

解説

人間と共存するロボットのための肩機構

—形態的親和性と受動的柔らかさ—

Shoulder Mechanism for Humanoid Robots that Coexist with Human
—Morphological Affinity and Mechanical Passive Compliance—

岡田昌史* 中村仁彦* *東京大学大学院情報理工学系研究科

Masafumi Okada* and Yoshihiko Nakamura* *Graduate school of information science and technology, University of Tokyo

1. はじめに

多くのヒューマノイド・ロボットが開発されている今日、ヒューマノイド・ロボットは物理機械の枠を越えて身体を備えた知能機械として認識されようとしている。ヒューマノイド・ロボットの目的はもはや作業の遂行にとどまらず、人間を取り巻く環境の一部として我々と接触し、コミュニケーションをとることが要求されるようになってきた。これまでのロボットは作業を適確に精度良く行うことを目的としていたため、その構造は高い剛性を有し、設計や制御の容易性、コスト面から簡潔な機構が必要とされてきた。これに対し、人間とその環境を共有するヒューマノイド・ロボットは恐怖感や違和感を与えないために人間らしい形態・動きを必要とし、さらに、主に安全性からコンプライアンスを持つ必要がある。そこで、我々は「(1)人間との形態的親和性」「(2)受動的柔軟性」を目的としたヒューマノイド・ロボットの設計論を与え、サイバネティック・ショルダを開発した[1]。この機構はヒューマノイド・ロボットの肩部3自由度機構で、一般に5自由度といわれている[2]人間の肩の、自然な動きを3自由度の範囲で実現するものである。また、その閉リンク構造を利用して機械的なコンプライアンスの導入を実現し、さらに、柔らかなリンクによるパッシブコンプライアンスと H_∞ 制御理論を用いたアクティブコンプライアンスによるハイブリッドなコンプライアンスの実現法を提案した[3]。本稿では、開発したサイバネティック・ショルダとその人間らしい動き、パッシブコンプライアンスの実現に関して解説する。

2. サイバネティック・ショルダの開発

開発したサイバネティック・ショルダの概略を図1に示す。この機構は中心(点 β, δ)にユニバーサルジョイントを持つ円盤 B と D が中心軸 G によって結合されており、これら二つのジョイントの拘束が三つのリンク E によって

なされる Double universal joint の機構を持つ[4]。 a は球面とスライドジョイント、 b は2自由度ジョイント、 d は球面ジョイント、 e はスライドジョイントで点 A を鉛直面内で動かすことで、中心軸 G の方向を変化させる。これにより、肩先の円盤 D が駆動される。また、円盤 B を回転させることで機構全体が回転し、合計3自由度の動きを実現する。

このモデルをもとに、図2, 3, 4に示される三つのサイバネティック・ショルダを開発した。図2は1号機で3章で述べる人間らしい動きと4章で述べるパッシブコンプライアンスの導入を目的としている。図3に示す2号機では高剛性化を行い、さらにパッシブコンプライアンスの特性が可変となるプログラマブル・パッシブコンプライアンスの導入を目的としている。図4に示す3号機では小型化、軽量化を目的とした。

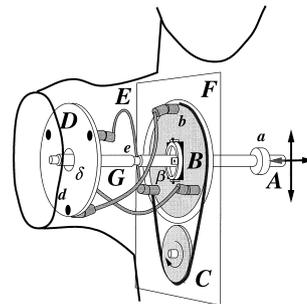


図1 サイバネティック・ショルダの概略

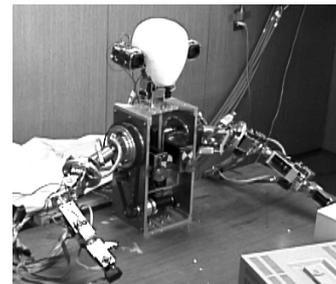


図2 サイバネティック・ショルダ 1号機

原稿受付 2001年8月30日

キーワード: Passive Compliance, Human-Like Motion, Cybernetic Shoulder

*〒113-0033 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

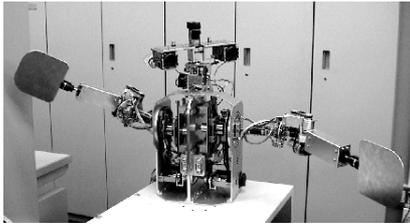


図3 サイバネティック・ショルダ 2号機

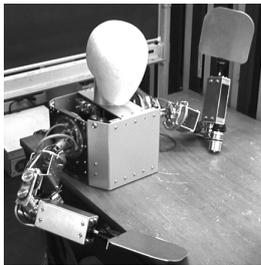


図4 サイバネティック・ショルダ 3号機

3. 人間の動きとロボットの動き

3.1 形態的親和性

サイバネティック・ショルダの開発目的の一つに人間との形態的親和性がある。ヒューマノイド・ロボットが人間らしい形態・動きを持つことで我々に恐怖感や違和感を与えず、人間と環境を共有できる。また、我々の環境は人間に適した形に作られており、ヒューマノイド・ロボットは人間と同じ動きを持つことで環境に適することが容易になる。本章ではサイバネティック・ショルダの動きと人間の動きを比較し、その人間らしい動きを評価する。

3.2 定性的な評価

図5に人間が手を前後に動かしたときの様子を示す。ここで、大きな特徴といえるのは肩の回転中心が一定ではなく、腕の動きに伴って移動していることである。我々はこの動きに注目し、これが人間らしい動きを生み出していると考え。図6にサイバネティック・ショルダの動きを示す。これはサイバネティック・ショルダの二次元モデルであり、「●」が回転中心を示す。人間の動きと同様に肩の回転中心が腕の動きに伴って移動する。これにより、サイバネティック・ショルダでは人間らしい動きが実現できているといえる。従来の、肩の3軸の回転中心が1点で交わるような機構ではこの動きは困難である。

3.3 定量的な評価

次に、人間の動きとヒューマノイド・ロボットの動きを比較することで、人間らしさを定量的に評価する。ここでは、人間の動きとして図7に示される動作を考えた。これはテーブルにあるコップを取って水を飲み、コップをもとの位置に戻す動作である。人間に図8に示されるようなマーカを設置し、

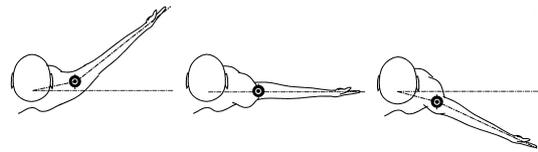


図5 人間の腕の動きと回転中心

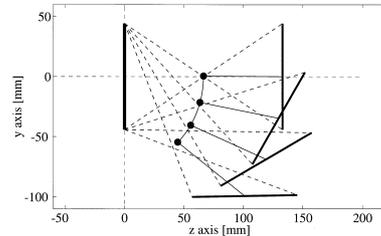


図6 サイバネティック・ショルダの動きと回転中心

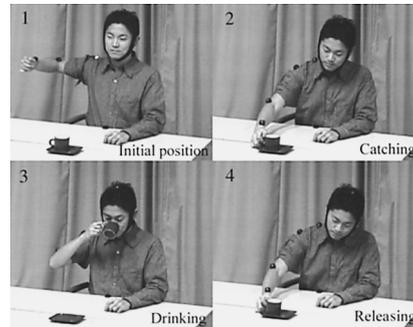


図7 人間の水飲み動作

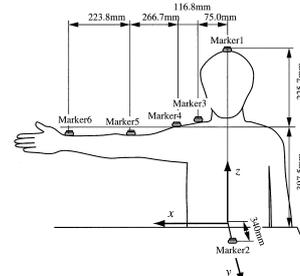


図8 マーカの位置

この動きをモーションキャプチャした。次に、図8と同じ大きさのヒューマノイド・ロボットを設定し、人間のマーカの絶対座標における位置を $X_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) としこれに対応するヒューマノイドのマーカ位置を $x_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) とする。このとき、キャプチャ時間 T に対して評価関数 J を以下のように設定し、

$$J := \int_0^T J_s(t) dt \quad (1)$$

$$J_s(t) := \sum_{i=1}^6 k_i \sqrt{X_{di}^T(t) X_{di}(t)} \quad (2)$$

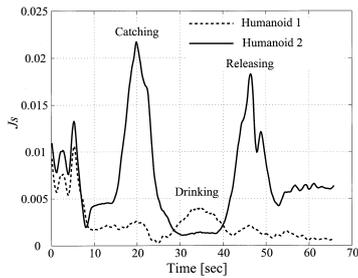


図9 評価関数の時間変化

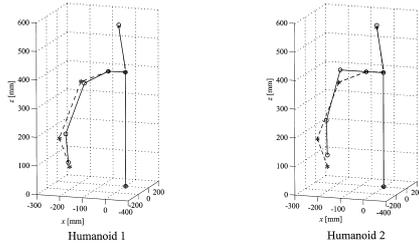


図10 ヒューマノイド・ロボットの姿勢の比較

$$X_{di}(t) := X_i(t) - x_i(t) \quad (3)$$

これを最小化する姿勢を求めそのときの評価関数の大きさによって人間らしい動きの評価とする。

ここで、ヒューマノイド・ロボットはサイバネティック・ショルダを有するもの(ヒューマノイド1)と肩の3自由度の回転軸が1点で交わる従来型のもの(ヒューマノイド2)の二つを設定し、それぞれの動きを人間の動きと比較した。このときの $J_s(t)$ の時間変化を図9に示す。これにより、サイバネティック・ショルダを用いたヒューマノイド1ではより人間の自然な動きを実現できることが分かる。コップを取るときの二つのヒューマノイド・ロボットの姿勢を図10に示す。左がヒューマノイド1、右がヒューマノイド2であり、点線がモーションキャプチャデータ、実線がヒューマノイド・ロボットの姿勢「*」「○」がそれぞれマーカ位置を表す。また、それぞれのヒューマノイド・ロボットにおける評価関数は以下ようになった。

$$J_{\text{Humanoid 1}} = 0.156, \quad J_{\text{Humanoid 2}} = 0.470 \quad (4)$$

これらの結果からサイバネティック・ショルダを用いたヒューマノイド・ロボットは肩機構の回転中心が一点で交わるような従来型に比べ人間らしい動きをとることが理解できる。

4. パッシブコンプライアンスの実現

4.1 受動的柔軟性

人間と共存するヒューマノイド・ロボットは安全性の面から柔らかさを持つ必要がある。柔らかさを実現する方法として、構造の機械的柔らかさを利用したパッシブコンプライアンスとアクチュエータによって仮想的なばね特性を

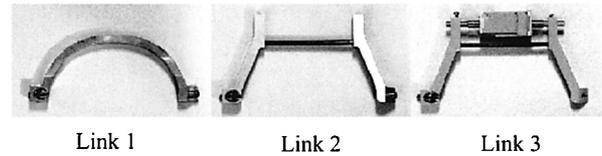


図11 柔らかなリンク

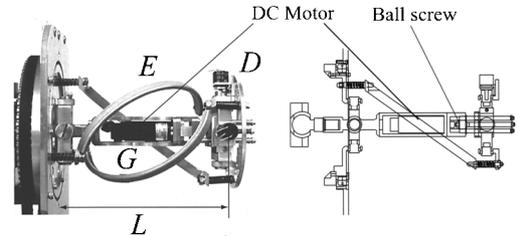


図12 プログラマブル・パッシブコンプライアンス機構

実現するアクティブコンプライアンスがあるが、衝突などの衝撃力を吸収するためには前者が必要である。また、機械的な柔らかさを持つ構造は位置エネルギーを蓄えることが可能である。このエネルギーの蓄積と放出を適当に制御することで、小さなアクチュエータパワーで大きなエネルギーが獲得される。パッシブコンプライアンスには、このような機能的な役割が存在し、力学的技量の実現を可能にする[5]。本稿では、サイバネティック・ショルダにおけるパッシブコンプライアンスの実現について述べる。ヒューマノイド・ロボットの柔らかさに関する研究はこれまでに多数なされているが[6]~[9]ここでは大きな力を伝達可能な機構を目的としている。

4.2 サイバネティック・ショルダのパッシブコンプライアンス

図1の点 β, δ における二つのユニバーサルジョイントはリンク E の長さによってその動きが拘束されている。そのため、リンク E が柔らかさを持つことで機構全体の柔らかさが実現できる。この観点から、図11に表される三つのリンクを設計した。リンク1は硬いもの、リンク2はカーボンファイバ製で柔らかさを実現している。リンク3はリンク2にダンパをつけて減衰効果を高めたものである。ここで、サイバネティック・ショルダの中心軸 G は大きな剛性を持つ。そのため、腕全体を持ち上げるといった力に対しては大きな駆動力を伝達し、点 δ におけるジンバル機構の回転方向に対してのみコンプライアンスを持つ機構となっている。

4.3 プログラマブル・パッシブコンプライアンスの実現

サイバネティック・ショルダ2号機の詳細を図12に示す。中心軸 G の内部にはリニアアクチュエータが搭載されており、二つの円盤間の距離 L をアクティブに変化させる。これにより、リンク E には内力が働きこのリンクが非

5. おわりに

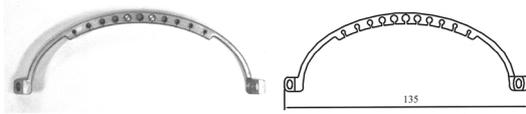


図 13 非線形な応力歪み特性を持つリンク

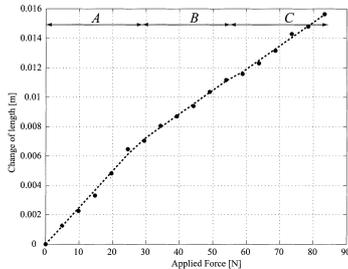


図 14 リンクの応力歪み特性

表 1 リンクのばね定数

Applied force	Contracted length	Spring constant
0 ~ 30 [N]	0 ~ 7 [mm]	4.009×10^3 [N/m]
30 ~ 54 [N]	7 ~ 15 [mm]	6.203×10^3 [N/m]
54 ~ [N]	15 ~ [mm]	6.303×10^3 [N/m]

線形な応力歪み特性を持つことで、プログラマブル・パッシブコンプライアンスが実現される。この機能を実現するために、リンク E として図 13 に表されるリンクを設計した。このリンクには直径の異なる穴が開いており、その下方にはスリットが刻まれている。応力が働くとリンクが縮むとスリットが閉じ、リンクの硬さを支配する最小厚さが増える。これにより、離散的な非線形応力歪み特性が実現される。このリンクの応力歪み特性を図 14 に示す。図の A , B , C それぞれの領域におけるばね定数は表 1 のようになった。このリンクが非線形な応力歪み特性を有することが分かる。

本稿では、「形態的親和性」と「受動的柔軟性」を目的としたヒューマノイド・ロボットの設計論を与え、これに基づいて設計したサイバネティック・ショルダに関して解説した。また、「形態的親和性」の評価としてサイバネティック・ショルダと人間の動きを比較することでその人間らしい動きを定性的・定量的に評価し、パッシブコンプライアンス、プログラマブル・パッシブコンプライアンスの実現について解説した。本研究は未来開拓学術研究推進事業「マイクロメカトロニクス・ソフトメカニクス」の支援を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 岡田, 中村: “サイバネティック・ショルダの開発 – 人間の肩の動きを模倣した 3 自由度機構 –”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.690–698, 2000.
- [2] I.A. Kapandji (荻島秀男 監訳, 嶋田智明訳) 関節の生理学. 医歯薬出版株式会社, 1996.
- [3] M. Okada, Y. Nakamura and S. Hoshino: “Design of Active/Passive Hybrid Compliance in the Frequency Domain,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2250–2257, 2000.
- [4] M.E. Rosheim: Robot Evolution, The Development of Anthropotics. JOHN WILEY & SONS, INC., 1994.
- [5] M. Okada, Y. Nakamura and S. Ban: “Design of Programmable Passive Compliance for Humanoid Shoulder – Towards Skill of Compliance of Humanoid Robots –,” in Experimental Robotics VII (D. Rus and S. Singh Eds.), Springer-Verlag, pp.31–40, 2001.
- [6] 兵頭, 小林: “非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.8, pp.1244–1251, 1993.
- [7] 大鐘, 兵頭, 小林: “非線形バネ要素を持つ 7 自由度腱制御アームの機構と制御”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.8, pp.1152–1159, 1996.
- [8] 森田, 菅野: “メカニカルインピーダンス調節機構による関節制御 – 機構の提案とロボット指への適用 –,” 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.131–136, 1996.
- [9] 桂島, 菊池, 阿部, 内山: “関節の柔らかいロボットアームの設計・製作”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.963–964, 1998.



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1969年3月21日生。1994年3月京都大学大学院工学研究科修士課程(応用システム科学専攻)修了。1996年9月同大学大学院博士課程修了, 博士(工学)。1996年10月日本学術振興会特別研究員(PD)。1997年2月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト(日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究員)。2000年4月同大学大学院工学系研究科講師。2001年4月同大学大学院情報理工学系研究科講師となり現在に至る。ヒューマノイドロボット, ロバスト制御の研究に従事。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



中村仁彦 (Yoshihiko Nakamura)

1954年9月22日生。82年京都大学大学院工学研究科精密工学科博士課程退学。同年より87年まで同大学助手。87年より91年3月までカリフォルニア大学サンタバーバラ校助教授, 準教授。同年4月より東京大学に勤務。現在同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授。工学博士。ロボットの運動学, 動力学, 制御, および知能の問題, 特に非ホロノミックロボット, 脳型情報処理, ヒューマノイドやCGの運動・力学計算, 外科手術用ロボットなどの研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEE, ASMEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)