解説

ロボット機構の多様性とキネマティクス

Diversity of Robotic Mechanisms and Kinematics

有 川 敬 輔* *神奈川工科大学

Keisuke Arikawa* *Kanagawa Institute of Technology

1. はじめに

ロボットアームの機能の本質は、手先に持った物体の位置や姿勢を目的の軌道に沿って動かすことである。1自由度機構によってこの機能を実現するには、リンク機構やカム機構を巧みに組み合わせる必要があり、軌道の変更は、機械の作りかえを意味する。一方、ロボットアームの場合は関節の動きを記述するプログラムを準備すればよく、軌道の変更は、プログラムの修正を意味する。時間的、金銭的成本を考えたとき、特に、軌道の変更を頻繁に行わなくてはならない分野においては、ロボットアームによって実現された「機構で動きを作る」から「プログラムで動きを作る」への転換は画期的であった。そして、この過程を理論的に支えてきたのがキネマティクスである。

ところで、標準的な方法でロボットアームを制御するためには、運動学解を解析的に求めることが要求されるが、これができる機構（「解ける機構」）は限られている。つまり、ロボットアームによって、機構で動きをつくる困難さから開放されたが、それと引き換えに機構の多様性が大きく失われる結果となった。このことは、ロボットアームに限らずロボット機構全般について言えることである。

同じ自由度を持つ機構であっても、機構ごとに個性があり、可動範囲、発生可能な速度や力、位置制御精度、特異姿勢の分布、全体的形状、軽量化のしやすさ、必要な機械要素等は大きく異なる。アクチュエータをはじめとした機械要素の性能が限られている現状において、少しでも高い性能を発揮するロボットを設計するためには、機構を選択するにあたって、要求する性能と機構の個性を照らし合わせて検討することが重要である。このとき、限られた機構の個性だけで十分なのであろうか。

本稿では、まず、位相構造とよぶ機構の基本構造に着目すると、ほとんどのロボット機構の構造が一つのクラスに

分類されることを示す。次に、このクラスに入らない位相構造のほうが多く存在し、そのような構造を持ったロボット機構も実現できることを示す。最後に、「解ける機構」という制約を外し、さらには、「機構」という制約も外したときに見えるキネマティクスの可能性について述べる。

2. ロボット機構の位相構造

ロボット機構は、複数のリンクを複数の関節で結合することにより成り立っているため、これをリンクと関節によるネットワークとして捉えることが可能である。機構の位相構造の表現方法にはいくつかのものが存在するが、図1はそのうちの一つを示している[1]~[4]。機構のリンクをグラフの点に、関節をグラフの辺に対応させた後（図1A1）、ロボットアームという土台と手先に相当するリンク（参照リンク）を基点として、点と辺の直鎖を一つの辺にまとめるというものである（図1A2, 3）。つまり、この表現方法において、辺はリンクと関節の直鎖に、点は参照リンク（塗りつぶした点で表現）か3本以上の直鎖が接続するリ

図1 ロボット機構の位相構造の表現

原稿受付 2016年1月27日

キーワード: Kinematics, Topological Structure of Robotic Mechanisms, Robotic Mechanism with Unconventional Topological Structure

*〒243-0292 厚木市下荻野 1030

*Atsugi-shi, Kanagawa

図2 代表的なロボット機構の位相構造

図3 従来型位相構造の基本ユニットと結合規則

リンクに対応する。この表現方法によれば、例えば、シリアル機構の位相構造は関節構造や自由度に関係なく、二つの点とその間をつなぐ1本の辺によって（図1B）、プラットフォーム型平行機構の位相構造は、リムの構造に関係なく、二つの点とその間をつなぐリムの数と同じ数の辺によって表現される（図1C）。

代表的なロボット機構の位相構造を図2に示す。まったく異なる構造に見えるが、図3に示すように、これらはすべて、シリアル機構の位相構造に相当する単純なグラフを基本ユニットとして、これを単純な規則（直列結合と並列結合）で結合することによって表現される。このような位相構造を特に従来型位相構造とよぶことにすると、既存のほとんどのロボット機構の位相構造は従来型位相構造に分類される。

図3に示した基本ユニットと結合規則では表現することのできない位相構造（非従来型位相構造）も多数考えられるにもかかわらず、このように既存のロボット機構の位相構造が似るのかについては、ロボット機構を設計する際、シ

図4 ロボット機構の構成と位相構造

リアル機構やプラットフォーム型平行機構を原形として共通した操作によって変形がなされているためと考えられる。共通した操作の代表的なものとして、図4Aのように「受動回転関節を能動直動関節を介して駆動する（油圧や空圧シリンダで受動回転関節を駆動する場合等）」、Bのように「複数の機構を直列的に結合する（位置制御のための機構と姿勢制御のための機構を結合する場合等）」、また、Cのように「プラットフォーム型平行機構のリム単体に閉ループ構造を持たせる」などが挙げられる。これらの操作によって位相構造は複雑化するものの、いずれの操作によっても原型が従来型位相構造である限り、その枠を外れることはない。

このような設計がなされる大きな要因の一つは運動学問題にあると考えられる。標準的な方法でロボット機構を制御するためには、運動学問題の解析解が必要であるが、これを一般的に得る方法は存在しない。このため、まったく新しい構造のロボット機構を設計した場合、運動学問題を解くこと自体が大きなハードルとなることが多い。図4に示した操作は、運動学問題の質をある程度維持する操作となっている。例えば、図4Aに示した操作後の機構（直動関節を能動関節とする）の逆運動学問題（手先位置座標から二つの直動関節の長さを求める）は、操作前の機構の逆運動問題（手先位置座標から二つの回転関節の角度を求める）を解いた後、リンク上の2点間の距離を求めることにより容易に解くことができる。

このように、運動学問題を解析的に解かなくてはならないという暗黙の制約が、ロボット機構の多様性を大きく制限していると考えられる。

3. 非従来型位相構造を持つロボット機構

既存のロボット機構のほとんどが従来型位相構造を持つものに対して、生物の筋骨格系には非従来型位相構造が多数含まれている。また、生物の進化を模した機構生成[5]、コンプライアントメカニズム（関節の代わりに材料の弾性変形を利用した機構）の最適設計手法を応用した機構生成[6][7]、

図 5 非従来型位相構造の例

図 6 非従来型位相構造の基本ユニットと結合規則

表 1 非従来型位相構造の基本ユニット数

Vertex Num.	2	3	4	5	6
Basic Unit Num.	1	0	1	4	57

多面体を基にした機構生成（多面体の辺に沿ってリンクと関節を配置）[8] [9] 等，新たな機構設計手法で設計された機構の中には，非従来型位相構造を持つものが数多く含まれている．これらのことは，非従来型位相構造を持った機構の中に，優れた特性を備えたものが存在することを示唆している．

非従来型位相構造の例を図 5 に示す．このような位相構造は無数に存在するが，与えられた点の数を持つものを列挙することは可能である．従来型位相構造の特徴表現で導入した考え方に倣い，結合規則（直列結合，並列結合，置換結合）を設定したとき（図 6），その基本ユニットの数を表 1 に示す [4]．点の数が 6 個以下のものだけでも 63 種類の基本ユニットが存在する．従来型位相構造の基本ユニットが 1 種類のみであることを考えると，このクラスの位相構造がいかに限定されたものであるかが理解できる．

列挙した基本ユニットから非従来型位相構造を持つ様々なロボット機構を構成することができる．同じ位相構造を持つロボット機構は複数存在するが，位相構造から機構を構成する際，自由度判定に広く用いられる次式（Chebychev-Kutzbach-Grübler Criterion）を利用するのが便利である．

図 7 非従来型位相構造を持つ 3 自由度平面機構

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum f_i \quad (1)$$

F は機構の自由度， n はリンク数（土台を含む）， j は関節数， f_i は関節 i の自由度を表す．また，通常，空間機構の場合には $\lambda = 6$ ，平面機構の場合には $\lambda = 3$ をとる．ここで，位相構造を表すグラフの各辺に対応するリンク関節直鎖を便宜的に多自由度関節と見なせば，機構のリンク数 n とグラフ点の数 v ，機構の関節数 j とグラフの辺の数 e ，機構の関節 i の自由度 f_i とリンク関節直鎖 i の自由度 f_{ci} （直鎖上に存在する関節自由度の合計）の対応が成り立ち，式 (1) を次式のように変形することができる．

$$\sum f_{ci} = F - \lambda(v - e - 1) \quad (2)$$

つまり，点の数 v と辺の数 e ，実現したい自由度 F ，および， λ を与えればリンク関節直鎖に設定すべき自由度の合計値 $\sum f_{ci}$ が求まる．そして，これを各リンク関節直鎖に割り振れば，与えた位相構造と自由度を有するロボット機構を構成できることになる（式 (1) を機械的に適用しただけでは自由度を正しく判定できない機構が存在する点にも注意する必要がある）．

図 7 に非従来型位相構造の基本ユニットからなる 3 自由度平面機構（ $F = 3$ ， $\lambda = 3$ ）の構成例を示す．(1) に示すような点の数 $v = 6$ ，辺の数 $e = 9$ の位相構造を選んだとすると，リンク関節直鎖に設定するべき関節自由度の合計は $\sum f_{ci} = 15$ （式 (2)）となる．これを，選択した位相構造の各辺に (3) に示すように割り振ったとする．この条件を満たす機構には様々なものが考えられるが，その一例として (4) のような機構が考えられる．

図 8 に，複数の基本ユニットからなる機構の構成例を示す．A のように，点の数 $v = 4$ ，辺の数 $e = 5$ の基本ユニットをもとに，平面 1 自由度機構を構成したとすると，これを二つ用いることにより B のような 2 自由度機構を，三つ用いることにより C のような 3 自由度機構を構成すること

図8 結合規則による機構生成

図9 非従来型位相構造を持つ6自由度空間機構

ができる。

図9に、非従来型位相構造を持つ6自由度空間機構 ($F = 6$, $\lambda = 6$) の構成例を示す[10]。図9(1)に示した基本ユニット (点の数 $v = 5$, 辺の数 $e = 9$) に対して式(2)によりリンク関節直鎖に設定すべき自由度の合計を計算すると $\sum f_{ci} = 36$ と求まる。これを、(3)のようにグラフ上の辺に割り振ると、この条件を満たす機構の例

†中段部のリンク関節直鎖は二つの球関節 (3自由度関節) からなり、自由度は5ではなく6となっている。このうちの1自由度は二つの球関節を結ぶ軸回りの回転を表しており、図9(4)の機構は(3)のような構造を持っていると見なせる (一方をユニバーサルジョイントに置き換えることで、この自由度を除くこともできる)。

††可動範囲の狭い一般的な球関節の代わりに、これと等価な直列球面機構 (すべての関節軸が一点で交わる) を用いている。

図10 逆運動学問題の数値解析モデル

として(4)のようなものが得られる[†]。この機構の運動学問題を解析に解くことは困難であるが、数值的に解くことは可能である。特に、構造の特徴を活かした逆運動学解析の概略を説明する。逆運動学問題、つまり、与えられた手先リンクの位置と姿勢を実現する6個の能動回転関節の角度を求めるとい問題を数值的に解くにあたって、球関節において仮想的に切断して得られる3個のシリアル機構に注目する (図10)。これ全体を、 $\mathbf{q}_e = (q_1, \dots, q_{12})$ を能動関節、距離 $\mathbf{x}_e = (x_1, \dots, x_6)$ を制御目的変数とする12自由度冗長アームと見なせば、図9の機構の逆運動学問題は、制御目的変数を $\mathbf{x}_e = (0, 0, 0, L, L, L)$ に到達させる制御問題として解くことが可能である (L は中段部の球関節間のリンク長さ)。この逆運動学問題の数値解を利用して、ヤコビ行列の計算や特異姿勢解析を行うことも可能である。さらに、本機構の実現可能性を検証するために開発した機械骨格モデル (アクチュエータ未搭載) を図11に示す^{††}。

4. ロボット機構のキネマティクスの可能性

リンクを関節により適当につないでも機構にはならない。機構になるための条件 (機構条件) とはどのようなものであろうか。この問題を、回転関節や直動関節のような1自由度関節だけで構成された平面機構に絞って考える。このとき、式(2)における λ は3、関節自由度の合計 $\sum f_i$ は関節数 j に等しくなるので、

$$F = 3(n - j - 1) + j = 3n - 2j - 3 \quad (3)$$

となる。まず、機構であるためには、自由度 F は1以上なくてはならない。そのため、

$$3n - 2j \geq 4 \quad (4)$$

を満たす必要がある。さらに、機構であるためには、一つにまとまっている必要がある。土台を含む n 個のリンクを

図 11 機械骨格モデル

図 12 機構条件 (1 自由度関節で構成された平面機構の場合)

一つにつなげるためには、最低でも $n - 1$ 個以上の関節が必要である。つまり、

$$j \geq n - 1 \quad (5)$$

を満たす必要がある。式 (2) に従わない機構も存在するため、さらに詳細な検討が必要であるが、少なくとも式 (4) と (5) は 1 自由度関節で構成された平面機構のリンク数と関節数から見た機構条件の概略を表現している。

この機構条件満足するリンク数と関節数の組を図 12 に図示する。これまでに、ほとんどのロボット機構が従来型位相構造を持つこと、非従来型位相構造を持つロボット機構も実現可能であることを説明したが、図 12 から分かる

図 13 タンパク質とロボット機構

ように、すべての位相構造を含めたとしても、リンクや関節の設定によっては、機構にならない場合のほうが圧倒的に多い。この意味で、ロボット機構は特殊な拘束を受けている系といえる。そして、ロボット機構のキネマティクス研究の目的は、この特殊な拘束を受ける系の挙動を理解することである。

ロボット機構のキネマティクス研究分野には、このような特殊な拘束を受ける系に関する知見の膨大な蓄積があり、これらは何もロボットに限らず同種の拘束を受ける系の挙動理解にも大いに活用できる。その応用分野の一つ、ロボット機構の運動学の視点によるタンパク質の運動理解に関する研究を紹介する [11] [12]。

タンパク質の内部には多数の原子が密に充填されているが (図 13 (a))、その基本構造は比較的シンプルで、20 種類のアミノ酸を数十から数千個、直鎖状につなげたものとなっている。このアミノ酸直鎖のバックボーンをなす構造のことを主鎖とよぶが、主鎖上の結合軸には自由度が存在し、これにより、主鎖はタンパク質の中に複雑に折りたたまれている (図 13 (b), (c))。主鎖のたたまれ方によって、タンパク質は種類に固有の三次元構造を持つ。この三次元構造は柔軟性を持っており、これに起因して、タンパク質は絶えず内部運動 (変形) を繰り返している (図 13 (b))。内部運動は、タンパク質が機能を発現する上で中心的な役割を担っており、タンパク質の内部運動を理解することは生命現象を理解する上で極めて重要である [13]~[15]。

ところで、この結合軸まわりの自由度を関節によるものと考えれば、タンパク質の構造を一種のロボット機構とみなすことができ、ロボット機構のキネマティクスの手法を、ほぼそのまま適用することが可能である [16]~[21]。図 13 は鉄輸送タンパク質ラクトフェリンの三次元構造データ (PDB-ID: 1LFH, 1LFG) を描画したものであるが、同データを用いて図 14 (a) のように主鎖構造を線形ばねにより拘束したシンプルなタンパク質モデルを構成した (3,632 本の線形ばねで拘束された 1,382 自由度機構)。図 14 (b) は、このモデルについて、鉄結合にかかわる部位を作用点としたときの、最も柔軟性の高い運動モードを示している。計測

図 14 ラクトフェリンの内部運動解析

により知られている内部運動と同様 (図 12 (b)), 溝部をヒンジ状に開閉する運動が確認できる。

この解析において, ばねの長さの微小変化と結合軸の微小回転の関係を計算するためにヤコビ行列計算, 共有結合によって架橋された部位の変形を抑制するために冗長アームの核空間運動生成 (手先の状態を固定したまま関節を動かす), コンプライアンスに応じた運動分解を行うために可操作性解析, ヒンジ軸を同定するためにスクリー解析, その他, ロボット機構のキネマティクスにおいて広く用いられている様々な手法を活用した。

5. お わ り に

これまでに述べたように, ほとんどのロボット機構は従来型位相構造を持ち, その大きな要因は「解ける機構」でなくてはならないとする制約にあると考えられる。しかし, 現在では「解けない機構」の運動学問題も数値的に十分高速に解くことが可能である。また, 非従来型位相構造を持つすべての機構が「解けない機構」というわけではなく, 中には「解ける機構」も存在する (例えば, 図 7 の機構の逆運動学問題の解析解は外枠の 6 節単ループ機構を中継することで比較的容易に求められる)。これらのことを考えると, 「解ける機構」の制約は必要以上に強く効いており, 必要以上にロボット機構の多様性を制限しているように思われる。

「解ける機構」という制約を外し, さらに, 「機構」という制約も外すことにより, キネマティクスの可能性はさらに大きく広がるであろう。

参 考 文 献

- [1] F. Freudenstein and E.R. Maki: "The creation of mechanisms according to kinematic structure and function," *Environment and Planning B*, vol.6, pp.375-391, 1979.
- [2] 杉本, 原, 坂上: "機構連鎖の自動創成アルゴリズム", *日本機械学会論文集 (C 編)*, vol.53, no.491, pp.1459-1464, 1987.
- [3] L.W. Tsai: *Mechanism Design: Enumeration of Kinematic Structures According to Function*. CRC Press, 2001.
- [4] 有川: "非従来型位相構造を有するロボット機構の生成 (非従来型位相構造の列挙と機構生成支援)", *日本ロボット学会誌*, vol.25, no.6, pp.930-937, 2007.
- [5] H. Lipson and B. Pollack: "Automatic design and manufacture

- of robotic lifeforms," *Nature*, vol.406, pp.974-978, 2000.
- [6] K.J. Lu and S. Kota: "Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization," *Journal of Mechanical Design*, vol.128, pp.1080-1091, 2006.
- [7] A. Saxena and G.K. Ananthasuresh: "A Computational Approach to the Number of Synthesis of Linkages," *Journal of Mechanical Design*, vol.125, pp.110-118, 2003.
- [8] S.K. Agrawal, S. Kumar and M. Yim: "Polyhedral Single Degree-of-freedom Expanding Structures: Design and Prototypes," *Journal of Mechanical Design*, vol.124, pp.473-478, 2002.
- [9] 越智, 鈴森, 神田: "フィジカルマンマシンインタラクション用アクティブ多面体の開発", *日本ロボット学会誌*, vol.24, no.2, pp.102-108, 2006.
- [10] K. Arikawa: "Realization of a 6-DOF Manipulator with an Unconventional Topological Structure," *Proc. of ASME 2008 DETC 32nd Mechanisms and Robotics Conference*, DETC 2008-49621, 2008.
- [11] K. Arikawa: "Investigation of Algorithms for Analyzing Protein Internal Motion from Viewpoint of Robot Kinematics," *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2010)*, Paper No. DETC2010-28551, 2010.
- [12] K. Arikawa: "Kinematic Modeling and Internal Motion Analysis of Proteins from a Robot Kinematics Viewpoint," *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2011)*, Paper No. DETC2011-47970, 2011.
- [13] 中村, 有坂 編: *タンパク質のかたちと物性*. 共立出版, 1997.
- [14] 後藤, 桑島, 谷澤 編: *タンパク質科学*. 化学同人, 2005.
- [15] A.M. Lesk: *Introduction to Protein Architecture*. Oxford University Press, 2001.
- [16] D. Parsons and J. Canny: "Geometric Problems in Molecular Biology and Robotics," *2nd International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology*, pp.322-330, 1994.
- [17] K. Kazerooni: "Is Design of New Drugs a Challenge for Kinematics?," *Advances in Robot Kinematics*, pp.134-144, 2002.
- [18] A.A. Canutescu and R.L. Dunbrack Jr.: "Cyclic Coordinate Descent: A Robotics Algorithm for Protein Loop Closure," *Protein Science*, vol.12, no.5, pp.963-972, 2003.
- [19] G.S. Chirikjian, K. Kazerooni and C. Mavroidis: "Analysis and Design of Protein Based Nanodevices: Challenges and Opportunities in Mechanical Design," *Journal of Mechanical Design*, vol.127, no.4, pp.695-698, 2005.
- [20] M. Diez, V. Petuya, L. A. Martínez-Cruz and A. Hernández: "A Biokinematic Approach for the Computational Simulation of Proteins Molecular Mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, vol.46, no.12, pp.1854-1868, 2011.
- [21] B. Gipson, D. Hsu, L.E. Kavraki and J-C. Latombe: "Computational Models of Protein Kinematics and Dynamics: Beyond Simulationw," *Annual Reviews of Analytical Chemistry*, vol.5, pp.273-291, 2012.

有川敬輔 (Keisuke Arikawa)

2000 年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。2000~2002 年日本学術振興会特別研究員 (東京工業大学)。2002 年神奈川工科大学工学部機械工学科講師。2004 年同助教授。2007 年同准教授。ロボット機構の運動学, 多自由度機械の設計, ロボット機構の運動学の視点によるタンパク質の運動理解等の研究に従事。日本機械学会, ASME などの会員。(日本ロボット学会正会員)