解説

パラレルメカニズムの超高速化

Parallel Mechanisms for Producing Ultra High Speed Motions

永井

清*

*立命館大学

Kiyoshi Nagai*

*Ritsumeikan University

1. はじめに

高速性の実現のためにパラレルメカニズムの構造を採用しているロボットが多く開発されている[1]~[4]。これらのロボットは、アクチュエータをベース部（台座）に設置できるパラレルメカニズムの特徴を利用し、手先効果器を含む可動部を軽量化している。また、パラレルメカニズムは、高速性だけでなく高精度性や高剛性の実現など様々な可能性をもつものであり、パラレルメカニズムを対象とする解説記事も執筆されている[5]~[7]。

パラレルメカニズムの超高速化は、言い換えると移動時間の超短縮化である。特に、移動距離が短い場合では、文字どおりの高速化のほか、高加速化のための機構の低慣性化の追求が課題となり、機構の構造の理解とともに動力学が重要である。また、低慣性化を追求する際には、技術的トレードオフの関係になりやすい低剛性化の回避も課題となり、剛性解析が重要となる。

そこで本稿では、高速パラレルメカニズムの開発例を紹介したのち、簡単な例を用いて高速化の課題を説明し、関連する動力学と剛性解析について述べる。また、超高速化の実現のために多くのアクチュエータを用いて冗長駆動系を構成する方法を紹介する。

2. 高速パラレルメカニズムの開発例

図1は、高速パラレルメカニズム DELTA [1] の構造であり、並進3自由度動作を生成する。また、図2は、高速パラレルメカニズム HEXA [2] の構造であり、並進と回転の計6自由度動作を生成する。これらのロボットではともに、3個あるいは6個のアクチュエータ（モータ）がすべてベース部に設置されているほか、手先効果器（トッププレート）に結合されているリンクにはともに、その両端にボールジョイントが使われており、圧縮または引張力のみが作用する構造となっている。このような構造を採用する

図1 DELTA

図2 HEXA

図3 FALCON

ことは、可動部の軽量化を追求しながら低剛性化を回避することに適しており、高速性の実現のための有効な手段となっている。

図3は、高速ワイヤメカニズム FALCON [3] の構造である。ワイヤメカニズムもパラレルメカニズムの一種であり、ベース部にすべてのアクチュエータを設置できる。ただし、ワイヤの引張力の組み合わせにより手先効果器に任意の方向の合力を加えるためには、可動部の運動自由度数より1だけ多い数のアクチュエータが必要となる。ワイヤメカニズムでは弾性に起因する振動などが生じやすいが、FALCONでは、手先効果器に合力を加えないワイヤ内力の制御を行い、43[G]の加速度を達成した。

図4は、高速パラレルメカニズム NINJA [4] の構造であり、並進と回転の計6自由度動作を生成する。この機構は、4本のサブアームの根元2関節を駆動する計8台のモータがベース部に設置され、約80[G]の加速度が生成できる。

原 2012年1月23日

キーワード: Parallel Mechanism, High Speed, High Acceleration, Actuation Redundancy

*〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

*Kusatsu-shi, Shiga

図 4 NINJA

このような冗長駆動系を構成することは、アクチュエータの駆動力による高加速化だけでは不十分な場合における超高速化実現の手段として有効なので、5章で機構の構成法と制御システムの構成例について紹介する。

3. パラレルメカニズムの高速化

図5は駆動冗長性を有する1DOFパラレルメカニズムの構造であり、 O_i と S_i はそれぞれ、第 i サブアームの根元位置と先端位置である（以下 $i = 1, 2$ ）。各サブアームは、根元に能動関節をもち、トッププレートに受動関節で接続されている。いま、関節変数を $\mathbf{q} (= [q_1 \ q_2]^T)$ 、手先位置を $\mathbf{x}$ 、サブアーム先端位置を $\mathbf{x}_S (= [x_1 \ x_2]^T)$ 、リンク長さを L とすると、逆運動学に関する次式が得られる。

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \sin^{-1}\left(\frac{x_1}{L}\right) \\ \sin^{-1}\left(\frac{x_2}{L}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^{-1}\left(\frac{x}{L}\right) \\ \sin^{-1}\left(\frac{x}{L}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)より、 $q_1 = q_2 = q$ 、 $q = \sin^{-1}(x/L)$ であり、運動自由度数は1である。一方、能動関節数が2であるので駆動冗長性をもち、能動関節間に位置の拘束条件が存在することが分かる。

速度の関係式は、式(1)をもとに算出できるが、機構の構造によっては、サブアーム先端速度 $\dot{\mathbf{x}}_S$ を介して次のように求める方法も有用である。

$$\dot{\mathbf{x}}_S = \mathbf{J}_S \dot{\mathbf{q}}, \quad \mathbf{J}_S = \begin{bmatrix} LC_1 & 0 \\ 0 & LC_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_S = \mathbf{J}_T \dot{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{J}_T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_S^{-1} \mathbf{J}_T = \begin{bmatrix} \frac{1}{LC_1} \\ \frac{1}{LC_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{LC} \\ \frac{1}{LC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $C_i = \cos(q_i)$ 、 $C = \cos(q)$ であり、式(4)では、 $\mathbf{J}_S$ の正則性と $q_1 = q_2 = q$ を考慮している。

図 5 駆動冗長性を有する1DOFパラレルメカニズム

また、静力学は、関節駆動力を $\boldsymbol{\tau} (= [\tau_1 \ \tau_2]^T)$ 、手先力を $\mathbf{f}$ 、サブアーム先端力を $\mathbf{f}_S = [f_1 \ f_2]^T$ とすると、速度の関係式との双対性より次式のように得られる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_S^T \mathbf{f}_S \quad (5)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}_T^T \mathbf{f}_S \quad (6)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

式(4)、(7)より、先端速度が与えられるとサブアームの関節速度が定まり、また、サブアームの駆動力の和によりこのパラレルメカニズムの駆動力が定まることが分かる。

一方、このパラレルメカニズムの手先加速度は、 $q_1 = q_2 = 0$ の姿勢のときには次式となる。

$$\ddot{x} = \frac{1}{mL}(\tau_1 + \tau_2), \quad m = \frac{2I}{L^2} + m_T \quad (8)$$

ただし、 m は機構全体の慣性、 I は各サブアームの関節軸周りの慣性モーメント、 m_T はトッププレートの質量である。式(8)より、アクチュエータが同一であれば、駆動冗長性がない場合の τ_1 または τ_2 が0のときに比べて、大きな手先加速度が期待できる。なお、一般のパラレルメカニズムの動力学は、次章に記す方法などで導出することができる。

パラレルメカニズムの手先加速度に影響する主要因を考えると、上述の機構例から、機構に関する1)パラレルメカニズムの構造、2)各リンクの長さや慣性、および、駆動系に関する3)アクチュエータの性能、4)駆動冗長性の有無が挙げられる。よって、パラレルメカニズムの超高速化には、これらの要因を踏まえて設計することが重要となる。

4. パラレルメカニズムの動力学と剛性

前述の高速化問題を一般のパラレルメカニズムに対して行うためには、冗長駆動系となる場合も含めてパラレルメカニズムの動力学計算を行うこと、および、パラレルメカニズムの剛性解析を行うことが必要となる。

閉リンク機構の動力学計算問題に対してNakamuraらは、

閉リンクを関節位置で切り離して仮想的な木構造として計算した上で、能動関節に関する受動関節のヤコビ行列を用いて、切り離れた端点の変位が等しいという閉リンク機構を再構成するための拘束条件を扱う方法を開発した[8]。さらに中村は、この動力学計算法に対して一般化座標を導入することにより、駆動冗長性の有無にかかわらない一般の閉リンク機構やパラレルメカニズムの動力学解析法を明らかにしている[5]。吉川らは同時期に、この動力学計算問題に対して、閉リンク機構の一般化座標の具体的で分かりやすい一つの選択法を与えている[9]。

一方、剛性解析に関して、尹らは、DELTA に類似した機構を対象とし、リンクやベアリングの剛性を考慮した機構全体の剛性解析を行った[10]。また、永井らは、材料力学に基づく剛性解析において、無限大の扱いを避けるためにリンク剛性をコンプライアンス、関節剛性を剛性で表現し、それらが 0 となる場合でも支障が出ないパラレルメカニズムの剛性解析手順を提案している[11]。

動力学計算や剛性解析は、パラレルメカニズムの設計の際に必要となるが、機構の低剛性化を回避しながら生成加速度を最大化する最適設計として行うためには、慣性や剛性を設計パラメータの関数として表すことが必要となる。

5. 超高速化のための冗長駆動法

5.1 運動学的冗長性の利用

3 章の機構例は、駆動冗長性を有するパラレルメカニズムであるため、動作中の機構内部に大きな内力が発生する可能性がある。このことは、モータをトルク制御で用いることで通常は問題にならない。しかし、超高加速性の実現のために、最低限の剛性を保ちながら機構を低慣性化して出力の大きなモータを用い、同時に、高精度性の実現のためにフィードバックゲインを大きくする場合には、機構を損傷させるような内力が発生する場合があります。

そこでここでは、参考文献[12][13]の考え方に従い、次の設計指針に従ってトッププレートに運動学的冗長性を導入する方法を紹介する。

- 1) 各サブアームが独立に動作できること
- 2) 手先位置が一意に定まること

いま、この設計指針に従ってトッププレートを再設計し、トッププレートの長さが L_T でなく変数 z で表され、式(3)の代わりに次式が成り立つ場合を考える。

$$\dot{x}_S = \tilde{J}_T \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \tilde{J}_T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)は、仮に $\dot{z} = 0$ が常に成り立つときには式(3)と等価になる。このとき、式(4)と式(7)はそれぞれ

図6 運動学的冗長性の導入

図7 制御系

$$\dot{q} = \tilde{J} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \tilde{J} = J_s^{-1} \tilde{J}_T = \begin{bmatrix} \frac{1}{LC} & -\frac{1}{2LC} \\ \frac{1}{LC} & \frac{1}{2LC} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} f \\ f_I \end{bmatrix} = \tilde{J}^T \tau \quad (11)$$

となる。ただし、式(11)の f_I は z を変化させようとする内力である。この式(11)から f に対応する部分のみを抜き出すと、 $\tilde{J}$ の値より式(7)が成り立つことが分かる。すなわち、図5の機構と同じ駆動力の和によって図6の機構を駆動できる。また、その際、式(10)の $\tilde{J}$ は正則であるため、 $\dot{q}_1$ と $\dot{q}_2$ は異なる値を取ることができ、図5の機構において生じる可能性がある過大な内力の発生を避けることができる。

5.2 制御系

本節では、参考文献[14]の方法に従って高速な動作生成に適した制御系の構成方法の一例を紹介する。

図7は、前述の運動学的冗長性を導入したパラレルメカニズムの制御系である。各モータは、高速性ととも高精度性を考慮して速度制御型ドライバにより駆動することとしている。また、その速度制御型ドライバに対する指令値は、上位の制御系で算出して与える。

以下では、制御系の設計手順を説明する。まず、速度制御型ドライバをハイゲインに設定したときの $G_i(s) = q_i(s)/v_i(s)$ を、以下の三次系に実験により近似する。式 (12) は、速度指令値 $v_i(s)$ の時間積分値から $q_i(s)$ までの伝達関数を標準二次系に近似することを意味する。

$$G_i(s) = \frac{q_i(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{\omega_{nvi}^2}{s^2 + 2\zeta_{vi}\omega_{nvi}s + \omega_{nvi}^2} \quad (12)$$

次に、この $G_i(s)$ を制御対象として次の I-PD 制御を行う。

$$v_i(s) = \frac{K_{Ii}}{s}(q_{di}(s) - q_i(s)) - (K_{Pi} + K_{Di}s)q_i(s) \quad (13)$$

式 (12) と式 (13) より、次の $G_{Ci}(s) = q_i(s)/q_{di}(s)$ を算出する。

$$G_{Ci}(s) = \frac{q_i(s)}{q_{di}(s)} = \frac{K_{Ii}\omega_{nvi}^2}{s^4 + \alpha_i s^3 + \beta_i s^2 + K_{Pi}\omega_{nvi}^2 s + \omega_{nvi}^4} \quad (14)$$

ただし、 $\alpha_i = 4\zeta_{vi}\omega_{nvi}$ 、 $\beta_i = \omega_{nvi}^2 + K_{Di}\omega_{nvi}$ である。この $G_{Ci}(s)$ は、次の標準二次系の二乗に近似できる。

$$G_{Ci}(s) = \left(\frac{\omega_{ndi}^2}{s^2 + 2\zeta_{di}\omega_{ndi}s + \omega_{ndi}^2} \right)^2 \quad (15)$$

ただし、 ω_{ndi} と ζ_{di} は、望みの $G_{Ci}(s)$ を定めるパラメータである。式 (14) と (15) を恒等式とおくことにより、I-PD 制御則のゲイン K_{Pi} 、 K_{Ii} 、 K_{Di} が次のように得られる。

$$\begin{aligned} K_{Pi} &= \frac{4\zeta_{di}\omega_{ndi}^3}{\omega_{nvi}^2}, & K_{Ii} &= \frac{\omega_{ndi}^4}{\omega_{nvi}^2}, \\ K_{Di} &= \frac{4\zeta_{di}^2\omega_{ndi}^2 + 2\omega_{ndi}^2 - \omega_{nvi}^2}{\omega_{nvi}^2} \end{aligned} \quad (16)$$

実際の制御においては、式 (16) のゲインを必要に応じて微調整すればよい。また、運動学冗長性の導入に伴う z の目標値 z_d に対しては L_T を与え、 x_d に対しては運動学的冗長性の導入前と同じ目標値を与えればよい。

6. お わ り に

パラレルメカニズムの高速化の課題および関連する動力学計算と剛性解析について述べ、超高速化の実現のために冗長駆動系を構成する方法を紹介した。駆動冗長性を有する機構に運動学的冗長性を導入する本手法の概念は、動作中に仮想的な駆動冗長性をもつ高速パラレルメカニズム [14] にも見られ、高加速性実現のために多くのアクチュエータを導入するワイヤメカニズム [15] にも適用し得るものであ

る。駆動冗長性は、アクチュエータの駆動力による高加速化だけでは不十分な場合における超高速化実現の手段として有効であるが、産業界においては、高速性ととも高精度性も問われるので、パラレルメカニズムの機構設計や制御系設計を目的に応じて丁寧に行う必要がある。

参 考 文 献

- [1] R. Clavel: "DELTA, A Fast Robot with Parallel Geometry," Proc. of ISIR 1988, pp.91-100, 1988.
- [2] 内山勝, 飯村憲一, 多羅尾進, フランソワ・ピエロ, 外山修: "6 自由度高速パラレルロボット HEXA の開発", 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.451-458, 1994.
- [3] S. Kawamura, et al.: "Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON Using Parallel Wire Drive System," Proc. of ICRA 1995, vol.1, pp.215-220, 1995.
- [4] K. Nagai, M. Matsumoto, K. Kimura and B. Masuhara: "Development of Parallel Manipulator 'NINJA' with Ultra-High-Acceleration," Proc. of ICRA 2003, pp.3678-3685, 2003.
- [5] 中村仁彦: "パラレルメカニズムの動力学", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.6, pp.709-714, 1992.
- [6] 内山勝: "パラレルマニピュレータの機構と特性", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.6, pp.715-720, 1992.
- [7] 内山勝: "高速ロボット機構", 精密工学会, vol.60, no.10, pp.1403-1409, 1994.
- [8] Y. Nakamura and M. Ghodoussi: "Dynamics Computation of Closed-link Robot Mechanisms with Non-redundant and Redundant Actuators," IEEE Trans. Robotics Automation, vol.5, no.3, pp.294-302, 1989.
- [9] 吉川恒夫, 横小路泰義, 渡辺直満: "駆動力冗長性を持つ閉リンク機構の動力学解析", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.6, pp.913-917, 1993.
- [10] 尹祐根, 末広尚士, 妻木勇一, 内山勝: "パラレル機構の構造剛性解析", 日本機械学会論文集, vol.70, no.694, pp.234-242, 1995.
- [11] K. Nagai and Z. Liu: "A Systematic Approach to Stiffness Analysis of Parallel Mechanisms," Proc. of ICRA 2008, pp.1543-1548, 2008.
- [12] K. Nagai and Z. Liu: "Re-design of Force Redundant Parallel Mechanisms by Introducing Kinematical Redundancy," Proc. of IROS 2009, pp.5898-5904, 2009.
- [13] 永井清, 窪大輔: "駆動力冗長性を有する高速パラレル・メカニズムにおける運動学的冗長性の効果", SI2011 講演会論文集, pp.364-367, 2011.
- [14] 永井清, 嵩裕一郎, 西部雄貴, 山中篤: "仮想駆動力冗長性に基づく 4 自由度高速パラレル・メカニズムの開発", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.6, pp.766-773, 2010.
- [15] K. Nagai, T.N. Le, Y. Hayashi and K. Ito: "Proposal of a Redundant Drive Wire Mechanism for Producing Motions with High Acceleration and High Precision," Proc. of SII 2011, pp.1049-1054, 2011.

永井 清 (Kiyoshi Nagai)

1987 年京都大学大学院工学研究科中途退学。同年立命館大学理工学部助手 (情報工学科)。1995 年同学部助教授 (同学科)。1996 年同学部助教授 (ロボティクス学科)。2007 年同学部教授 (同学科)。現在に至る。この間、1995 年から 1996 年米国スタンフォード大学客員研究員、2004 年から 2005 年英国レディング大学客員研究員。博士 (工学)。ロボット工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)