiary torque control loop

Hier ergibt sich jedoch das Problem, dass Drehmomentmessungen sehr teuer und damit zu vermeiden sind. Die Idee, dieses Problem zu lösen, ist, die Drehmomentmessung durch ein Modell zu ersetzen, das mit einfacher messbaren Werten versorgt wird und das Drehmoment daraus berechnet. Die Voraussetzung für ein wenigstens gleich gutes Ergebnis wie bei der teuren Messung ist ein genaustens abgestimmtes Modell der Muskeln.

Die erzeugte Muskelkraft lässt sich wie folgt berechnen:

$$F = D_0^2 p \left(a \left(1 - \epsilon\right)^2 - b \right) \tag{2}$$

F = Kraft, die durch den Muskel erzeugt wird
D_0 = Muskeldurchmesser vor der Bewegung
p = muskelinterner Druck
ϵ = Kontraktionsverhältnis
a, b = muskelspezifische Parameter

Die Formel für die Kraft eingesetzt in folgende Gleichung für das zu berechnende Drehmoment

$$\tau = (F_2 - F_1)\, r \tag{3}$$

zusammen mit folgenden Beziehungen

$$\varphi = \frac{l_2 - l_1}{r} \qquad \epsilon = \frac{l_{max} - l}{l_{max}} \tag{4}$$

ergibt sich zu

$$\tau = a' \Delta p r^3 \varphi^2 + b' r^2 \varphi + c' \Delta p r \tag{5}$$

a', b', c' = neue Gelenkparameter
r = Radius des „Zahnrades“

Nun können einige Vereinfachungen vorgenommen werden, wenn keine großen Druckänderungen vorkommen und die Gelenkwinkel hinreichend klein bleiben. In diesem Fall kann der nichtlineare Teil der Formel bernachlässigt werden. Allerdings muss die Dämpfungscharakteristik der Muskeln bei hohen Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Damit ergibt sich für das Actuator-Modell:

$$\tau = A r^2 \varphi + B r \Delta p + C \dot{\varphi}^3 + D \dot{\varphi} \tag{6}$$

Die Parameter A, B, C und D sind durch die Muskeln gegeben. Damit entfällt die teure Drehmomentmessung.

Das Schema der PI-MBPI-Kaskadenregelung sieht nun folgendermaßen aus:

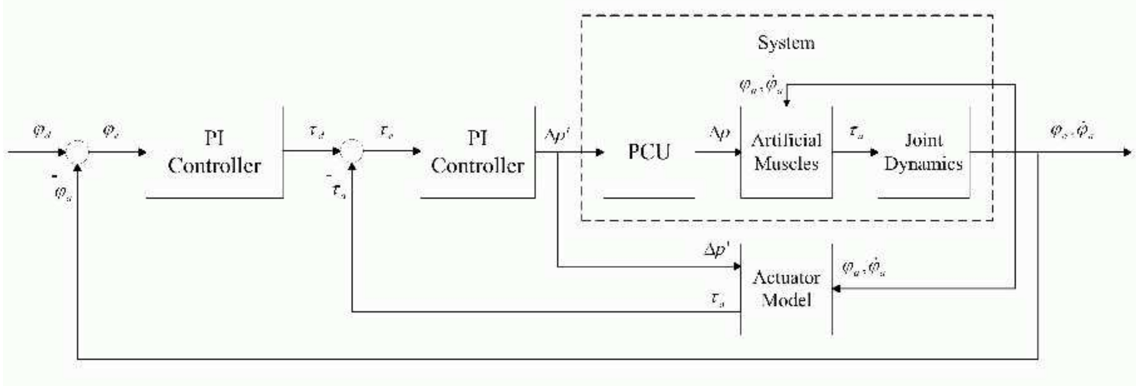


Fig. 16. Model-based controller

Mit dieser Steuerungs- und Kaskadenregelungsarchitektur wurde ein zweibeiniger Laufroboter gebaut (LUCY), der ausschließlich mit gefalteten künstlichen Muskeln (pleated pneumatic artificial muscles - PPAMs) funktioniert. Dies zeigt, dass trotz hochgradig nichtlinearen Verhaltens pneumatischer Muskeln durch eine geeignete Regelkaskade und möglichst weitgehende Auslagerung der Steuerungselemente auf hardwarebasiernde Controller (Ventilsteuerung) zeitkritische Anwendungen wie zweibeiniges Gehen realisierbar ist.

Literatur

[1] Joachim Schröder, Kazukiko Kawamura, Tilo Gockel, Rüdiger Dillmann: *Improved control of a humanoid arm driven by pneumatic actuators*, Industrial Applications of Informatics and Microsystems, University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany,
Center of Intelligent Systems, Vanderbilt University, Nashville, TN, USA

[2] Ronald Van Ham, Frank Daerden, Björn Verrelst, Dirk Lefeber: *Control of a Joint actuated by two Pneumatic Artificial Muscles with fast switching ON/OFF-Valves*,
Vrije Universiteit Brussel, Department of Mechanical Engeneering, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium

[3] Ronald Van Ham, Frank Daerden, Björn Verrelst, Dirk Lefeber: *Pressure Control with ON/OFF-Valves of Pleated Pneumatic Artificial Muscles in a Modular One-Dimensional Rotational Joint*
Vrije Universiteit Brussel, Department of Mechanical Engeneering, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium

[4] Björn Verrelst, Ronald Van Ham, Jimmy Vermeulen, Dirk Lefeber, Frank Daerden:
Concept of Combining Adaptabe Passive Behaviour with an Active Control Structure using Pleated Artificial Pneumatic Muscles for the Bipedal Robot LUCY
Vrije Universiteit Brussel, Department of Mechanical Engeneering, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium

[5] 3.2.1.3. Lineare (stetige) Regler: http://rfhs8012.fh-regensburg.de/saj39122/vhb/NN-Script/script/gen/k03020103.html

[6] Regler: http://de.wikipedia.org/wiki/PID-Regler

[7] Reglerentwurf:
http://141.99.140.157/d/imr5/RTKurs/11seite/11seite.html

[8] Projekt PID-Regler:
http://www.cti.ac.at/pester/projekte/pid_controler/node1.html