ロボット機構としてのパラレルメカニズム

舟 橋 宏 明*

1. はじめに

約 30 年前に汎用のマニピュレータとして円筒座標形および極座標形の工業用ロボットが我が国に上陸して以来、ロボットは汎用性、柔軟性を身上としてその活躍の場を拡大してきた。そのために、大半のロボットは運動学的制約が少なく、大きな作業領域が確保できる開ループ機構で構成されている。

開ループ機構のマニピュレータでは、ベースからエンドエフェクタまで 1 自由度のジョイントが直列に配置され、それらすべてのジョイントが駆動される。この片持梁形のマニピュレータは、ジョイント部の角変位誤差および遊びが拡大され、集積されてエンドエフェクタの誤差となること、アームの剛性とくに曲げ剛性が低いこと、アクチュエータ・減速機の質量がアームの質量に加算されて慣性負荷となること、などのために精度、出力、可搬重量、固有振動数などが著しく低い。ロボット工学分野において、これらの短所を克服することが大きな課題の一つであり、軽量・高強度・高剛性の材料、小型・軽量・大出力のアクチュエータ、フレキシブルアームの高精度位置決め技術などの開発が精力的に行われてきた。そのような中で、ロボットの特性の改善を機構そのものに求める試みも行われてきた。

近年とくにパラレルマニピュレータ/ロボットと称する多自由度閉ループ機構を採用したマニピュレータに関する研究論文が数多く発表されるようになった。閉ループ機構を採用し、アクチュエータをベース上に配置すれば、機構の剛性・固有振動数が高くなり、高速・高精度の作業が可能となる。生産現場においては加工・組立・検査工程に益々厳しい精度向上とタクトタイム短縮が要請されており、パラレルマニピュレータに熱い眼差しが注がれている。

2. パラレルメカニズムの概念

パラレルメカニズム (parallel mechanism) は並列機

構とでも称すべきもので、“パラレル”には 2 直線または平面が交わらない位置関係にあることの“平行”の意味はない。すなわち、閉ループ機構において図 1 のように二つ以上の対偶が連結された連鎖が、静止節（ベース）と出力節（エンドエフェクタ）の間に並列に (in-parallel) 複数配置された構造をもつとき、その機構をパラレルメカニズムと呼び、これを利用したマニピュレータ/アームをパラレルマニピュレータ/アームと呼んでいる。このような構造をより適切に表現するために、in-parallel connected mechanism; in-parallel connection manipulator¹⁾などと呼ぶことがある。邦訳すれば並列連結機構とでもなるうか。

このような構造の機構においては、アクチュエータをもつ能動ジョイントとそうでない受動ジョイントが存在する。したがって、閉連鎖の運動学的拘束とアクチュエータの運動の両者が組み合わされて同時に (in-parallel) 作用することにより、出力節の運動が制御されることになる。機構のこの特徴を重視して、in-parallel actuated mechanism (並列駆動機構) と呼ぶ研究者^{2),3)}も多い。この考え方からすれば、図 2 の機構²⁾において矢印を付した二つの直進対偶と一つの回転対偶を能動ジョイントとし、残りの回転対偶を受動ジョイントとすると、この機構もパラレルメカニズムに含まれる。図 1 の

(a) 3 自由度平面機構 (b) 6 自由度空間機構
図 1 パラレルメカニズムの例 (矢印：能動ジョイント)

原稿受付 1992 年 8 月 7 日

Parallel Mechanisms As a New Robotic Mechanism

* 東京工業大学工学部

図 2 部分パラレルメカニズムの例 (矢印：能動ジョイント)

機構を完全パラレルメカニズム (fully parallel mechanism), 図 2 の機構を部分 (または不完全) パラレルメカニズム (partially parallel mechanism) と呼び、両者を区別することができる。

歩行ロボット、複腕アーム、多指ハンドなども、歩行面や搬送物などを含めて閉ループ構造となるので、一種のパラレルメカニズムとみなすことができる。

3. ロボット機構としての特徴

部分パラレルメカニズムについては具体的特性の検討が殆んど進んでいないので、ここでは完全パラレルメカニズムについてロボット機構としての特徴を述べる。

3.1 構造の特徴

一般にロボット機構では汎用性の観点から運動特性の空間的等方性が望まれ、また制御のための順運動学、逆運動学の容易さの点からも、ベースとエンドエフェクタ間の各連結連鎖は開連鎖で、同一の構造、寸法とし、それぞれに一つの 1 自由度アクチュエータが配置されることが多い。このような機構では、機構の自由度を M とすれば、連結連鎖の数は M であり、しかも各連結連鎖の対偶の自由度の総和も M である。

図 4 3 自由度平面機構

(a)

(b)

(c)

図 3 6 自由度パラレルメカニズムの形式 (破線：開連鎖)

ここで留意すべき点は、各連結連鎖の対偶の自由度の総和 M に対してアクチュエータは一つだけであるから、多自由度対偶を採用すれば、対偶の数、したがって節の数が減少し、機構が単純化されることである。たとえば、図 1 (b) の $M=6$ の空間機構 (スチュワートプラットフォーム) は、ベース上の 2 自由度対偶、エンドエフェクタ上の 3 自由度対偶および両者間の 1 自由度対偶の 3 個の対偶をもつ 2 節連鎖で構成されている。

パラレルメカニズムはエンドエフェクタが多数の連結連鎖で駆動されるので、それらの拘束によりシリアルメカニズムに較べて一般に作業領域が狭いといわれている。そのために、パラレルメカニズムの出力節上にさらにシリアルメカニズムを連結したマニピュレータが考えられ、ハイブリッドマニピュレータ³⁾と呼ばれる。

柔軟性、干渉回避の観点からエンドエフェクタに直接連結する節の数を減少させようとするれば、図 3 (a) の代りに、(b)、(c) の形式の機構⁴⁾が考えられる。一般に、機構を構成する節、対偶、独立ループなどの数については次の関係式がなりたつ。

$$\text{全節数} : n = \sum_p n_p$$

$$\text{全対偶数} : j = \frac{1}{2} \sum_p p n_p$$

$$\text{独立ループ数} : z = 1 + j - n$$

$$\text{機構の自由度} : M = F(n-1) - \sum_f (F-f) j_f$$

ここに、 n_p は p 対偶素節 (p 個の対偶素をもつ節) の数、 j_f は自由度が f の対偶の数、 F は空間機構では $F=6$ 、平面および球面機構では $F=3$ である。上式をもとにして各形式の機構について対偶の自由度と数を具体的に求めることができる⁴⁾。

図5 3自由度平面機構(図4)の逆運動学解

なお、連結連鎖は開連鎖に限定する必要はなく、運動学特性、力学特性などの向上のために閉連鎖⁹⁾を用いることもある。

3.2 運動学的特徴

逆運動学、すなわちエンドエフェクタの位置・姿勢を指定してアクチュエータの入力変位を定める問題は、各連結連鎖ごとに別々に解くことができる。しかも前項で述べたように多自由度対偶からなる連鎖では節数が少ないから、シリアルメカニズムに較べてはるかに容易に解を求めることができる。また、たとえば図1(b)の機構のように、機構によっては解が1組だけしかなく、これもシリアル形と異なる点である。

順運動学に関しては、機構内のすべての独立ループについてその閉ループ条件式を導出し、それらを連立させて解くことになる。したがって、シリアルメカニズムと異なり、解が複数組存在する。このことはロボットを運転、使用する上で大きな問題となる。

パラレルメカニズムではアクチュエータの入力運動は受動ジョイントを含む閉連鎖の拘束条件に基づいてエンドエフェクタへ伝達されるので、運動伝達性が問題になる。たとえば、図1(a)の3自由度平面機構の2対偶素節の長さを単位長1として、図4のようにベース上の対偶 $J_{1,i}$ 、エンドエフェクタ上の対偶 $J_{3,i}$ ($i=1,2,3$) をそれぞれ半径 $R=1$ 、 $r=0.5$ の円周上に等間隔に配置した機構では、逆運動学解は図5のように(a)~(h)の8組が存在する。エンドエフェクタ上の x_p 軸がベース上の X 軸となす角を 30° に一定に保つとき、解(a)に対する作業領域(エンドエフェクタ上の中心Pのとり得る領域)は図6に示す三つの円弧で囲まれた領域とな

る。ここで、能動ジョイント $J_{1,i}$ のみを駆動したときのエンドエフェクタ上の対偶点 $J_{3,i}$ の運動方向と作用力の方向 $(\vec{J_{2,i}}, \vec{J_{3,i}})$ のなす角、すなわち圧力角を α_i ($i=1,2,3$) とし、運動伝達指数を^{*}

$$TI = \min(|\cos\alpha_1|, |\cos\alpha_2|, |\cos\alpha_3|)$$

とすれば、作業領域内における TI の分布は図6となる。図5の8組の解について $TI \geq 0.5$ を満たす作業領域を図示すれば図7の斜線部⁹⁾となる。その全領域に対する面積比は図中の()内となり、実用に供し得る領域は

図6 作業領域における TI の分布

図 7 運動伝達性 ($TI \geq 0.5$) を考慮した作業領域 (解 (c) と (e) および (f) と (g) の領域は解 (b) および (d) の領域を点 0 回りに $\pm 120^\circ$ 回転したものに一致する.)

かなり狭いことが分かる。

パラレルメカニズムにも特異点^{7),8)}が存在し、シリアルメカニズムの特異点と類似の性質をもつものがある。図 8 に 2 自由度平面機構の例⁹⁾を示す。同図 (a-1) において、出力端 P が二つの直線 $J_1 J_2$ と $J_4 J_5$ の交点に位置するとき、点 P は直線 $J_1 J_2$ に直角の方向にしか運動できない。さらに (a-2) では 4 点 $J_3 J_4 J_5 P$ が同一直線上にあるので、点 P は瞬間的に静止することになる。これらはシリアルメカニズムに現われる特異点と性質が似ており、力学的には特に問題はない。これに対して、(b-1) では 3 点 $J_2 J_4 J_5$ が同一直線上にあり、二つの入力に従属関係が生じており、また直線 $J_2 J_4$ に直角方向の力 F を支持することができない。(b-2) は $J_2 J_3 = J_4 J_5$ の機構において対偶点 J_2 と J_4 が一致した場合で、出力端 P は任意の回転を行い、対偶 J_1 と J_3 に入力を与えることができない。これらの特異点はパラレルメカニズムに特有のもので、実際のロボットではこの位置でアクチュエータに過大負荷がかかり、場合によっては破壊の恐れがあるので注意を要する。

3.3 力学的特徴

パラレルメカニズムの第一の力学的特徴は、ベースとエンドエフェクタ間に配置された複数の連結連鎖によって負荷を分散して受けることにあり、シリアルメカニ

図 8 2 自由度平面機構の特異点

ムに較べてアクチュエータの負担はかなり軽くなると期待される。また、受動ジョイントとして回転対偶および球対偶をもつ 2 対偶素節には引張・圧縮力のみが作用し、曲げモーメントが作用しない。したがって、各節が曲げモーメントを受けるシリアルメカニズムに較べてはるかに高剛性であり、しかも分担荷重が小さいから、節を細長くし、軽くしても静的精度を高く維持することができる。

節の軽量化に加えて、さらにアクチュエータをベースまたはその隣接節上に置くことにより可動部の不要な質量増大が回避されるので、機構の固有振動数が高く、高速運転ができることも、パラレルメカニズムの大きな特徴である。

同一の動作が頻繁に繰り返されるようなロボットでは、連結連鎖の一つを 1 自由度の閉連鎖としてその動作を創成することにより、エネルギー効率の向上を図ることもできる。たとえば、歩行ロボットの脚に直線創成機構を採用して、重心が水平な等速直線運動を行うとすれば、重力に対するエネルギー消費はない。これに対してシリアルメカニズムでは、一般に負荷と運動方向が直角で出力動力が零であっても、一部のアクチュエータは正の仕事をし、残りのアクチュエータは負の仕事をするために、エネルギーを消費する。

4. ロボットへの適用と課題

パラレルメカニズムには上述のような特徴があるが、

この機構をロボットへ適用する主たる動機は、アクチュエータのベース上への搭載、大きな力の発生、高速・高精度の動作、などであろう。

アクチュエータをベースまたはその近傍に配置すれば前述のように慣性負荷が軽減されるので、ダイレクトドライブロボットでは平行クランクや5節1ループ機構¹⁰⁾がよく採用されている。また、アクチュエータ・減速機・センサの密封、動力線・信号線の収納などの点にも優れており、クリーンルーム用ロボット、逆に悪環境下のマニピュレータ・歩行ロボットへの適用が考えられている。

各アクチュエータの発生力の和として大きな力が得られ、しかも機構の剛性が高いことに着目して、土木・建設用ロボット¹¹⁾などへの適用も試みられつつある。スチュワートプラットフォーム¹²⁾は元来航空機のフライトシミュレータ用に開発されたと聞いている。その大きな加速・減速特性を利用した大型の娯楽設備も開発されている。逆に小型・軽量化して、ジョイスティックよりも自由度が多く、しかも作動範囲の広い、人工現実感用のフォースディスプレイ¹³⁾に応用した報告もある。

高速・高精度の動作特性の利用については、各種産業用ロボットに要求されていることであり、特に説明を加えることはない。微動位置決め、マイクロマニピュレータ^{14)~16)}への適用も検討されている。エンドエフェクタに加わる負荷により各連結連鎖に生じる弾性変形を計測することにより、6軸力・トルクセンサ¹⁷⁾として利用する試みもある。

さて、ロボットの設計、制御を行うためには、その機構の運動学的、動力学的特性の把握が必要であるが、前述のようにパラレルメカニズムの順運動学は、機構内の全独立ループの条件式を連立させて解くことであり、簡単ではない。このために、繰り返し数値計算を行うことが多い。一般に順運動学解、逆運動学解ともに複数组存在するから、二つの解が近接した点や特異点近傍においても全ての解を精密に求めるために、順運動学の解析解^{18),19)}が望まれる。解析解が得られれば、機構設計時の寸法決定、誤差解析・評価などが容易になるだけでなく、制御系の構成に対しても貢献する処が大である。たとえば、パラレルメカニズムでは高剛性にすることが容易にできるから、エンドエフェクタの位置・姿勢、その時間変化率などを、それらを直接センシングすることなく、アクチュエータの入力から高精度に推定することも可能である。

前章で指摘したように、パラレルメカニズムにおいては、エンドエフェクタが勝手な運動を行い、アクチュエータに過大負荷がかかる特異点があり、運転・使用上き

わめて危険である。したがって、特異点を確実に、しかも高速度で発見する手段の開発が必要である。できれば、単なる特異点解析ではなく、機構の運動伝達性を同時に評価できる手法が望ましい。前述の圧力角に基づく運動伝達指数 TI は有力な手法ではあるが、連結連鎖からエンドエフェクタへ力だけが作用する構造の機構にしか適用できない。力とモーメントの両者が同時に作用する場合の空間機構の運動伝達性の評価方法の確立が強く望まれる。

パラレルメカニズムの作業領域は、既に指摘したように、運動伝達性を考慮するとかなり狭くなる。実際には、連結連鎖間の干渉によりさらに作業領域が限定される可能性がある。機構設計時には広範囲に干渉回避をねらって節形状を決めなければならない。ロボットシミュレータの必要性はよく指摘される処であるが、パラレルメカニズムについて干渉チェック機能を有するシミュレータの開発はパラレルロボット実用化上不可欠である。

パラレルメカニズムの大きな特徴である多自由度対偶の利用を可能にするためには、それを具体化する案内要素、軸受が必要である。たとえば、現在市販されている球面軸受は鋼製の球と銅合金製の球殻の接触により構成されるものが多いが、許容揺動角が小さく⁴⁾、このために作業領域が著しく制限される。また、ラジアル方向の負荷容量に較べてスラスト方向の負荷容量は数分の一しかなく、すきまに関しては逆にスラスト方向はラジアル方向の数倍もあり、その値は 100 μm にも達する。ロボットは、少なくとも設計時には、汎用性の観点から等方性、すなわち空間的にあらゆる方向に等しく動作できるように構成されるから、球面軸受は全方向に大きく揺動可能で、等しい負荷容量、寸法精度、すきまをもつことが望まれる。

5. おわりに

パラレルメカニズムのロボット機構としての特徴と課題について概観した。詳細については本特集号の解説ならびに事例紹介をご覧いただきたい。

ロボットの適用分野が広がるにつれて、一方ではより一層の汎用性・柔軟性が追求され、他方では各分野に最も適した専用のロボットの開発が行われている。多種多様な要求に対して、シリアルとパラレルの機構を適確に選択し、組み合わせて設計できるように、両者の特性比較表が早く完成されることを期待する。

最後に、パラレルメカニズムは parallel mechanism の直訳であるが、この英語そのものも広く使用されているわけではない。パラレルメカニズム研究専門委員会では種々検討した結果取り敢えず“パラレルメカニズム”を

用いることにしたが、機構学、幾何学の分野では、“パラレル”イコール“平行”の感が強い。現在ロボットアームに多用されている平行リンク機構（学術用語としては平行クランク機構）も parallel link mechanism となり、混乱の生じる恐れがある。より適切な用語が望まれる。ご教示頂ければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) E. F. Fichter, "A Stewart Platform-Based Manipulator; General Theory and Practical Construction", J. Robot. Res. Vol.5, No.2, pp.157-182, 1986.
- 2) K. H. Hunt, "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms", Trans. ASME, J. Mech. Transm. Automn. Des., Vol.105, No.4, pp.705-712, 1983.
- 3) M. Sklar and D. Tesar, "Dynamic Analysis of Hybrid Serial Manipulator Systems Containing Parallel Modules", Trans. ASME, J. Mech. Transm. Automn. Des., Vol.110, pp.109-115, 1988.
- 4) 舟橋・他3名, "6自由度空間パラレルマニピュレータの開発", 機械学会論文集, 56巻523号(C編), pp.829-834, 1990.
- 5) 津坂・他2名, "パラレルマニピュレータの設計と機構特性", ロボット学会誌, 5巻3号, pp.180-187, 1987.
- 6) 武田・舟橋, "パラレルマニピュレータにおける運動伝達性", 第2回ロボットシンポジウム予稿集, pp.19-23, 1992.
- 7) J. P. Merlet, "Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry", J. Robot. Res. Vol.8, No.5, pp.45-56, 1989.
- 8) 内山・他2名, "パラレルロボット HEXA の特異点解析", 第9回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.65-66, 1991.
- 9) 武田・他2名, "パラレルマニピュレータの特異点解析", 第9回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.61-64, 1991.
- 10) H. Asada and K. Y. Toumi, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism", Trans. ASME, J. Dynamic Systems Measur. Control, Vol.106, No.3, pp.225-230, 1984.
- 11) 新井・他5名, "パラレルリンクマニピュレータの開発", 第3報, 第9回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.71-72, 1991.
- 12) D. Stewart, "A Platform with Six-Degrees of Freedom", Proc. Instn. Mech. Engng. Vol.180, Pt.1, No.15, pp.371-386, 1965.
- 13) 岩田, "人工現実感生成技術", 機械学会誌, 95巻883号, pp.472-477, 1992.
- 14) A. Hara and K. Sugimoto, "Synthesis of Parallel Micromanipulators", Trans. ASME, J. Mech. Transm. Automn. Des., Vol.111, pp.34-39, 1989.
- 15) T. Arai, et al, "Design and Basic Characterization of a Micro-Hand Module", 機械学会 [No.920-33] ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集 (Vol.B), pp.513-516, 1992.
- 16) 小菅・福田, "パラレル・マイクロ・マニピュレータの解析", 第9回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.3-4, 1991.
- 17) D. R. Kerr, "Analysis, Properties, and Design of a Stewart-Platform Transducer", Trans. ASME, J. Mech. Transm. Automn. Des., Vol.111, pp.25-28, 1989.
- 18) M. Griffs and J. Duffy, "A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms", J. Robotic Systems, Vol.6, No.6, pp.703-720, 1989.
- 19) C. Innocenti and V. P. Castelli, "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism", Mech. Mach. Theory, Vol.25, No.6, pp.611-621, 1990.

舟橋宏明

(Hiroaki FUNABASHI)

1964年東京工業大学理工学部機械工学科卒業, 1969年同大学大学院博士課程修了, 工学博士。1969年東京工業大学工学部助手, 同学助教を経て1984年より同学教授, 現在に至る。1977年米国コロンビア大学客員

研究員(1ケ年)。研究分野: 機械運動系の運動学, 動力学, 制御。日本機械学会, 精密工学会, 日本設計工学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)