

関節間の従属関係を考慮した手のモデル

2K-6

土田 行信, 國井 利泰
東京大学

1 はじめに

手と腕はいくつかの物体が関節でつながった複合物体系としてモデル化できる。本論文では、物体と他の物体の接触面を有限個の代表接触点で近似し、この代表接触点に力がかかるとする。我々はこの代表接触点を、手や腕が他の物体に影響を与えるエンド・エフェクタとして考える。手と腕があるコンフィギュレーションを取った時の操作性や有効性は、武道などのスポーツの分野においては非常に重要である。操作性の評価基準として、エンド・エフェクタの自由度を考える。コンフィギュレーション・スペースとワーク・スペースを多様体と考える。複合物体の運動学、エンド・エフェクタの自由度を、多様体写像、偏速度と偏角速度、ヤコビ行列、特異コンフィギュレーションなどを用いて解析する。また、関節の可動範囲と関節間の従属関係を、コンフィギュレーション・スペースの中で考える。最後に、提案される手と腕のモデルを用いて、少林寺拳法の名人の技を解析し、モデルの有用性を実証する。

2 導入

手と腕は人間の活動の中で非常に重要な役割を果たしている。上肢には主な骨が23あり(図1.1)、全部で43の自由度を有している(図1.2)。

各関節には回転の限界があり、各自由度は定義域が $[min, max]$ であるような、パラメータによって表すことができる。また、関節間には従属関係がある。例えば、親指以外の4本の指では、通常、末梢の2つの関節の間には密

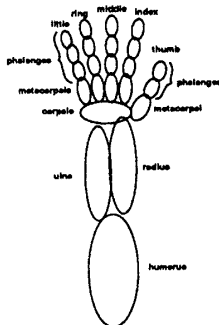


図1: 上肢の骨

A Model of Human Hands Based on the Dependency between Joints

Yukinobu Tsuchida, and Toshiyasu L. Kunii
The University of Tokyo

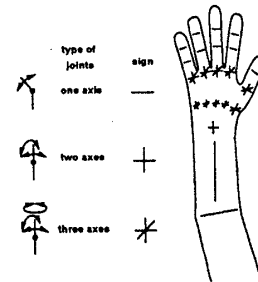


図2: 関節の自由度による分類

接な関係がある。また、手掌の4本の骨は互いに自由に動けるわけではない。このような従属関係によって、全体の自由度を減らすことが可能である。

本研究では、自由度を扱えるような手と腕のモデルの構築を目指す。モデルを構築するための数学的道具として、多様体写像、偏速度と偏角速度、ヤコビ行列、特異コンフィギュレーションなどを用いる。

3 手と腕のモデル

3.1 複合物体系としての手と腕

手と腕は複合物体系 [1] と考えることができる。本研究では手と腕を、接続した、硬い、ループのない複合物体系 (a connected, rigid, and open multibody system) として考える。

3.2 多様体写像に基づく手と腕の運動学

複合物体系としての手と腕の運動学を多様体写像を用いて記述する。他の物体との接触面を、有限個 (m) の代表接触点で近似し、それらをエンド・エフェクタと考える。 x_i が i 番目のエンド・エフェクタの位置と方向を表し、 q が各関節の角度と系全体の並進・回転を表すとすると、 i 番目のエンド・エフェクタの forward kinematic function f_i は以下で定義される。

$$x_i = f_i(q), \tag{1}$$

Forward kinematic function はコンフィギュレーション・スペースをワーク・スペースに写している。関節の角度を表す第 j 番目の変数を θ_j ($i = 1, \dots, n$) とすると、 θ_j は $I_j = [min_j, max_j]$ という定義域を取り、これは境界つき多様体として見る事ができる。また、系全体の並進・回転は $R^3 \times SO(3)$ を定義域とする変数で表される。従っ

て、関節間に従属関係がないとき、コンフィギュレーション・スペースは、

$$C = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n \times \mathbf{R}^3 \times SO(3), \quad (2)$$

という境界つき多様体になる。関節間に従属関係がある時、コンフィギュレーション・スペースは C に含まれる境界つき多様体 $D \subset C$ になる。

また、 i 番目のワーク・スペース W_i は $\mathbf{R}^3 \times SO(3)$ の部分多様体になる。まとめると次式のようになる。

$$f_i : D \subset C \rightarrow W_i \subset \mathbf{R}^3 \times SO(3) \quad (i = 1, \dots, m). \quad (3)$$

3.3 Open-Tree 複合物体系の Denavit-Hartenberg 記法

Denavit-Hartenberg notation[2][3] を Open-Tree 複合物体系に拡張する。4つのパラメータ $\{\alpha, d, a, \theta\}$ が、図3のように定義される。

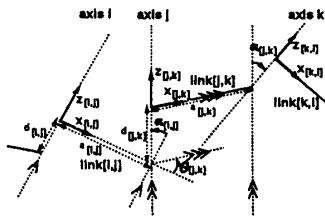


図3: パラメータ $\{\alpha, d, a, \theta\}$

本研究では、特定の人物の手と腕のパラメータを測定した。

3.4 偏速度と偏角速度、ヤコビ行列および特異コンフィギュレーション

第 i 番目のエンド・エフェクタの速度と角速度をそれぞれ V^i 、 w^i とすると、それらは次式のように書ける。

$$V^i = \sum_{j=0}^N \tilde{V}_j^i \dot{q}_j, \quad \text{and} \quad (4)$$

$$w^i = \sum_{j=0}^N \tilde{w}_j^i \dot{q}_j, \quad (5)$$

ただし、

$$N = n + 6. \quad (6)$$

\tilde{V}_j^i および \tilde{w}_j^i ($j = 1, \dots, N$) は偏速度、偏角速度と呼ばれ、次式が成り立つ。

$$\tilde{V}_j^i = \frac{\partial V^i}{\partial \dot{q}_j}, \quad \text{and} \quad (7)$$

$$\tilde{w}_j^i = \frac{\partial w^i}{\partial \dot{q}_j}. \quad (8)$$

偏速度および偏角速度を用いて、第 i 番目のエンド・エフェクタの $6 \times N$ のヤコビ行列 J_i が定義される。

$$J_i = \begin{pmatrix} \tilde{V}_1^i & \tilde{V}_2^i & \dots & \tilde{V}_N^i \\ \tilde{w}_1^i & \tilde{w}_2^i & \dots & \tilde{w}_N^i \end{pmatrix}. \quad (9)$$

ヤコビ行列の階数が6よりも小さくなる時、特異コンフィギュレーションであるという。ただし系全体の並進・回転が、コンフィギュレーション・スペースの中に入っている時には、階数が6より下がることはない。そこで、ヤコビ行列の左側 $n (= N - 6)$ 列の部分行列を考え、この部分行列の階数が6よりも下がる時、何が起こるかを考える。

もし、部分行列の張る空間が5次元以下の時、エンド・エフェクタが失われた次元の方向に運動を行なったとすると、必ず系全体の並進・回転が行なわれているはずである。このことは武道においては、相手の関節を特異コンフィギュレーションに持っていき、失われた自由度の方向に力を加えると、相手を自由に倒したり、投げたりできるということを意味する。

4 実験結果

提案したモデルの適用例として、日本の武道の一つ、少林寺拳法を選んだ。少林寺拳法の名人と技をかけられる人の手と腕のキネマティック・パラメータ、各関節の可動範囲、関節間の従属関係を測定した。切小手という技の解析結果を図4に示す。技をかけられている人の肘関節と手首の関節の軸がほぼ平行になっていて、ほとんど特異なコンフィギュレーションになっていることがわかる。



図4: 少林寺拳法の技の解析

5 結論

自由度を扱えるような手と腕の複合物体系モデルを提案し、モデルを用いて少林寺拳法の名人の技を解析し、モデルの有用性を特異コンフィギュレーションとして提示した。

References

- [1] Huston, R. L., *Multibody Dynamics*, Butterworth-Heinemann, 1990.
- [2] Craig J. J., *Introduction to Robotics: Manipulation and Control*, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1986.
- [3] Burdick J. W. IV, "Kinematic Analysis and Design of Redundant Robot Manipulators," *PhD thesis*, Stanford University, 1988.