多指ハンドにおける平行メカニズム

金 子 真*

1. はじめに

多指ロボットハンド（以下、ハンドと略記）には、機構的に三つのタイプの平行メカニズムが存在していると考えることができる。ハンドが対象物を把握した瞬間、対象物・ハンドを含めた把握系は閉ループ系を構成する。これはハンドにおいて現れる最も典型的な平行メカニズムであり、ここでは、“ハンドー対象物系の平行メカニズム”と呼ぶことにする。これに対し、ハンドを構成する個々の指自身が、平行メカニズム構成になっている場合もある。このタイプのハンドは、対象物を把握しているにないに係わらず平行構造になるもの²⁾で、ここでは“平行メカニズム機構を有するハンド”とでも呼んでおこう。一方、ハンドの場合、従来ほとんど論じられていないが、もう一つ忘れてはならない平行メカニズムが動力伝達系の中に潜んでいる。スペース上の制約から、一部のハンド³⁾を除き、ハンドの関節駆動用のアクチュエータは前腕部あるいは絶対系に固定され、動力はワイヤを介して各関節に伝達される^{3)~9)}。例えば、1個の関節に1個のアクチュエータが対応するタイプのハンドでは、アクチュエータの駆動プーリと関節側の従動プーリの間で、引っ張り側のワイヤと弛緩側のワイヤが閉ループを構成する^{4)~7)}。このような閉ループ構成は指の運動方向が切り替わる際に、等価的なバックラッシュを生成し、指の制御を行う上で大きな問題となっている。これが“駆動系の平行メカニズム”である。

本稿では、紙面の関係でハンド固有の平行メカニズムであるハンドー対象物系の平行メカニズムに焦点をあてて、その機構上の特徴、及び制御上の留意点について解説し、最後にこの分野における最近の話題についても触れてみたい。

2. 自由度一般論

ここで、図1のように N 個のリンク要素 (Kinematic

link) から構成される多自由度系を考える。仮に、図1(a)のように N 個のリンク要素が全く拘束されていないとすると、任意の1個の代表リンク要素に固定された座標系からみると、他の $N-1$ のリンク要素は全体で、

$$F_k = 6(N-1) \quad (1)$$

の機構の自由度 (Degrees of freedom of a mechanism) を有することになる。さらに、図1(b)のように、対偶 i において u_i 個の拘束を受けるものとする、

(a) 個々のリンク要素が連結されていない場合

(b) 個々のリンク要素がシリアルに連結されている場合

(c) 一部に平行機構部を含む場合

図1 リンク要素と関節との関係

原稿受付 1992年8月14日

Parallel Mechanisms in Multi-fingered Robot Hands

* 九州工業大学

多自由度系としての自由度 F_k は、関節数 J として、式(2)で表すことができる¹⁰⁾。

$$F_k = 6(N-1) - \sum_{i=1}^J u_i \quad (2)$$

一方、関節の自由度 f_i と拘束数 u_i との間には、

$$f_i + u_i = 6 \quad (3)$$

の関係があるから、式(2)は式(4)のように書き換えることができる。

$$F_k = -6(J-N+1) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (4)$$

ここで、式(4)の第1項の意味について考えてみよう。図1(b)のように各関節がシリアルに連結されている場合、関節数 J はリンク要素数より常に1個少なくなる。したがって、式(4)の第1項のカッコの中は零となる。次に、図1(c)のようにリンク系の一部が平行機構になっている場合を想定してみよう。このように、平行機構部が1つ存在すると、関節数とリンク要素数が等しくなり、式(4)の第1項のカッコの中は1となる。一般に、独立な平行機構部が m 個存在すると、式(4)は、

$$F_k = -6m + \sum_{i=1}^J f_i \quad (5)$$

のように書くことができる。式(2)、(4)、(5)で表される機構の自由度は、運動の自由度、可動度(Mobility)、あるいは単に自由度¹¹⁾と呼ばれることもある。

3. 把握系の自由度

2章の自由度に関する基本的な知識を踏まえて、ハンドが対象物を把握した状態での、自由度について考察してみよう。ただし図2のような3本指ハンドが対象物を把握している状態を想定する。この場合、式(5)はさ

図2 把握系の自由度

らに次のように書き換えることもできる。

$$F_k = -6m + \sum \sum f_{ij}^{(a)} + \sum f_i^{(0)} \quad (6)$$

ただし、 $f_{ij}^{(a)}$ は第 i 指の第 j 関節の自由度で、 $f_i^{(0)}$ は第 i 指先と対象物との接触点の自由度である。ここで、 $f_{ij}^{(a)}$ については、アクチュエータの対応関係によって明確に規定できるが、 $f_i^{(0)}$ については、指先や対象物の形状、接触状態に多分に支配される。ここでは簡単のため、各関節は1自由度で、接触点は摩擦のある点接触とする。この場合、

$$\begin{aligned} f_{ij}^{(a)} &= 1 \\ f_i^{(0)} &= 3 \end{aligned}$$

となる。また、図2からもわかるように、2つの独立な平行機構部(①と②)が存在するから $m=2$ 。これらの関係を式(6)に代入すると、 $F_k = -6 \times 2 + (1 \times 3 + 1 \times 3 + 1 \times 3) + (3 + 3 + 3) = 6$ となる。これは、9つの能動自由度(アクチュエータの対応している自由度)のうち、実質的に独立なのは6つしかないが、同時にこのタイプのハンドは、対象物を把持したまま、対象物に3軸方向の並進運動と3軸回りの回転運動を与えることができることを意味している。別の言い方をすると、このような自由度配置は、ハンドが対象物を自由に操ることができるための機構学的な意味での十分条件に対応する。

4. 把握系の安定性

図3はハンドー対象物系とその座標系を示したものである。ただし、指先と対象物との接触点では、対象物表面の法線方向を基準にしてとった $P(l, m, n)$ 座標系と指表面の法線方向を基準にしてとった $F(a, b, c)$ 座標系が定義されている点に注意されたい。よく知られているように、関節座標系と指先座標系との間の運動学及び力学的関係は式(7)、(8)のようになる。

図3 座標系

$$Jd\theta = dx_f \quad (7)$$

$$J^t f_f = \tau \quad (8)$$

ただし, $d\theta$, dx_f , J , f_f , τ は, それぞれ関節角度変位ベクトル, 指先変位ベクトル, 関節速度を $F(a, b, c)$ 座標系の速度に変換するヤコビアン行列, 指先での接触力, 及び関節トルクベクトルである. 同様に対象物の運動及び力学的関係を対象物に設定された $B(x, y, z)$ 座標系と $P(l, m, n)$ 座標系での関係式を使って表すと,

$${}^B J_p dx_b = dx_p \quad (9)$$

$${}^B J_p^t f_p = f_b \quad (10)$$

ただし, dx_b , f_b , dx_p , f_p はそれぞれ $B(x, y, z)$ 座標系における変位ベクトル, 力ベクトル, $P(l, m, n)$ 座標系における変位ベクトル, 力ベクトルである. また ${}^B J_p$ は, 対象物に設定された $B(x, y, z)$ 座標系で発生した微小変位量を指先接触点での $P(l, m, n)$ 座標系からみた微小変位量に変換する行列である. ここで, 指先を介して力, モーメントの各3成分がすべて対象物に伝達されるのではなく, これらの一部は接触状態に応じてフィルタリングされる点に注意されたい. 例えば, 摩擦がある点接触の場合には3軸方向の力が伝達されるだけで, モーメントの伝達はないし, Salisbury¹⁾ が定義している柔らかい指先モデルの場合, 3軸方向の力に法線軸回りのモーメントが追加される. このように接触状態に応じて拘束条件を変えるため, Cutkosky らは選択行列 $H \in R^{n \times 6}$ を導入している¹²⁾. 例えば, 柔らかい指先モデルの場合,

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

となり, 摩擦のある点接触モデルの場合,

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる. ここで, 接触点における変位と力に着目してみよう. 伝達される変位を dx_{tr} と置くと, dx_f , dx_p との間に,

$$dx_{tr} = H dx_f = H dx_p \quad (13)$$

の関係がある. また伝達される力を f_{tr} とすると, f_p と f_f との間には,

$$f_p = f_f = H^t f_{tr} \quad (14)$$

の関係がある. 例えば, 柔らかい指先モデルの場合, 接触力は, $f_p = [f_i, f_m, f_n, 0, 0, m_n]^t$ となる.

以上の準備の基に, 把握系の剛性行列を定式化してみよう. いま, 関節レベルのコンプライアンス制御に起因する指先のコンプライアンス行列を C_θ とし, リンクや

指先などの構造の柔らかさに起因する指先のコンプライアンス行列を C_s とすると, 指先でのコンプライアンス C_f は両者の和として,

$$C_f = C_\theta + C_s \quad (15)$$

で表すことができる. したがって, 指先レベルの剛性 K_f は,

$$K_f = C_f^{-1} \quad (16)$$

この剛性行列は接触状態に応じて, 選択行列 H によってフィルタリングされ, 最終的に対象物側からみた指先レベルの剛性行列 K_p は,

$$K_p = H^t (H C_f H^t)^{-1} H \quad (17)$$

となる. 次に, 式 (17) で表される剛性が第 i 番目の指先剛性であるとみなし, すべての指先剛性を対象物に設定された $B(x, y, z)$ 座標系で合成すると,

$$K_b = \sum {}^B J_{pi}^t K_{pi} {}^B J_{pi} \quad (18)$$

式 (18) には, 制御によって作り出される関節剛性と, ハンドが元々有している構造上の剛性が加味されている点に注意されたい. さらに注意しておきたい点は, 式 (18) で表される剛性行列は正定性 (positive definite) が保証されている点である. したがって, 対象物に微小変位を与えた場合, 式 (18) に基づいて発生する力・モーメントは, 必ず正の復元力・復元モーメントを発生する. つまり, この剛性は把握系を不安定にする要因にはなり得ない.

ところが, 実際には把握系はある条件のもとで簡単に不安定になってしまう. コインを2本の指で把持し, 把持力を増していくと, やがて安定な把握系が維持できなくなり, コインは倒れてしまう. もし, 疑問をもたれる読者がおられたら, すぐにも実験して確認されることをお勧めしたい. この実験は, 把握系に式 (18) で表される剛性以外に全く別の原因に起因する剛性が存在し, しかもその剛性が把握系を不安定にしてしまう原因を作り出していることを示唆する. この問題は, 1985 年の IEEE の Robotics and Automation Conference のハンド関連のセッションで取り上げられて, たちまち話題になった¹²⁾. ここでは, はじめに簡単な式の変形によってこの第2の剛性がどのような原因に起因するものかを探ってみよう. さて, 対象物の微小変位量を n 本の指先接触点の微小変位量に変換する行列を ${}^B \Psi_p \in R^{6 \times 6n}$ とおくと,

$$f_b = {}^B \Psi_p^t F_p \quad (19)$$

の関係が成り立つ. ただし, $F_p \in R^{6n \times 1}$ は n 本分の指先力を寄せ集めたベクトルである. ここで, 式 (19) を x_b で微分すると,

$$\frac{\partial f_b}{\partial x_b} = \frac{\partial ({}^B \Psi_p^t F_p)}{\partial x_b}$$

$$= \underbrace{({}^B\Psi_p^t) \frac{\partial \mathbf{F}_p}{\partial \mathbf{x}_b}}_{K_b} + \underbrace{\frac{\partial ({}^B\Psi_p^t)}{\partial \mathbf{x}_b} \mathbf{F}_p}_{K_j} \quad (20)$$

となる。式 (20) は 6 次元ベクトルを 6 次元ベクトルで微分したものであるから、 6×6 の行列になる。いま線形関係が成立する範囲で考えると、式 (20) 式は、

$$\Delta \mathbf{f}_b = K_g \Delta \mathbf{x}_b \quad (21)$$

と書けるから、式 (20) の右辺は把握系の剛性行列と等価であると理解することができる。ここで、右辺第 1 項は、式 (18) で得られた剛性 K_b と本質的に一致するものである。問題は式 (20) の第 2 項である。この第 2 項は指先力が一定で、把握系の形状変化によって現れてくれる剛性 K_j であり、図 4 の K_j を説明する図からもわかるように、対象物の微小な回転を益々助長するような働きをする。しかも加える力が大きければ大きい程、回転を助長するモーメントも大きくなる。この第 2 項は、系がパラレルメカニズムであるが故に発生する剛性である。コインの実験で、押し付け力を増加させると、たちまちコインが倒れてしまう理由も、この第 2 の剛性 K_j によって明快に説明できる。この第 2 の剛性まで考慮すると、把握系の等価的な剛性 K_g は、最終的に、

$$K_g = K_b + K_j \quad (22)$$

で与えられる。図 4 は、この把握系の剛性を求める過程をまとめたものである¹³⁾。ここで、 K_g は対象物及びハンドの幾何学的形状に大きく依存している点、また把握系あるいは閉リンク系が安定になるためには、 K_g の正定性^{13), 15), 17)}が保証されなければならない点に注意されたい。また、引っ張り力まで許されるような閉リンク系

では、 K_j は引っ張り時に系を安定化するように働く点にも注意されたい^{14), 15)}。この引っ張り時の安定性については、図 4 の力の方向を逆にして考えてみれば容易に理解できよう。

次に簡単な例で、 K_b , K_j , K_g の具体的な形について調べてみよう。図 5 は 2 本指モデルが対象物を把握している状態をモデル化したものである。ただし、2 次元問題とする。いま、各指レベルで剛性制御が行われて、指先で

$$K_f = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

の剛性が生成されていると仮定する。この場合、把握系内に存在するコンプライアンスに基づく剛性 K_p は、

$$K_p = \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & 0 \\ 0 & 2k_y & 0 \\ 0 & 0 & 2r^2k_x \end{bmatrix} \quad (24)$$

となる。ただし、 r は対象物中心から接触点までの距離を表している。式 (24) は、指による初期押し付け力零の場合の把握系の剛性に相当し、この行列が正定であることは自明であろう。一方、 K_j は指による初期押し付け力 f_0 を想定した上で、対象物に微小回転を与え、そのときの指の押し付け力が生成する回転モーメントから、式 (25) のようにもとめることができる。

$$K_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2rf_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式 (25) で表される剛性 K_j が正定にならないことも明

図 4 把握系の等価的な剛性の導入方法

かである。式 (24), (25) より, 把握系の等価剛性 K_g は,

$$K_g = \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & 0 \\ 0 & 2k_y & 0 \\ 0 & 0 & 2r^2k_x - 2rf_0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

この場合, 合成された把握系の等価剛性 K_g が正定になるための条件は,

$$2r^2k_x - 2rf_0 > 0 \quad (27)$$

初期押し付け力 f_0 を $2rk_x$ より大きくすると, 把握系の安定性は保証されなくなる。コイン問題で, 把持力を増したときに, 把握系が不安定になることは, この簡単な例からも説明することができる。

* * *

最近, Whole Arm Manipulation (WAM)¹⁸⁾, Power Grasping¹⁹⁾, Inner Link Contact といったキーワードをよく耳にする。これらは, いずれも指先で対象物を把握することを前提としたこれまでのハンドの研究に, 新たな方向性を示唆するだけでなく, パラレルメカニズムの観点からも, 興味深い研究課題を提供する。例えば Orin ら¹⁹⁾は, 図 6 のような把握系を想定し, 関節アクチュエータのトルク飽和を仮定した上で, 把持可能な円柱の最大重さを以下のような線形計画問題として取り扱っている。

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} \quad W: \\ &\text{Subject to} \quad A[W, N, \tau] = 0 \\ &\quad \quad \quad [\tau] \leq B \\ &\quad \quad \quad W, N, \tau \geq 0 \end{aligned}$$

ただし, W, N, τ は円柱の重さ, 接触点の接触力の法線方向成分を集めて作ったベクトル, 及び関節のトルクベクトルである。また A, B は静力学的な力の平衡条件から導かれる方程式の係数行列, 及びトルクの飽和条件から得られる拘束条件をベクトル表示したものである。

図 5 2本指の把握モデル

図 6 Power grasping の一例¹⁹⁾

図 7 Whole Arm Manipulation の一例

ところが, リンク内接触を仮定した把握問題は, 一般に数学的にきれいに定式化できない場合が多い。例えば, 図 7 のような WAM を考えてみよう。この場合, アームが対象物を把持した状態では, 系の運動の自由度は第 1 関節の回転の自由度しか残らない。ここで, 把握力を大きくするため, 例えば第 3 関節の角度 θ_3 をさらに大きくしようとすると, 対象物はリンクから滑り出てしまうことも考えられる。このような現象は, 我々が手より大きなものを片手で掴もうとする場合によく経験することであるが, いざモデル化して解析しようとしても, なかなかうまくいかない。解析的にうまくいかない最大の理由は, たとえ関節トルクセンサを仮定して, 関節トルクが計れたとしても接触点での接触力が一意に決まらないことによる。Orin らが線形計画問題に帰着させたのも, 元をたどればこのような理由による。しばらくは, ネタとして使えそうな気がする。

参考文献

- 1) M. T. Mason and J. K. Salisbury : Robot Hands and

- the Mechanics of Manipulation, Cambridge, MA, MIT Press, (1985).
- 2) K. J. Hunt and L. E. Torfason: A Three-fingered Pantograph Manipulator—A Kinematic Study, ASME paper 86-DET-72 (1986).
 - 3) 鬼木, 梅津: 多指ハンドの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 92' 予稿集, p. 71 (1992).
 - 4) T. Okada: Object-handling System for Manual Industry, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC 9-2, p. 79 (1979).
 - 5) W. Paetsch and M. Kaneko: A Three Eingered, Multijointed Gripper for Experimental Use, IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, p. 853 (1990).
 - 6) 菅野重樹ほか: 情報処理作業を目的とした自律ロボットの4肢システムの構成, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 4, p. 81 (1985).
 - 7) H. Maekawa, K. Yokoi, K. Tanie et al.: Position/Stiffness Based Manipulation by Three-fingered Robot Hand, Proc. of Int. Symp. on Advanced Robot Technology, p. 597 (1991).
 - 8) S. C. Jacobsen, et al.: Design of the Utah/MIT Dexterous Hand, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p. 1620 (1986).
 - 9) J. K. Salisbury: Kinematics and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands, ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 105, p. 35 (1983).
 - 10) K. H. Hunt: Kinematics Geometry of Mechanisms, Oxford University Press p. 38 (1978).
 - 11) 加藤: 人工の手・足, 計測と制御, Vol. 7, No. 12, p. 881 (1968).
 - 12) B. S. Baker, S. Fortune, and E. Grosse: Stable Prehension with a Multi-fingered Hand, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p. 570 (1985).
 - 13) M. Cutkosky and I. Kao: Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 2, p. 151 (1989).
 - 14) M. A. Adli, K. Nagai, K. Miyata, and H. Hanafusa: Analysis of Internal Force Effect in Parallel Manipulators, Trans. on the Society of Instrument and Control Eng., Vol. 27, No. 11, p. 1266 (1991).
 - 15) V. D. Nguyen: Constructing Stable Grasps in 3D, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p. 234 (1987).
 - 16) 金子, 今村, 横井, 谷江: 摩擦を考慮した多指ハンドの剛性モデルによる安定把握解析, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 3, p. 49 (1989).
 - 17) 横井, 金子, 谷江: パラレルリングアームのダイレクトコンプライアンス制御 (第2報), 日本機械学会論文集, 55巻, 第515号C編, p. 1690 (1989).
 - 18) K. J. Salisbury, et al.: Preliminary Design of a Whole-Arm Manipulation System (WAMS), Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p. 254 (1988).
 - 19) K. Miraza and D. E. Orin: Control of Force Distribution for Power Grasp in the Digits System, Proc. of IEEE 29th Conf. on Decision and Control, p. 1960 (1990).

金子 真 (Makoto KANEKO)

1976 年 3 月九州工業大学機械工学科卒業. 1978 年 3 月東京大学工学系研究科機械工学専門課程修士卒業. 1981 年 3 月同大学博士課程卒業. 工学博士. 同年 4 月より通産省工業技術院機械技術研究所入所. 以来, 多足歩行ロボット, コンプライアンス制御, 多指ロボットハンドなどの研究に従事. 1988 年 4 月より一年間, 独ダルムシュタット工科大学ポストドクター研究員. 1990 年 4 月より九州工業大学情報工学部助教授, 1991 年 11 月から 3 ケ月間, 独ダルムシュタット工科大学客員教授, 現在に至る. IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会などの会員. (日本ロボット学会正会員)