ロバストモーションコントロールにおける 力制御と環境認識*

村上俊之**

Force Control and Environmental Recognition in Robust Motion Control / Toshiyuki MURAKAMI

Key words: robust motion control, force control, environment, force estimation

1. はじめに

1967年、ロボットが工場での溶接や塗装用の産業ロボットとして導入されて以来、国内におけるロボット開発は急速に進められ、近年では産業用としてだけでなく、一般家庭でのアミューズメント機器あるいは介護機器としての利用が強く期待されている。産業界において求められていたロボットの機能は、位置制御をベースとした高速、高精度、高効率、高信頼性であった。これらの要求は、センサ、コンピュータの急速な発展とロバストモーションコントロール、メカトロニクス技術の発展と相まって問題なく達成され、多くの産業分野におけるロボット導入をもたらした¹⁾。しかしながら、大量生産から変種変量生産への需要変化、また高齢化社会に向けた福祉機器の開発要求から、環境適応型のロボットや人間の五感に作用するアミューズメントロボット等の実現に多くの関心が寄せられるようになってきた。このような要求に応えるためには、従来型の位置制御をベースとしたロバストなモーションコントロールのみではなく、環境変動に適応可能な力情報に基づいたロボット制御の機能拡張が必要となる。力情報に基づいた力フィードバック制御に関してはすでに多くの研究報告がなされているが²⁾、力情報に含まれる環境情報を考慮した制御アルゴリズムや力を利用した環境適応型制御に関する研究報告例は少ない³⁾。一方、力情報は人間やロボットのような機械システムを含むシステム間の相互作用を決定するものであり、ロボット間の協調はいうまでもなく、人間とロボット間の協調動作を円滑なものとするのに力（相互作用力）は有用な情報となり得る。ただし、力制

御は位置制御に基づいたロバストコントロールからみると、そのロバスト性（頑健性）を低下させることになり、制御の目的に応じた適切な力制御系の構成を考える必要がある。そこで本稿では、力情報に基づいたロボットの機能拡張（多機能化）、さらにロボットと人間の協調を目指した協調制御手法について紹介する。

従来、力情報を利用した力フィードバック制御では力センサを利用したものがほとんどである。しかしながら、力センサの利用はその取り付け位置やコストの面から必ずしも便利ではない。しかも、力センサのない部位での力制御は実現し得ない。そこで、本稿では上記の力情報に基づいたロボットシステムの多機能化に加え、力センサを用いずに推定反力情報を利用した拡張機能についても紹介する。

2. 力情報を利用したシステム制御

先に述べたように、大量生産を目的とした産業ロボットの導入では、高速、高精度、高効率を目指したロボット制御が主体となり、特に位置制御をベースとした制御手法が考えられていた。これは、図1に示されるように、ロボットの内界センサを利用した制御となり外部環境の変化は外乱として抑圧し、できるだけ位置指令に忠実に従う制御となっていた。この場合、環境変動に対して適応的な動

図1 環境とシステム

- * 原稿受付 平成15年8月14日
- ** 慶應義塾大学理工学部（横浜市港北区日吉3-14-1）
1993年3月慶應義塾大学大学院後期博士課程修了、博士（工学）。現在、慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科助教授。センサ応用システム、モーションコントロールなどの研究に従事。

図2 反力の推定アルゴリズム

作を実現することはきわめて困難である。従来、環境の認識は非接触型の視覚センサや接触型の力センサの利用が盛んに行われていた。特に、人の環境認識の80%は視覚情報より得ているといわれており、視覚センサを利用した環境認識は有効なものと考えられる。しかしながら、認識速度が十分に得られず、センサ情報の信頼性も低いことから環境適応型の運動制御の実現には必ずしも適さない⁴⁾。一方、力情報は接触を伴わなければ情報が得られないという制約があり、得られる情報量も多くはないが、センサ情報の信頼性は高く速い応答が要求される環境適応型の運動制御には非常に有用である。そこで、本稿では力情報をベースとした環境適応型の制御手法に関して幾つかの事例を紹介する。

3. 力の推定機構

前述したように、力情報は環境変動を認識し、その変動に適応した運動制御を実現するのに非常に有効な情報となる。従来の力検出では力センサが利用されている例が多く、センサの設置位置やコストの面で力制御の実現に多くの制約があった。しかしながら、電動機を利用した機械システムでは力センサを利用せずとも、電動機への電流指令と位置（速度）情報から力センサと同等の力情報を得ることができる。図2に直流サーボモータを仮定した力推定アルゴリズムのブロック線図を示す⁵⁾。同図では、モータへの指令電流および速度応答から環境外乱を含めたシステム外乱を推定し、その成分からモータ慣性変動トルク $\Delta J \ddot{\theta}$ 、トルク係数変動トルク $\Delta K_t I_a^{\text{ref}}$ 、干渉トルク T_{int} 、摩擦トルクを差し引くことによって反力トルク T_{react} のみを抽出す

図3 推定反力に基づいた力制御（実験結果）

る計算過程を示している。また、推定反力を用いた多自由度マニピュレータによる力フィードバック制御の実験結果を図3に示す。実験では3自由度マニピュレータを用いて壁への押し作業（力制御）を行っている。ここで、 F^{cmd} 、 F^{res} および $\hat{F}^{res}$ は力指令、センサの力応答、反力推定アルゴリズムによる反力推定値をおのおの表している。同結果より推定反力による力フィードバック制御でも、ノイズの影響で多少の変動（数N）が見られるものの力センサと同等の実験結果が得られており、反力推定アルゴリズムの妥当性がうかがえる。同反力推定アルゴリズムを用いることによって、力センサの設置が困難なシステムにおいても力制御が可能となり、力制御の適用範囲拡張が期待できる。

4. 力情報をベースとした環境適応型制御

前述した力推定アルゴリズムまたは力センサをベースとした環境適応型制御手法として、複数台移動ロボットの負荷分配制御、アクティブジョイスティックに基づいた電動車椅子の制御、人支援型移動マニピュレータの制御について以下に紹介する。

4.1 複数台移動ロボットの負荷分配制御

移動ロボットの協調制御において、駆動輪に作用する負荷情報は搬送物体の重量および走行路面の状態を知るうえで有用な情報となる⁶⁾。例えば、一つの搬送物体を複数台の移動ロボットで安定に運搬するには、各移動ロボットによる均等な負荷分配を実現する最適な把持位置の決定が必要となる。図4(a)は2台の移動ロボットによる搬送制御を示している。ここで、搬送物の重心は2台のロボット

図4 負荷均等分配の実験例

図5 負荷状態推定に基づいた複数台移動ロボットの協調搬送制御

間の中心に設定されることが運搬の安定性確保の面から望ましい。さらに、各移動ロボットの負荷としては路面から受ける環境変動も考慮する必要がある。そこで、図2のアルゴリズムに基づき変動する環境外乱に応じた駆動軸に作用する反力トルクを推定し、搬送物体の把持状態および走行路面の状態変化を知ることによって、安定に搬送作業を実現するための把持位置決定と負荷分配を考慮した搬送状態制御を実現している(図5)。図4(b)に推定負荷情報に基づいた把持位置決定による負荷均等分配の実験例を示す。同図より、推定反力情報に基づいた把持位置の変更に伴って各移動ロボットへの負荷均等分配が適切に行われていることがわかる。

4.2 アクティブジョイスティックによる電動車椅子の制御

高齢化社会に向けた工学的な対策として、福祉機器の高性能化が強く要求されている。こうした中で、多機能化された電動車椅子の実現は近未来の重要課題として着目されている。電動車椅子の制御では、電動車椅子の自律生成軌道制御と人のジョイスティック操作の融合によって操作者の操作負担軽減が期待できる。しかしながら、人の操作感覚に違和感を与えないようにするため、電動車椅子(移動ロボット)の自律軌道と人の操作意思をうまく融合するこ

図6 自律軌道制御と人操作の融合アルゴリズム

とが要求される。この融合においても力情報が重要な担い手となる。提案手法では図6に示されるように、人操作による力入力の積分値および自律軌道と人操作による進行方向の方向角差を入力とするファジー制御により、ジョイスティックの操作性を決定するコンプライアンス制御系のゲインが変化し、自律生成軌道と人の操作意志の融合化がはかられている⁷⁾。

4.3 人支援型移動マニピュレータの制御

高齢化社会に向けた福祉機器として、人の動作を支援するロボットを考えた場合、広範囲な移動機能をもつ移動マニピュレータは非常に有用なものとなる。移動マニピュレータによる人の支援動作では、人と移動マニピュレータの相互作用力(力情報)が安定かつ安全な協調動作を実現するうえで重要な指標となる。そこで、提案手法では移動マニピュレータへの操作力を力センサにより検出し、さらに検出された力を人と移動マニピュレータ間に設定された仮想インピーダンスへの入力とすることで、人と移動マニピュレータの安定した協調動作を実現している(図7)。また、マニピュレータの特異点回避および台車の適度な移動動作を実現するため、マニピュレータの操作性を考慮した等価質量行列の調整を行うことで人の操作入力に対して滑らかな動作応答を実現している⁸⁾。同制御では、移動マニピュレータは人の進行方向への操作入力に対し滑らかに追従しつつ、垂直方向に対しては人を支える動作が実現されており、移動マニピュレータは仮想的なつえの役割を担っていることになる。また、図8に示すように、移動マニピュレータへの動作指令を人の操作入力とは独立に与えることで、人の動作を誘導する制御ともなる。設定軌道を追従している移動マニピュレータに、人操作による外力を加えた場合のインピーダンス応答を図9に示す。同結果では、移動マニピュレータの任意の軌道制御時に人による外力が加えられた場合の位置応答を示している。これにより、人の誘導支援を行っているマニピュレータ動作に対して、力情報に基づいた任意の軌道修正が可能であること

図7 移動マニピュレータの人支援動作

がわかる。すなわち、マニピュレータと人の安定した干渉動作が実現できていることがわかる。

5. おわりに

本稿では、力情報に基づいたロボットの機能拡張制御について紹介した。ロボットに作用する反力情報は環境情報をも含んでおり、環境変動に対する適応動作を行うための重要な指標もしくは動作指令生成のフィードバック信号として活用できる。特に、ロボットと人との協調動作では、ロボットもしくは人の動作状態を双方に伝達するため、力情報は非常に有用であり福祉機器として関心が高まっているロボットの多機能化に必要な不可欠なものといえる。しかしながら、力情報のみによる環境適応型制御には限界があり、非接触型の視覚センサやPSDによる環境情報も融合することで、環境変動に対してよりロボスタな実用的運動制御手法の実現が今後の課題となろう。

参考文献

- 1) T. Murakami and K. Ohnishi: Advanced Motion Control in Mechatronics-A Tutorial, IEEE. Workshop on Intelligent Motion Control, **1**, (SL) (1990) 9.
- 2) O. Khatib: A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation, IEEE. J. of Robotics and Automation, **RA-3**, (1987) 43.
- 3) K. Ohnishi and T. Murakami: Applications of Advanced Control Techniques, IEEE. Workshop on Microcomputer Control of Electric Drives, (A1), (1989) 1.
- 4) D. Purwanto, T. Murakami and K. Ohnishi: Positionvelocity-

図8 仮想インピーダンスモデルに基づいた人支援型移動マニピュレータの制御

図9 移動マニピュレータのコンプライアンス制御

based trajectory control for manipulator and its application to visual tracking system, A Publication of Industry Applications Society, The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan, **121-D**, 8, (2001) 894.

- 5) T. Murakami, F. Yu and K. Ohnishi: Torque Sensorless Control in Multi-Degrees-of-Freedom Manipulator, IEEE. Trans. on Industrial Electronics, **40**, 2, (1993) 259.
- 6) K. Kumeno, T. Murakami and K. Ohnishi: An Estimation of Slope for Mobile Manipulator, IEEE. International Conference on Advanced Motion Control (AMC2000), (2000) 104.
- 7) A. Inoue, et al.: Trajectory Control of an Human Cooperative Wheelchair Type Mobile Robot Using an Active Joystick, The 2002 Japan Industry Applications Society Conference (JIASC 2002), (2002) 715.
- 8) E. Yamanaka, et al.: Motion Control of Mobile Manipulator for Human Interaction, The 28th Annual Conference of IEEE IES (IECONO 2), (2002) 2785~, 715~.