パラレルメカニズムを適用した ロボット機構と作業応用

新 井 健 生*

1. はじめに

生産部門における作業の高度化が図られる一方、宇宙、マイクロなど新たな分野での自動化に対応して、ロボットに求められる機能も多様化している。ロボットの作業機構であるマニピュレータに対する機能要求も、高速性、高精度、高剛性、高コンプライアンス、耐環境性等と様々であり、これらの諸要求に見合う機構や制御方式の研究開発が盛んに行われている。この様な観点から、パラレルマニピュレータは新しいロボットの機構として脚光をあびつつあり、基礎研究と並行して新たな作業応用分野の模索が行われている。

代表的なパラレルメカニズムとして、航空機のシミュレータやアミューズメント機器などに用いられている直動アクチュエータ式並列6リンク機構（一般にはスチュワートプラットフォームと呼ばれる）がある。この機構はもともと Gough らが 1947 年にタイヤテスト用に開発したことが記されており、歴史的には非常に古いものである¹⁾。この他にも、回転型アクチュエータを用いたものなどいくつかのパラレルメカニズムが提案されており、従来のロボット機構にはない数々の特徴が知られている。

本特集の他の解説でも述べられているが、ここでパラレルマニピュレータの特徴をもう一度整理しておく。従来の産業用ロボットのようにリンクが直列状に接続された多関節形マニピュレータ（シリアルマニピュレータ）と比較した特徴は次の通りである。（1）手先の発生力大きい、（2）アクチュエータをベース部にまとめることが可能なため可動部が軽量化でき、このため運動特性がよい、（3）多自由度の運動をコンパクトな機構で実現できる、（4）逆運動学が容易に解ける（但し、これは直動型のアクチュエータを用いた場合）、（5）機構全

体の剛性が高まり、その結果位置決め精度も高まる。以上は長所であるが、欠点としては、作業空間が小さいこと、順運動学の求解が極めて困難なこと、などがあげられる。また、パラレルマニピュレータとシリアルマニピュレータは運動学と静力学において双対性を有しており、これは電気回路における並列回路と直列回路の相似則と考えられる。このような特徴を十分考慮するならば、応用分野によって高性能なマニピュレータとして十分適用可能と考えられる。

本稿ではパラレルメカニズムを適用したロボットの機構とその作業応用についてサーベイを行うと共に、それらの中でこの機構の特徴がどのように活かされているかを考察する。

2. コンパクトリスト機構

マニピュレータのリスト機構は器用な方向決め、対象物と干渉がある場合の高コンプライアンス動作の実現、マニピュレータの大まかな動作を補償して精度の高い位置決めを行うなどの諸機能が要求される。また、リスト機構はマニピュレータの先端に設けられるため、負荷の負担を減らすためコンパクトに機構を構成しなければならない。パラレルメカニズムは多自由度の動作をコンパクトな機構で達成することが可能であり、リスト機構に適用された例がいくつかある。スチュワートプラットフォームを小型化し、産業用ロボットのリストとして商用

写真 1 SPACE-1 の外観

原稿受付 1992 年 8 月 13 日

Robot Mechanisms Based on Parallel Mechanisms and Their Applications

* 工業技術院機械技術研究所

化したものにはフランス AICO 社の SPACE-1 がある。空気圧アクチュエータを採用し、リニアポテンショメータと圧力センサにより高精度な位置決め制御や力制御が可能である²⁾。写真1は外観を示したものである。

宇宙ステーション上での作業は、大型クレーンやマニピュレータを用いて行われるが、アームが長いことと対象物の重量が重いことなどからたわみが生じ、位置決め精度に限界があることが指摘されている。アームの先端に精密動作を行うリスト機構を設けることにより、位置決め精度をあげることが期待できる。本特集号の事例紹介でも取り上げられているが、電総研の町田らは宇宙用マニピュレータのスマートエンドエフェクタを開発している³⁾。このエンドエフェクタでは、3自由度並進運動のみを実現するため、直動アクチュエータを備えた3本のリンクと、回転運動を制限する3本の拘束用リンクとで構成されている。CCD カメラを用いた相対位置姿勢検出センサ、6軸力センサを搭載することにより、エアベアリングを用いたテストベッド上で、運動する対象物の追従動作や捕獲動作を行うことに成功している。

スタンフォード大学の ARTISAN プロジェクトでは10自由度マニピュレータが計画されており、この中で手先の3自由度は精密動作を行うリスト機構として3自由度のパラレルメカニズムが用いられる予定である⁴⁾。力制御などのアプリケーションを考慮すると、対象物との接触による衝撃をアクティブに吸収できるように、高精度であると同時に高速動作も必要とされる。設計によると、このリンクは直動アクチュエータを含む5対偶節リンクを3本並列に接続した構成となっている。

3. 高出力マニピュレータ

パラレルメカニズム機構の代表と考えられている。いわゆるスチュワートプラットフォームは、先に示したとおり本来自動車のタイヤテスト装置として提案されたものであり、フライトシミュレータやアミューズメント機器にも多用されている。これらの機器の特徴は、大きな加速力、あるいは力やトルクが発生できる点である。元来、マニピュレータにおいても適用する作業に応じて大出力が発生することが求められ、このような場面でパラレルメカニズムを用いたマニピュレータが利用される可能性が高い。

機械技術研究所では大型プロジェクト「大深度地下空間開発」において、ドーム状空間構築に用いる掘削ロボットの作業用マニピュレータとしてパラレルマニピュレータを適用するための基礎研究を行っている⁵⁾。掘削作業では大きな発生力と同時に、ドーム内の隅々までくまなく器用に掘削することが必要とされており、このよう

写真2 掘削作業用パラレルマニピュレータ

な観点からパラレルマニピュレータを適用することが有利と考えられている。写真2は掘削作業実験を行うために開発されたプロトタイプマニピュレータの外観である。直動式リンクを6本用いており、アクチュエータ部は30wのDCブラシレスモータとボールねじにより直進運動を行うことが可能である。静力学特性を解析することにより、エンドエフェクタ部で発生する力やトルクができるだけ一樣になるようにリンクが配置されている⁶⁾。この結果、作業空間における最大速度と最大発生力は、上下左右方向で60 cm/sと50 kgf、前後方向で34 cm/sと150 kgfとなっており、大都市地下部の軟岩を掘削するための十分な作業力を有するものと考えられる。図1はエンドエフェクタの方向を一定としたときの、エンドエフェクタが動きうる動作空間を示したものである。一般に、パラレルマニピュレータの動作領域はシリアルマニピュレータと比較すると狭いことが指摘されており、このマニピュレータも一度に掘削できる地山の範囲はかなり限定されるものと考えられる。このため、計画されている掘削ロボットでは、脚機構とクローラを組み合わせたハイブリッド移動機構を搭載する予定であり⁷⁾、マニピュレータとの協調動作により掘削作業を広い範囲にわたってかつ安定に行うことが期待されている。一方、掘削作業は自律で行うと同時に、ある場面では

図1 エンドエフェクタの動作空間
(ロール角=ピッチ角=ヨー角=0°, 単位: mm)

図2 4自由度パラレルマニピュレータ「DELTA」⁹⁾

人間が介在したテレオペレーションも必要とされる。この様な目的のために、プロトタイプをスレイブマニピュレータとし、またこれとはほぼ相似で小型のマニピュレータをマスタマニピュレータとしたバイラテラルマスタスレイブシステムも開発中である。構造が若干異なるため、いわゆる異構造マスタスレイブ制御の概念を適用し、テレオペレーションの高度化を図っている⁸⁾。

4. 高速マニピュレータ

ローザンス工科大学ではチョコレート製品の箱詰め作業の高速化を目指して、軽量、高速マニピュレータの開発に取り組み、この結果図2に示すような4自由度のパラレルマニピュレータ「DELTA」が提案され、商品化された⁹⁾。この機構の特徴は、3組のリンク機構により手先の並進3自由度が実現できること（回転アクチュエータにより手先のロール運動も実現可能）、回転運動を利用することにより広い動作空間が得られること、アクチュエータを全てベース部に収めることが可能なため可動部の慣性が小さく、極めて高速な運動が実現できることなどである。1kwの電動モータをアクチュエータとして用いた試作機では、最大加速度30Gの高速動作を達成している。

図3 6自由度パラレルマニピュレータ「HEXA」¹⁰⁾

一方、DELTAをさらに発展させ、3自由度の回転運動を行うことも可能なマニピュレータ「HEXA」が開発されている¹⁰⁾。図3に示すように、この機構ではDELTAの1本のリンクを2本の独立なリンクに分離することにより、エンドエフェクタの並進運動と同時に回転運動も実現でき、かつ、これらの運動を非干渉化できるという特徴を有している。すなわち、各対のリンクを同方向に回転させた場合はエンドエフェクタの3自由度の並進運動を、反対方向に回転させた場合は3自由度の回転運動を得ることが可能である。DELTAと同様に動作空間が大きく、高速動作も可能である。

マッギル大学では生体系筋肉の拮抗運動に着目し、パラレルメカニズムによりコンパクトな多自由度運動を得る機構の設計を行っている¹¹⁾。特に、シリアル型マニピュレータの場合と同様に、特異点の回避と動作領域を広げるために、図4に示すような冗長性を有する3自由度回転機構を提案している。本機構に関しては従来のシリアル形マニピュレータの肩部やリスト機構への適用が考えられていると同時に、先端部に小型のCCDカメラを搭載することにより人間の眼球運動を有する視覚装置への応用も提案されている。

5. マイクロマニピュレータ

微小対象物をマニピュレーションするためには、マニピュレータの位置決め精度が高いと同時に多自由度の運動をコンパクトな機構で実現することが重要である。位置決め精度は機構全体の剛性、各アクチュエータの位置決め誤差がエンドエフェクタに及ぼす影響などに依存するが、パラレルメカニズムはこの様な観点から考察するとシリアル型よりも有利な機構と考えられる。パラレルメカニズムを用いたマイクロ機構やマニピュレータもいくつか提案されている。杉本らは、切り欠き機構のジョイントとしての性質を解析し、圧電素子をアクチュエータに用いた6自由度マイクロステージを開発している¹²⁾。動作レンジが極めて小さいことを考慮し、アクチ

図4 3自由度パラレル回転機構¹¹⁾

写真3 マイクロハンドモジュール

ェュータの動作と出力リンクの運動は定数ヤコビ行列で関連づけられることを解析的に示し、 $100\ \mu\text{rad}$ の回転運動に対する並進運動の誤差が $0.6\ \text{nm}$ 以下であることを示している。

機械技術研究所では大型プロジェクト「マイクロマシン」研究開発の一環として、細胞操作やマイクロマシン組立などのアプリケーションを想定した2本指マイクロハンドの開発を行っている¹³⁾。通常の物体の安定把握では3本以上のハンドが必要であるが、微小環境における慣性力の効果が極めて小さいことを考慮して、2本指による操作が提案されている。指を動かすハンドモジュールとして、写真3に示すような圧電素子をアクチュエータに用いたパラレルメカニズムを採用している。圧電素子はヒステリシスが大きいので、ストレインゲージをアクチュエータ表面に貼付して変位を直接測定し、比例積分制御により安定で精度の高いアクチュエータ制御に成功している。この結果、指先端で $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の安定な位置決め精度を得ている。この機構においても、動作レンジがマニピュレータの全体寸法に比して極めて小さいことから、アクチュエータの運動と指先端の運動を定数ヤコビ行列で関連づけ、運動の解析や動作領域の評価などを行っている。図5はこのような方法で指先端の動作領域を評価したものである。本ハンドは先に示したように微小対象物の器用な操作を行うことを想定しており、対象物の位置、方向決めのほかに、力制御、対象物の加工や変形などの作業も考えられており、このような操作を行うために必要な指の動作レンジを解析し、特異点状態に近いパラレルメカニズムを用いることにより、より動作レンジの大きいハンドモジュールの構成法が提案されている¹⁴⁾。

図5 マイクロハンドモジュールの動作空間
(単位: μm)

6. お わ り に

パラレルメカニズムが提案されたのは意外と古く、これまでに数多くの機構解析や設計の研究が行われてきた。パラレルメカニズムはマニピュレータやロボットの機構に一部採用されてはいたが、本格的な利用はごく最近のことであり、この種の研究開発がロボットにおける重要な一分野として形成されつつある。本稿では実際に適用された機構や応用分野を具体的に紹介することにより、ロボットメカニズムの新しい研究の流れを示したつもりである。パラレルメカニズムの特徴と利用価値を読者に御理解いただき、本分野がより発展することを願う次第である。

参 考 文 献

- 1) D. Stewart, A Platform with Six Degrees of Freedom, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180, Pt. I, No. 15, pp. 371-386, 1965-1966.
- 2) AICO, Product Sheet, SPACE-1: Stress Control Wrist System
- 3) K. Machida, Y. Toda, et al., Smart End Effector for Dexterous Manipulation in Space, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 15, No. 1, pp. 10-16, 1992.
- 4) O. Khatib and B. Roth, New Robot Mechanisms for New Robot Capabilities, Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. IROS '91, pp. 44-49, 1991.
- 5) T. Arai, R. Stoughton, et al., Development of a Parallel Link Manipulator, Proc. the 5th International Conference on Advanced Robotics '91 ICAR, pp. 839-844, 1991.
- 6) 新井健生, 静力学特性に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合, 日本ロボット学会誌, 第10巻, 第4号, pp. 117-124, 1992.
- 7) H. Adachi, T. Arai, et al., Study on Underground Space Excavating Machine, Proc. the 9th International Symposium on Automation and Robotics in

- Construction, pp.751-758, 1992.
- 8) T. Arai, R. Stoughton, et al., Bilateral Control for Parallel-Link Manipulators, Proc. IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems '92 Kobe, pp.467-472, 1992.
- 9) R. Clavel, DELTA, a fast robot with parallel geometry, Proc. International Symposium on Industrial Robots, pp.91-100, 1988.
- 10) F. Pierro, P. Dauchez, et al., HEXA : a fast six-DOF fully-parallel robot, Proc. the 5th International Conference on Advanced Robotics '91 ICAR, pp. 1158-1163, 1991.
- 11) R. Kurtz and V. Hayward, Multi-goal Optimization of A Parallel Mechanism With Actuator Redundancy, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8, No.5, 1992.
- 12) A. Hara and K. Sugimoto, Synthesis of Parallel Micromanipulator, Trans. ASME, Joun. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.111, pp. 34-39, 1989.

- 13) T. Arai, R. Stoughton, et al., Micro Hand Module Using Parallel Link Mechanism, Proc. JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation, Vol.1, pp. 163-168, 1992.
- 14) R. Stoughton and T. Arai, Kinematic Optimization of a Chopstick-Type Micromanipulator, Proc. JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation, Vol.1, pp.151-157, 1992.

新井健生 (Tatsuo ARAI)

1952 年生. 1975 年東京大学計数工学科卒業. 1977 年同大学院工学系修士課程修了. 同年工業技術院機械技術研究所入所. 以来, 知能ロボット, マニピュレータの機構と制御等の研究に従事. 現在同所ロボット工学部自律制御課長. 1986年東京大学工学博士. 1986年～1987年 MIT 客員研究員. 1986年より千葉大学非常勤講師. 1988年度本学会論文賞受賞. 日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE, JIRA 等の会員.
(日本ロボット学会正会員)