ロボットにおける力制御の現状と将来

吉 川 恒 夫*

1. はじめに

我々が手を使って日常何気なく行っている動作のうち、手先の力を感知し制御する事なく遂行できるものが、一体どのくらいあるだろうか。机の引出しを開ける、ペンを取り出す、ペンで紙に字を書く……、いずれも力の助けなしには実行できるかどうかおぼつかない。このことから考えても、ロボットに種々の作業をさせる場合に、その手先効果器が対象物に加える力を検知し制御することができれば、より広範で高度な作業を遂行できるようになると考えられる。

このような見通しのもとにこれまでロボットの力制御の研究が種々進められてきた。現在のところ工場などで働いているロボットでは、手先位置を関節角度などの情報から検知し、それを制御することによって与えられた作業をこなしている場合がほとんどであり、力制御の実用化には至っていないが、その一歩手前までこぎつけている。

本稿ではロボットアームの力制御研究開発の現状を概観し、今後の方向について考えてみたい。

2. 力制御の研究状況

2.1 研究の推移

ロボットアームの力制御研究の歴史は、ロボットの本格的な研究が始まった 1960 年代までさかのぼる¹⁾。このことはロボットがなんらかの対象物をつかみ、操作する機械として認識されていたこと、そして把握や操作において力が重要であることを考えれば当然といえる。

1970 年代には、(i) アームの複数個の関節のうちのいくつかを力制御専用としてその駆動力を制御し、他の関節は位置制御する方法^{2),3)}、(ii) 力信号にフィードバックゲインを乗じて位置や速度を制御するいわゆる一般化ばね(剛性制御法)や一般化減衰器を構成する方法^{4),5)}、

などの直感的な方法が種々提案された。

日本でロボット普及元年といわれる 1980 年頃になって前者の方法がハイブリッド制御法⁶⁾、後者の方法がインピーダンス制御法⁷⁾、として体系化された。また同じ時期に、摩擦が非常に少なく、力制御に適しているとされるダイレクト・ドライブ・ロボット⁸⁾が開発された。これらがその後の研究を刺激し、上記制御法の動力学的な精緻化^{9)~12)}、ロバスト化、複数アームへの拡張などが検討され、近年力制御の研究が益々盛んとなってきた。

たとえば最近 2 年間の IEEE International Conference on Robotics and Automation における力制御関連の発表論文は表 1 に示すように全論文の 10% 近くあり、ロボット分野に限れば 10% を越す。また去年の本学会講演会でのこの割合は 12% 強となっている。前者の内容のおおまかな分類を表 2 に示す。以前に比べてハンドや複数アームの協調制御が相当多くなり、フレキシブルアームの力制御が新しく出てきた点が注目される。本学会講演会での発表の内容もこれに似ているが、ネジ締め、研磨、挿入などの具体的作業への応用についての報告が 16% と多く、日本では企業に於ける応用研究が活発であることをうかがわせる。

以下ではこれらの研究テーマのいくつかについて現状を私見をまじえながら述べてみたい。

2.2 インピーダンス制御とハイブリッド制御

インピーダンス制御は機械技術者の発想といえる。電気分野におけるインピーダンスがレジスタンス(抵抗)の一般化された概念であることに対応して、機械に外力が加えられた場合にその機械が示す抵抗が機械インピーダンスであり、ばね剛性、慣性抵抗、摩擦抵抗などをまとめた概念である。適当なフィードバック制御則によって、閉ループ系の機械インピーダンスが遂行すべき作業に適した値となるようにするのがインピーダンス制御である。

他方、ハイブリッド制御は制御技術者の発想といえる。何か制御したい対象があれば、制御変数を定め、それが目標の値になるように制御系を組めばよいというわけである。その際最も一般的なのは制御変数の現在値を測定

原稿受付 1991 年 9 月 24 日
The State of the Art and Future of Robot Force Control

* 京都大学工学部

し、それと目標値との誤差をフィードバックするフィードバック制御系である。いまの場合には制御変数が幾つかの方向の位置変数とそれら以外の方向の力変数からなっているので、位置フィードバックループと力フィードバックループが存在することになる。その結果、各関節には両ループから位置および力を制御するための二つの駆動力指令が届くが、単にこれらの和を駆動力として実現すれば良いことが示されている⁹⁾。

なおインピーダンス制御とハイブリッド制御は必ずしも全く相矛盾するものというわけではない。インピーダンス制御はおもに制御系の過渡応答特性に焦点をあてているのに対し、ハイブリッド制御はどちらかという各制御方向の定常特性を規定する考え方である。したがって、ハイブリッド制御的に位置制御方向と力制御方向を設定し、インピーダンス制御的に各方向での望ましい過渡応答特性を定めることも可能である。

力制御問題は、基本的には拘束条件付きの力学系を対象とするサーボ機構設計問題である。研究の初期には、従来あまり扱わなかった力を一つの制御変数として扱わなければならないことに対する戸惑いがあったようである。しかし振り返ってみると、特性が既知の剛体アームと環境に対する問題の定式化とその解はそれほど難しいものではなく、現在では力制御の基礎的な方法論は一応の体系が出来ている。とはいっても、議論の余地はまだ残っているようであり、たとえば最近になって並進速度と回転速度からなる6次元空間でのベクトルの直交性の定義が妥当かどうかについての議論が出たりしている¹³⁾。

2.3 安定性

ロボットの位置制御と力制御の研究がほとんど同時期に始まったにもかかわらず、その実用化において力制御が非常に遅れている主な理由の一つは、安定性に不安があることであろう。安定な力制御の実現が困難な原因としては、(i) ロボットが接触する環境ないし対象物の特性（不明なことが多い）が制御系全体の特性を複雑にすること、(ii) 力覚センサを用いると、その弾性が制御系を複雑にするとともにセンサとアクチュエータが非共配置（non-colocation）となること、(iii) 位置制御系よりも大きなバンド幅を必要とするにもかかわらず、リンクや関節軸の弾性、駆動系のバックラッシュや摩擦、デジタル制御系のサンプリング時間遅れなどのため、必要なバンド幅を確保しにくいこと¹⁴⁾、(iv) 非接触、接触両モードとその間の衝突現象の存在、などが挙げられる。

現状では、インピーダンス制御やハイブリッド制御はこれらの要因を陽には考慮しておらず、実現したい機械インピーダンスや位置および力フィードバックループの

仕様を与える際に多少配慮できるという程度である。

リンク、関節軸、センサなどの弾性を考慮した安定性の解析¹⁵⁾、衝突に伴う衝撃の軽減¹⁶⁾、ロバスト制御¹⁷⁾、接触および非接触両モードにおいて安定な制御方策¹⁸⁾、など様々の観点からの研究が現在行われている。

2.4 協調制御

ハンド、複数アームシステムは、いずれも複数のリンク連鎖（以下指とよぶ）の協調が必要な機構である。これらは一つの対象物を保持し繰るとき、(i) いくつかの閉ループ機構を持ち内力（対象物の運動に関与しない指先力成分）の選択の自由度が大きい、(ii) 各指が対称物に加える力に制約（小さすぎると確実な保持が難しく、大きすぎると対象物に損傷を与え得る）が存在する、(iii) 指と対象物間の接触位置や接触形態に（一方向性拘束、双方向性拘束、点接触、面接触、一つの指との多点接触、滑り、転がり、持ち替えなど）自由度が大きい、という特徴をもつ。

これらのシステムへのインピーダンス制御やハイブリッド制御の適用についての理論的研究はある程度進んでいる¹⁹⁾。しかし、作業の解析や計画に関する研究が進んでいないために、これらの力制御系に対する仕様や目標軌道をいかに与えればよいかという点がまだ明確になっていない。

内力の選択の問題は、(i) 指と対象物の接触を保ち、かつ滑らないようにするなどの制約条件と、(ii) 指先力のノルムを小さくせよとか、各指先力の制約限界からの

表 1 力制御関連発表論文件数

会 議 名	力関連(編)	全体(編)	力関連割合(%)
IEEE R&A 1990	30	336	8.9
1991	40	420	9.5
本 学 会 1990	49	387	12.7

表 2 IEEE R & A '90, '91 国際会議発表論文内容

内 容		割合 (%)
単 腕	インピーダンス制御、	
	コンプライアンス制御	11
	ハイブリッド制御	10
	安定性、ロバスト制御	10
	学習、適応、環境推定	7
	衝突制御	7
	フレキシブルアームの力制御	4
	押し動作	3
	摩擦	3
複 腕	ハンド、複数アーム	25
	(内力配分問題)	(8)
	(ハイブリッド制御、	
	インピーダンス制御)	(6)
	(安定性)	(3)
	(学習、適応)	(3)
	(その他)	(5)
応 用 他	歩行ロボット	4
	ハードウェアの開発	7
	応用	6
	その他	3

距離を大きくせよ, などの評価規範, が与えられた力分配問題として定式化され, 種々の数理計画法による解法が提案されている^{20), 21)}. また合力と内力を繰り力と握力という身近な概念で捉えなおし, これに基づいて内力を選択しようという試みもある²²⁾.

接触位置や接触形態については, 摩擦なしの指先を固定したとき対象物を完全に動けなくできることを意味する form closure, および静止摩擦の制限内で指先力によって対象物に任意の合力を加えることができることを意味する force closure の両概念に基づく研究がなされている^{23), 24)}.

なお複数脚歩行ロボットもハンドや複数アームと類似した構造を有しているため, 力分配問題などが研究されている²⁵⁾.

2.5 学習, 適応

学習制御(繰返し制御)と適応制御の理論はロボットの位置制御問題を対象とすることで独自の発展をみた。他方でニューロネットワークの理論をロボットの軌道制御に利用した研究がある。これらの理論を力制御の場合にも適用する試みが行われている^{26)~28)}。また, 未知な対象物面をオンラインで推定しながらハイブリッド制御を行うという提案もある²⁹⁾。

2.6 応 用

研磨, 組立て, ばり取り, などの実用化研究が特に日本で進んでいる^{30)~32)}。その多くは従来の位置サーボ系に, 力誤差フィードバックに基づく修正位置目標値を与える方式をとっている。アーム自身や工具の弾性を利用することにより, これまでに開発された位置ないし速度サーボ機構をそのまま用いる巧妙な方法である。ただその力と位置の変換ゲインの選択には難しさが伴うようである。

2.7 そ の 他

(i) フレキシブルアームによる力制御: 宇宙用アームなどフレキシブルアームの応用分野拡大を目的とするものと, リンクの弾性が力制御の安定性に及ぼす影響の検討を目的とするものがある^{33), 34)}。

(ii) マンマシンインターフェース: マスタスレーブシステム³⁵⁾や人工現実感関連でオペレータに対する力感覚付与技術の研究が行われている³⁶⁾。

(iii) ハードウェアの開発: 力制御を直接目的としたものとしては, 手首力センサ, ソフトフィンガー, 受動インピーダンス要素の開発など, 広範囲にわたる個別的な研究が行われている。

3. 今 後 の 方 向

ロボットの力制御技術は, 工場内での簡単な作業なら, 現在でもなんとか適用できる程度まで来ていると考えられる。しかしその本格的実用化のためには, 我々が日常何気なく行っている作業の理解と理論的解析, 視覚・触覚・聴覚の併用, 知能化, 自律化, 小型・軽量・高速・強力なハードウェアの開発など, 力制御に限らずロボット工学全体が取り組まなければならない諸課題における進歩が必要である。ただその中でも力制御に関連の深い課題を挙げるとすれば, 次のようなものがある。

(i) 基本操作の実現: 把持や操りにおいて, 剛体の固定点把持だけでなく, 滑り, 転がり³⁷⁾, 押し³⁸⁾, 衝突, 弾性・塑性をもつ対象物の圧縮・伸張, などの基本操作の理解と安定な実現法の開発が望まれる。

(ii) 作業の理解と計画: 通常簡単そうに見える作業でも, 多数の基本操作の系列によって遂行される。しかも力覚のほか視覚・触覚・聴覚などの併用によって基本操作の確認や切り替えが行われる。このような観点からの作業の理解³⁹⁾と, それに基づく作業計画立案やロボット言語によるプログラミング手法の確立が必要である。

(iii) 知能化: 力制御を要する作業は作業者自身もそのノウハウを表現できない場合が多い。直接教示によるロボットの学習, スキルの獲得⁴⁰⁾は, 一部研究が始まっている。ロボットの知能化の研究は, 従来の人工知能論とは異なるパラダイムの構築を促す可能性をはらんでいる。

(iv) 力検出・力指令方式: 2.6 で述べたように現在実用化が進められている力制御は, いわば力検出・位置指令方式である。これはこれで有力な方式であり, 今後とも応用範囲が広がるであろうが, より高性能な力制御のためには, 関節駆動力を直接制御する力検出・力指令方式の実現が一つの鍵になるのではないかと考える。

☆ ☆

本稿では, ロボットの力制御に関する研究状況の全体像を大ざっぱにつかんでいただけるようにと考えて筆を進めたが, その目的がどの程度果たせたか心許ない。読者諸氏のご意見, ご叱正をお願いするしだいである。なお各分野の詳細については本特集号の解説や文献^{1), 24), 28), 41)~46)}などを参照されたい。

道のりは長いかもしれないが, ロボットが真にロボットらしくなるためには, そして工場内のみでなく, 山林, 原野, 海洋, さらに人間の居住空間のいたるところで人間と共存して活動できるためには, 力を自由に使えるようになることが必要だと考えている。

参考文献

- 1) D. E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," Proc. 1985 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 262-268, 1985.
- 2) H. Inoue, "Computer Controlled Bilateral Manipulator," Bull. of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 14-69, pp. 199-207, 1971.
- 3) R. P. Paul, "Modelling, Trajectory Calculation, and Servoing of a Computer Controlled Arm," Stanford University, Artificial Intelligence Laboratory, AIM 177, November, 1972.
- 4) R. C. Groome, "Force Feedback Steering of a Telescopier System," M. S. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, 1972.
- 5) D. E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motion," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp. 91-97, 1977.
- 6) M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- 7) N. Hogan, "Control of Mechanical Impedance of Prosthetic Joints," Proc. 1980 Joint Automatic Control Conference, San Francisco, August, 1980.
- 8) 浅田, "DD ロボットの歴史と現状," 日本ロボット学会誌, Vol. 5-1, pp. 44-47, 1987.
- 9) 吉川, "ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出—," 日本ロボット学会誌, Vol. 3-6, pp. 531-537, 1985.
- 10) T. Yoshikawa, "Foundations of Robotics," MIT Press, Cambridge, Mass. 1990.
- 11) N. H. McClamroch and D. Wang, "Feedback Stabilization and Tracking of Constrained Robots," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 33-5, pp. 419-426, 1988.
- 12) R. K. Kankaanranta and H. N. Koivo, "Dynamics and Simulation of Compliant Motion of a Manipulator," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 4-2, pp. 163-173, 1988.
- 13) J. Duffy, "The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory That is Based on "Orthogonal Complements" of Twist and Wrench Spaces," J. of Robotic Systems, Vol. 7-2, pp. 139-144, 1990.
- 14) S. D. Eppinger and W. P. Seering, "Three Dynamic Problems in Robot Force Control," Proc. 1989 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 392-397, 1989.
- 15) S. D. Eppinger and W. P. Seering, "On Dynamic Models of Robot Force Control," Proc. 1986 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 29-34, 1986.
- 16) R. Volpe and P. Khosla, "Experimental Verification of a Strategy for Impact Control," Proc. 1991 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 1854-1860, 1991.
- 17) Y. H. Chen and S. Pandey, "Uncertainty Bound-Based Hybrid Control for Robot Manipulators," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6-3, pp. 303-311, 1990.
- 18) J. K. Mills, "Manipulator Transition To and From Contact Tasks: A Discontinuous Control Approach," Proc. 1990 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 13-18, 1990.
- 19) 吉川, 鄭, "拘束運動下にある対象物の複数台ロボットによる協調ハイブリッド制御," システム制御情報学会論文誌, Vol. 3-10, pp. 326-334, 1990.
- 20) J. Kerr and B. Roth, "Analysis of Multifingered Hands," Int. J. Robotics Research, Vol. 4-4, pp. 3-17, 1985.
- 21) F. T. Cheng and D. E. Orin, "Efficient Algorithm for Optimal Force Distribution — The Compact-Dual LP Method" IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6-2, pp. 178-187, 1990.
- 22) T. Yoshikawa and K. Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 7-1, pp. 67-77, 1991.
- 23) V. Nguyen, "Constructing Force-Closure Grasps in 3D," Proc. 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 240-245, 1987.
- 24) 中村, "指の制御," 計測と制御, Vol. 30-5, pp. 395-399, 1991.
- 25) V. Kumar and K. J. Waldron, "Force Distribution in Walking Vehicles," Trans. ASME J. Mechanical Design, Vol. 112, pp. 90-99, 1990.
- 26) 川村ほか, "学習方式による位置と力のハイブリッド制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 5-2, pp. 109-120, 1987.
- 27) G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Computational Algorithms for Adaptive Compliant Motion," Proc. 1989 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 566-571, 1989.
- 28) 藪田, 山田, "ニューラルネットによるロボットの力制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 9-2, pp. 224-231, 1991.
- 29) T. Yoshikawa and A. Sudou, "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators — On-Line Estimation of Unknown Constraint," Proc. 1990 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 1231-1236, 1990.
- 30) 久良, 田中, "インダストリアルロボットにおけるセンサ利用の現状," 日本ロボット学会誌, Vol. 9-3, pp. 82-88, 1991.
- 31) 柏木, "バリ取り・グラインダかけ," 日本ロボット学会誌, Vol. 9-3, pp. 94-98, 1991.
- 32) 石川, 木田, "ソフトモーションロボットによるコネクタ挿入作業の自動化," 日本ロボット学会誌, Vol. 9-3, pp. 103-108, 1991.
- 33) F. Matsuno, Y. Sakawa, and T. Asano, "Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of a Flexible Manipulator," Proc. 1991 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 2838-2843, 1991.
- 34) B. C. Chiu and M. Shahinpoor, "Dynamic Stability Analysis of a Two-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 661-666, 1990.
- 35) 横小路, 吉川, "理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御," 計測自動制御学会論文集, Vol. 27-1, pp. 56-63, 1991.
- 36) 岩田洋夫, "フォースディスプレイ," 計測と制御, Vol. 30-6, pp. 472-477, 1991.
- 37) Z. Li and J. Canny, "Motion of Two Rigid Bodies with Rolling Constraint," IEEE Trans. on Robotics

- and Automation, Vol. 6-1, pp. 62-72, 1990.
- 38) M. T. Mason and J. K. Salisbury, "Robot Hands and the Mechanisms of Manipulation," pp. 189-251, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
 - 39) 平井 ほか, "組立作業における接触状態の位置・力信号の解釈による識別とモデルをもとにした識別手続きの自動生成", 計測自動制御学会論文集, Vol. 26-2, pp. 225-232, 1990.
 - 40) H. Asada and Y. Asari, "The Direct Teaching of Tool Manipulation Skills Via the Impedance Identification of Human Motions," Proc. 1988 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 1269-1274, 1988.
 - 41) R. P. Paul, "Problems and Research Issues Associated with the Hybrid Control of Force and Displacement", Proc. 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 1966-1971, 1987.
 - 42) 吉川, "マニピュレータの力制御," 計測と制御, Vol. 30-5, pp. 383-388, 1991.
 - 43) 古田, 小菅, "マニピュレータの力制御アルゴリズムとその実現", 日本ロボット学会誌, Vol. 7-3, pp. 243-248, 1989.
 - 44) 内山, "複腕協調制御," 計測と制御, Vol. 30-5, pp. 389-394, 1991.
 - 45) 中村, "把持とあやつり," 計測と制御, Vol. 29-3, pp. 206-212, 1990.
 - 46) 小俣, "多指ハンドによる作業の計画", 日本ロボット学会誌, Vol. 9-1, pp. 85-91, 1991.

吉川 恒夫

(Tsuneo YOSHIKAWA)

昭和16年12月19日生まれ。京都大学工学部精密工学科卒業。44年同大学大学院博士課程修了。同年、同大学工学部助手、45年同大学助教授、61年同大学教授（オートメーション研究施設、平成3年より機械工学教室）となり現在に至る。産業用ロボットの制御、分散制御系、線形システム制御情報学会、計測自動制御学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)