

解 説

人間らしい柔らかな動きと駆動機構

Human-Like Compliant Motion and Its Mechanism

岡田 昌史* *東京大学大学院工学系研究科

Masafumi Okada* *Faculty of Engineering, University of Tokyo

1. はじめに

ロボットが人間と環境を共にし協調して生活を行うことが望まれるようになり、その人間との親和性が問われるようになってきている。人間がロボットに「親しめる」大きな要因として、

(1) ロボットが人間や環境を傷つけないこと

(2) ロボットが人間に恐怖感を与えないことが挙げられる。さらに(2)は

(2-1) ロボットの安全性によるもの

(2-2) ロボットの人間らしさによるもの

に分けられる。ロボットにコンプライアンスを実現する方法として、制御によって電気的に実現する研究が古くからなされてきた[1]~[5]。このコンプライアンスは産業用ロボットのインピーダンス制御のためのものであり、人間の手先の「技量」をコンプライアンスによって実現することを目指したものである。ここでは準静的な接触が考慮され、作業を器用に行うことを目的としていた。

この方法を用いてロボットにコンプライアンスを持たせ、人間に傷をつけないロボットの開発を行う研究もいくつかなされてきた。しかし、ロボットと人間あるいはその環境との接触は動的接触であり、制御系のサンプリングタイム・センサの分解能・アクチュエータのパワー不足などの要因により、「衝撃」に対する力制御を正確に行うことは難しい。そこで、衝撃の吸収のために機構そのものに柔らかさを持たせるパッシブコンプライアンスの重要性も注目されている。特に医療用ロボットやヒューマノイドでは人間と接触する機会が多いため、パッシブコンプライアンスの導入が必要となる。

さらに、従来のロボットでは設計・機構・制御の容易さから単にモータと金属製のリンクを結合させたものが多い。しかし、この機構では硬い・冷たい・機械的といった印象が恐怖感を引き起こし親和性は崩れる。そこで、どの

ようなロボットが安全で人間らしい印象を与えるのかを(2-1)(2-2)の観点から考察することが必要であろう。特に(2-2)に関しては人間の動きを解析し、これに近い動きを実現することで人間とロボットの親和性を高めることが必要と考えられる。

これらの考えに基づき、本解説ではまず(1)の目的を達成するために提案された、パッシブコンプライアンスを持つ機構をまとめる。また(2)に関してロボットの安全性を評価した研究と人間らしい動きを持つ機構に関する研究を紹介する。さらに、人間らしい動きを持つ機構として筆者らが提案したサイバネティック・ショルダについて詳しく紹介する。この機構は閉リンク構造の利点を用いることで、回転中心を一定としない動きを持ち、またパッシブコンプライアンスの導入が容易なものとなっている。

2. コンプライアンスを持つ機構

これまでにコンプライアンスを持つ機構は数多く提案されている。本章ではこれらについて紹介する。コンプライアンスの実現を目指した機構としてL-Kovitzらの機構が挙げられる[6]。この機構では非線形ばねを用いることでコンプライアンスが可変なプログラブルパッシブコンプライアンスが実現されている。また、ダンパ中の液体流量を変化させることで、粘性も可変な機構となっている。兵頭ら[7]、小金澤ら[8][9]も同様なコンセプトからプログラブルパッシブコンプライアンスを実現する機構を開発しており、兵頭らはこの機構を用いた7自由度アームを開発している[10]。これらの機構はワイヤあるいはリンク駆動を用いた拮抗筋型の関節であり二つのアクチュエータを協調させて駆動、コンプライアンスの制御を行う。文献[11]ではワイヤが切れた場合の安全性、制御性能の劣化に関して解析を行っている。これらでは冗長なアクチュエータを用いてコンプライアンスを変えるので、信頼性の高い可変コンプライアンスが実現できる。

これに対し、菅野ら[12]~[14]は関節そのものにプログラブルパッシブコンプライアンスを実現する機構MIA (Mechanical Impedance Adjuster)を開発した。この機構ではリンクとコンプライアンスを制御するアクチュエー

原稿受付 1999年5月7日

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

*〒113-8656 文京区本郷7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

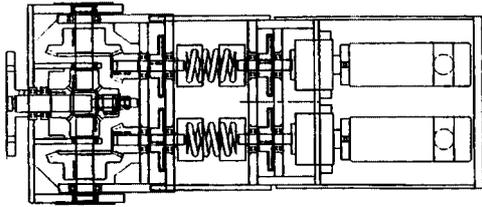


図1 ソフトサーボモジュール(文献[17]より引用)

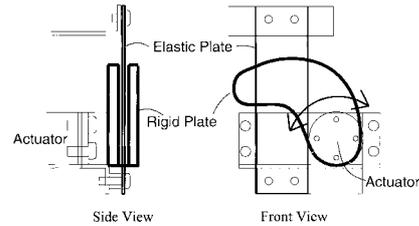


図2 ヒューマノイドロボットの柔軟性可変構造

タが独立しており、その制御が容易であり機構もコンパクトに設計が可能である。

山下ら [15], 早川ら [16] は拮抗型の構造に柔らかいアクチュエータとしてそれぞれラパチュエータ, 空気圧ペローズを用いた機構を開発している。どちらも特別なコンプライアンス機構は用いず, アクチュエータの柔らかさによってパッシブコンプライアンスを実現している。

内山らはモジュール化したコンプライアンス機構を開発した [17]。この機構は図 1 に示すように, 差動ギアを持つ 2 自由度機構でモータの出力軸にばねがついたものである。ポテンショメータを用いることで, モータの回転角とひずみの角度が計測できる機構になっている。

これらのコンプライアンス機構を用いることで, 人間や環境を傷つけないロボットが設計されることが期待できる。

3. 人間とのインターフェース

機械がコンプライアンスを持つことにより安全なロボットが実現され, 人間の機械に対する恐怖感は軽減される。しかし, ロボットが人間との親和性を持つためにはロボットと人間のインターフェースも重要であり, 人間の恐怖感に対する解析, 人間的な動きの実現に対する研究が行われるようになっていく。

3.1 ロボットの安全性

人間がロボットに対してどのように感じるかを解析することは, 安全で親和的なロボットを設計する上で重要である。山田らは人間の痛覚に基づき, ロボットの心理的安全性を定めた [18]~[20]。Shibataらはロボットのコンプライアンスの変化による人間の恐怖感について解析した [21]。辻らは人間の性能を理解した上で人間ロボット協調系を設計することを目指し, 人間のインピーダンスを計測した [22]~[24]。このインピーダンスをロボットに実現することで, 人間は違和感なくロボットと協調作業をすることができる。

また, どのようなロボットが安全なのか, その基準を定めることが必要であり, 近年これに関連する研究も盛んに行われている。菅野らは衝突時における安全性を, ロボットの素材, 動作制御, 衝突状況によって評価し [25], 生田らは福祉用ロボットののための安全基準を定量的に定めた [26]。

3.2 人間らしく動く機構

ロボットが人間社会に進出するために, 人間に違和感を与えないことは重要であり視覚的に人間らしい動きをとる必要がある。稲葉らは歩行速度, 歩行範囲の向上を目指し, 4 脚ロボットに脊髄構造を導入した [27]。これにより, 動物らしい動きの実現が期待される。また, ヒューマノイドの胴体に図 2 のような MIA に似た機構を用いて, 脊髄の役割を果たさせるプログラマブルパッシブコンプライアンス機構を搭載し, 柔らかな人間らしい動きのブラキエーションを実現した [28]。筆者らは人間の肩の動きに注目し回転中心を一定とせず人間らしい動きを実現する 3 自由度機構, サイバネティック・ショルダを開発した [29]。次章では, このサイバネティック・ショルダについて紹介する。

4. サイバネティック・ショルダ

4.1 サイバネティック・ショルダの機構

サイバネティック・ショルダは Double Universal Joint 型 [30] の閉リンク構造を持つ 3 自由度機構で, 人間の肩の複雑な動きを少ない自由度で実現することを目的とした機構である。サイバネティック・ショルダの概略図を図 3 に示す。点 b, β, δ はジンバル機構, 点 d はボールジョイントであり, a は回転と並進, e は並進のジョイントである。点 A を平面内で上下左右に動かすことで中心軸 G が β を固定軸として 2 方向に倒れる。円盤 D はその中心が軸 G と共に移動しその法線ベクトルは 3 本のリンク E によって決定される。 z 軸方向の回転はモータによって C を回転させ, タイミングベルトによって円盤 B に伝え, さらに中心軸 G によって円盤 D に伝える。

サイバネティック・ショルダの回転中心は一定ではない。肩を y 軸方向に動かしたときの回転中心の変化を図 4 に示す。この図は x 軸方向から射影した二次元図であり, 回転中心を「●」で表す。これは人間の肩の自然な動き(図 4 右図)における回転中心の移動と等しく, 腕を前後に動かすときに肩先が前後に動く。サイバネティック・ショルダの回転中心の移動が人間と類似の動きを持ち, 人間らしい動きが実現できることが分かる。模擬的な腕と首を取り付けて動かしたときの写真を図 5 に示す。人間らしい肩の動きが実現できている様子が読みとれる。

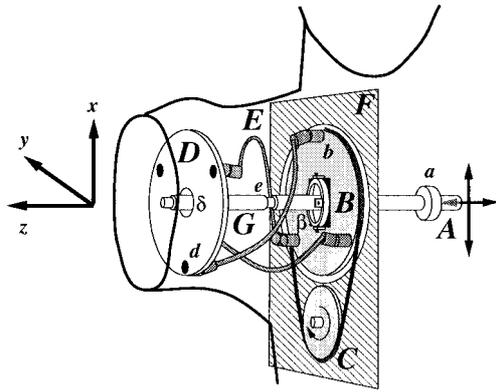


図3 サイバネティック・ショルダのモデル

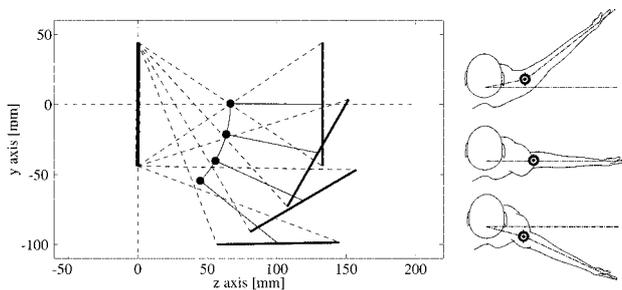


図4 回転中心の移動

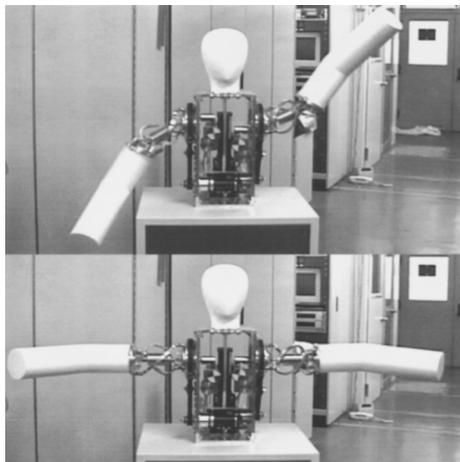


図5 サイバネティック・ショルダの動き

4.2 サイバネティック・ショルダのコンプライアンス
サイバネティック・ショルダは閉リンク構造により3自由度のパッシブコンプライアンスの導入が容易である。リンク E は長さの拘束を与え、これにより肩先の位置と姿勢が決定される。そこで、リンク E の長さ方向の剛性によって機構の柔らかさを特徴づけることができる。このリンクはユニバーサルジョイントとボールジョイントによって円盤 B, D に結合されているため、ねじれと長さ方向に垂直な方向への変形は拘束に影響を与えない。サイバネ

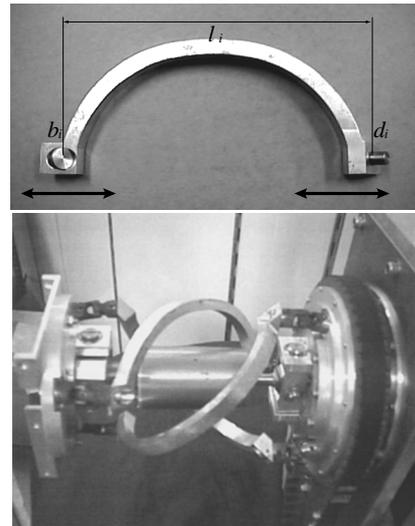


図6 サイバネティック・ショルダのコンプライアンス機構

ティック・ショルダのプロトタイプではリンク E は中心の軸 G との接触を避けるために円弧状の形状をしている。そのため、図 6 上図のように点 b_i と点 d_i での接点を結ぶ直線方向にはばね剛性を有し(図の矢印方向)、拘束を生み出す長さ l_i が変化することでばね特性を出すことができる。下図はこのアルミニウム合金リンク(断面積が $7[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$)を用いたサイバネティック・ショルダである。これを他の材料に変えることで様々な弾性・粘性が実現できる。

この機構へのコンプライアンスの導入に対する利点を以下に挙げる。

- (1) サイバネティック・ショルダは閉リンク構造を持つため、コンパクトな寸法でコンプライアンス機構が導入できる。
- (2) リンクのひずみを正確に計測することは難しい。リンクのひずみ特性は非線形性を有するが、一般にはこれを一樣なひずみで近似する。しかし、閉リンク構造を持つサイバネティック・ショルダでは図 3 における点 δ のジンバル機構の回転、スライド e の移動距離を計測することで、リンク E のひずみを計測することなく正確な手先のたわみ・位置を計測することができる。これも上述の利点と同様に閉リンク機構を導入したことによるものである。

5. おわりに

本解説では、ロボットが人間に対して親和性を持つことを目指して、人間らしいコンプライアンスを実現する・人間に恐怖感を与えないという観点から、これまでに提案されたコンプライアンス機構を紹介し、さらにロボットの安全性・人間らしい動きを持つというアプローチから人間と

のインターフェースを考慮した研究を紹介した。また、最後に筆者らが開発したサイバネティック・ショルダについて述べた。この機構は人間らしい動きを実現しているだけでなく、閉リンク構造の利点を生かすことでパッシブコンプライアンスも容易に実現できる機構である。

ロボットが人間と環境を共にする近い将来に向けて、人間らしい動的な衝撃を吸収可能なコンプライアンスを実現することはロボットの安全性の面から重要なことである。しかし、ロボットが「親しめる」ロボットになるためにはこれだけでは不十分であり、ロボットの安全性の研究・人間らしく動く機構を開発することも重要な課題の一つとなるであろう。

参考文献

- [1] R.P.C. Paul and B. Shimano: "Compliance and Control," Proc. of the 1976 Joint Automatic Control Conference, pp.694-699, 1976.
- [2] H. Hanafusa and H. Asada: "Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers," Proc. of the 7th International Symposium on Industrial Robots, pp.361-368, 1977.
- [3] N. Hogan: "Mechanical Impedance Control in Assistive Devices and Manipulators," Proc. of the 1980 Joint Automatic Control Conference, pp.TA10-B, 1980.
- [4] J.K. Salisbury: "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, 1980.
- [5] N. Hogan: Impedance Control: "An Approach to Manipulation: Part 1~3," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [6] K.F.L-Kovitz, J.E. Colgate and S.D.R. Carnes: "Design of Components for Programmable Passive Imprdance," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1476-1481, 1991.
- [7] 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.
- [8] 石川, 小金澤: "拮抗筋型関節駆動の新機構", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.611-612, 1996.
- [9] 山崎, 小金澤: "剛性可変機能を有する拮抗筋型関節駆動システムとその制御", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.445-446, 1998.
- [10] 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.
- [11] 吉留, 兵頭, 小林: "腱駆動ロボット機構の腱破断に対する安全性と制御", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.1, pp.125-132, 1999.
- [12] 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.
- [13] 森田, 植田, 萱場, 菅野: "7自由度 MIA アームの関節制御特性の評価", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.619-620, 1996.
- [14] 森田, 富田, 植田, 菅野: "関節の機械インピーダンスを調節可能な力制御ロボットアームの開発", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.7, pp.1001-1006, 1998.
- [15] 山下, 武内, 奥野, 相良: "拮抗駆動関節による剛性とトルクの制御: 空気圧アクチュエータによる実験的検討", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.666-673, 1995.
- [16] 早川, 川村, 後藤, 永井: "力センシング機能を有する空気圧ベローズによるロボットマニピュレータ用回転駆動機構の開発", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.271-278, 1996.
- [17] 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.
- [18] 山田, 杉本: "人間の痛覚耐性値の評価", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.639-642, 1995.
- [19] 山田, 吹田, 今井, 池田, 杉本: "痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機構を有するロボットシステム", 日本機械学会論文集(C編), vol.63, no.614, pp.232-237, 1997.
- [20] 山田, 平澤, 酒井, 大東, 鴻巣, 梅谷, 津坂: "安全と意図に基づく人間/ロボットの協調作業", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2BII1-2, 1998.
- [21] M.S. Ben-Lamine, S. Shibata, K. Tanaka and A. Shimizu: "Mechanical Impedance Characteristics of Robot for Coexistence with Humans," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Mechatronics, pp.907-912, 1997.
- [22] 小山, 辻, 加藤, 金子: "人間-ロボット系の位置/力制御特性", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集, vol.A, pp.259-262, 1997.
- [23] 辻, 小山, 金子: "ヒューマン・ロボットシステムにおける人間の適応能力", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.311-312, 1997.
- [24] 川口, 辻, 金子: "ニューラルネットワークを利用した人間-ロボット系の動特性解析", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 1BII1-1, 1998.
- [25] 森田, 鈴木, 川崎, 菅野: "人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.102-109, 1998.
- [26] 生田, 野方: "福祉ロボットの安全性に関する統一の評価法の提案-危険性の定量化による安全設計対策の評価-", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.3, pp.363-370, 1999.
- [27] 松木, 水内, 加賀美, 稲葉, 井上: "脊髄構造を持つ四脚ロボットとそのシミュレーション環境", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.85-86, 1998.
- [28] 水内, 松木, 加賀美, 稲葉, 井上: "可変な柔軟構造の体幹部をもつ人間型ロボットへの取り組み", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.825-826, 1998.
- [29] 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(投稿中)
- [30] M.E. Rosheim: "Robot Evolution, The Development of Anthropotics," JOHN & SONS, INC., 1994.



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1969年3月21日生。1992年3月京都大学工学部精密工学科卒業。1994年3月同大学大学院修士課程(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)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)