

身体情報を内在する複雑構造ロボットの形状制御手法の開発

○中野 滉太 (九州工業大学), 林 朗弘 (九州工業大学), 福丸 浩史 (九州工業大学)

Development of control method for robots of Complicated Structure in Bodily Information

Kyusyu Institute of Technology Kota NAKANO, Akihiro HAYASHI, Hirofumi FUKUMARU

The use of robots is expected not only for industrial fields but also for non-industrial fields, such as medical, welfare, disaster rescue, and so on. Non-industrial robots, however, are always exposed to a change of working environment to be different from industrial robots. So they are required to move with taking a various pose to be adaptively desired for a change of working environment.

This paper presents a framework of robot motion control based on interaction between robot embodiments and working environments, and describes the detail of the embodiment model proposed for representing robot poses and motions.

1. 緒論

冗長性を有する複雑な構造のロボットが環境やタスクに応じて多様な動作・形状をとる場合、関節位置、関節軸方向などロボットの状態を表す情報、すなわち身体情報を把握・保持しながら、ロボットの次の動作・形状を決定する必要がある。

本研究では、動作環境に対応した複雑構造ロボットの形状制御を目的とし、ロボットの運動状態を表す身体情報を内在する Fig.1 の動作フレームワークを想定した仕組みを提案してきた。本稿では、フレームワークに内在する身体情報計算モデルを提案と、仮想ヤコビ行列を用いた逆運動学計算法を用いた冗長な複雑構造ロボットの形状制御のシミュレーションを行い、その有用性を検証する。

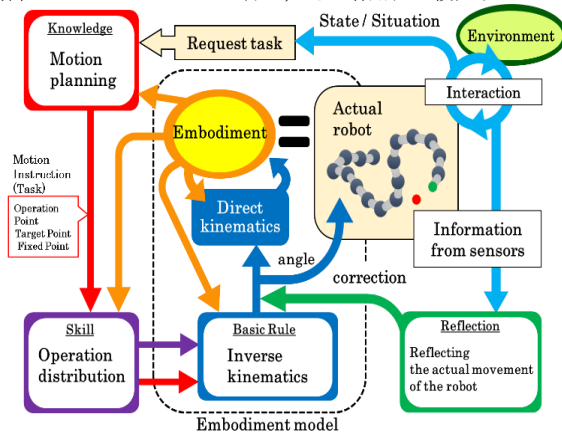


Fig.1 Motion control framework

2. 身体情報計算モデル

2.1 身体情報計算

身体情報とは、ロボットの運動状態や姿勢を表すパラメータのことである。具体的には、ロボットの構造、関節位置、関節角度、関節軸方向、ロボットの重心、などである。これらの身体情報と周囲の環境は物理的な身体を介して相互に作用し、その相互作用から次の動作が決まる。身体情報は、ロボットの動作に対して常に運動学計算によって更新される。本稿では、この運動学計算に必要な各関節の運動の伝達方向を有効グラフで表す。以上のような身体情報計算を繰り返し、身体情報を保持しながら姿勢・形状制御を行う。[1]

2.2 運動伝達方向を扱うテーブル

関節間 (または関節・タスク点間) の運動伝達の方法は、制御するロボットの構造により決定される。よって、ロボットの構造の情報を保持し、運動伝達の方法を決定するような仕組みが必要である。本研究の制御モデルでは、ロボットの関節やタスク点などの特徴点をつなぐ構造を、特徴点を頂点とする無向グラフ (Fig.2) で表現する。また、固定するリンクを切り替え可能とし、この切り替えに対応する運動伝達の方法を有向グラフ (Fig.3) で表現する。

無向グラフを表した Fig.2(a) のテーブルはロボットの特徴点間のリンクの有無を示したものであり、あるセルの行要素と列要素

に接続がある場合を 1、無い場合を 0 とする。Fig.2(b) のモデルのロボットを考えると、特徴点 P1 と P2 つまり Fig.2(a) のテーブルの行 P1 と列 P2 には接続関係があるため要素は "1" となる。また、特徴点 P1 と P3 には接続関係は無いため行 P1 と列 P3 の要素は "0" となる。

次に、有向グラフについて説明する。有向グラフのテーブルは、特徴点間の運動伝達の有無を示すものである。対象のロボットの構造において、有向グラフの行列の任意の行要素の特徴点から任意の列要素の特徴点に、運動伝達がある場合を 1、無い場合を 0 とする。例えば、Fig.2(b) において、特徴点 P1 と特徴点 P2 のリンクを固定した場合、有向グラフの行列は Fig.3(a) となる。ここで、有向グラフのテーブルの行成分で "1" があるものを関節、すべて "0" のものを関節でない特徴点として定義できる。したがって、関節の運動伝達のみを考えると、関節 P2 が回転するとその運動伝達は、Fig.3(a) のテーブルの 2 行目からわかるように、そこから先の特徴点 P3~P7 すべてに伝達される (Fig.3(b))。関節 P3、関節 P4 も同様に考えることで、ロボット全体の運動伝達を有向グラフで表す。

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	0	1	0	0	0	0	0
P2	1	0	1	0	0	0	0
P3	0	1	0	1	0	0	0
P4	0	0	1	0	1	0	0
P5	0	0	0	1	0	1	1
P6	0	0	0	0	1	0	0
P7	0	0	0	0	1	0	0

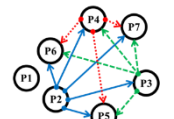
(a) Table
Fig.2 Un Directed Graph



(b) Structure

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P1	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	1	1	1	1	1
P3	0	0	0	1	1	1	1
P4	0	0	0	0	1	1	1
P5	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0

(a) Table
Fig.3 Directed Graph (Fixed Point P1-P2)



3. 仮想ヤコビ行列を用いた逆運動学計算

逆運動学計算は、目標とする位置、姿勢を実現するための関節変位を求める計算である。関節変数ベクトル $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$, 手先の位・姿勢を表すベクトル $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ の関係は次式となる。

$$x = f(\theta) \quad \dots (1)$$

この式を線形化するために時間に関して微分すると次式となる。

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad \dots (2)$$

ここで、(2)式の右辺のヤコビ行列 J は次式で与えられる。なお、このヤコビ行列について 3 次元空間で動作するマニピュレータを想定した場合、 n =関節数、 m =目標数の行列となる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

本研究では、実際のマニピュレータ (実マニピュレータ) を仮想マニピュレータに変換し、仮想マニピュレータの関節 (仮想関節) の角度を求め、この角度を実際のマニピュレータの角度に再変換する方法を提案する。本手法では、(2)式をある直交行列 K によりプレコンディションすなわち、解きやすい形に変形した新しい仮想ヤコビ行列 J' を生成する。ここでは、2次元平面上で動作する 3 軸のマニピュ

レータを例にして説明する。この時の仮想マニピュレータのイメージ図を Fig.4 に示し、関節空間の関係図を Fig.5 に示す。尚、この図において R^2 は 2 次元実空間、 R^3 は 3 次元実空間を示す。

実際のマニピュレータの問題は以下のようになる。

$$\dot{x} = J\dot{\theta}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{x1} & j_{x2} & j_{x3} \\ j_{y1} & j_{y2} & j_{y3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

はじめに、この問題を仮想の問題に変換する直交行列 K を求める。直交行列 K は以下のようにあらわされる。

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & k_{22} & k_{32} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

K_1, K_2 は(4)式のヤコビ行列の行成分をそれぞれ正規直交化したベクトルである。 K_3 は K_1, K_2 に対して直交なベクトルである。Fig.5 に示すように K_1, K_2, K_3 は互いに直交したベクトルであり K_1, K_2 は(4)式のヤコビ行列の行成分からなる固有ベクトル V_1, V_2 が作る平面上にあるベクトルである。

$$KK^T = I \quad (I \text{ は単位行列}) \quad \dots (6)$$

(6)式を用いて、(4)式を以下のように総和規約を用いて書き換える。

$$\dot{x} = JK^T\dot{\theta}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{xi}k_{1i} & j_{xi}k_{2i} & j_{xi}k_{3i} \\ j_{yi}k_{1i} & j_{yi}k_{2i} & j_{yi}k_{3i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{1i}\dot{\theta}_i \\ k_{2i}\dot{\theta}_i \\ k_{3i}\dot{\theta}_i \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

ここで、ヤコビ行列の 1 行目と 2 行目の作る部分空間 (平面) は K_3 と直交するため内積が 0 となるため、(7)式は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{xi}k_{1i} & j_{xi}k_{2i} \\ j_{yi}k_{1i} & j_{yi}k_{2i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{1i}\dot{\theta}_i \\ k_{2i}\dot{\theta}_i \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = J'\dot{\phi} \quad \dots (8)$$

このようにして仮想の問題に変換する。2 次元空間上で動作するマニピュレータの場合、生成した仮想ヤコビ行列 J' は、2 次正則行列である。仮想ヤコビ行列 J' を持つ仮想マニピュレータについて、仮想関節の角度 ϕ を次式から求める

$$J'^{-1}\dot{x} = \dot{\phi} \quad \dots (9)$$

この仮想関節の角度から直交行列 K^T を用いて実際のマニピュレータの関節角度を求める。

$$\dot{\theta} = K\dot{\phi} \quad \dots (10)$$

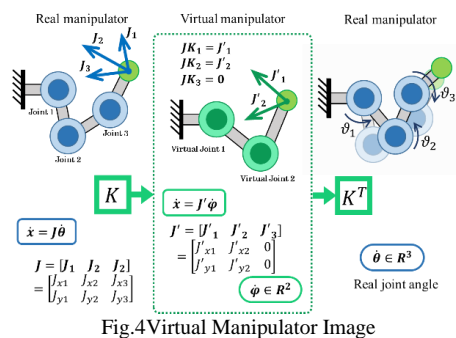


Fig.4 Virtual Manipulator Image

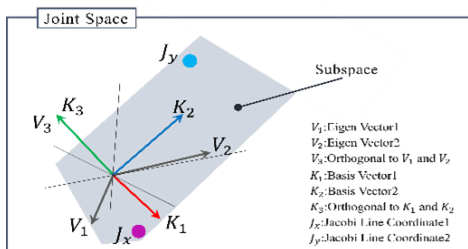


Fig.5 Basis Vector and Eigen Vector

4. シミュレーション

本稿では、2 次元空間で動作する 3 関節のマニピュレータについて、2 目標を与えた場合の数値シミュレーションを行った。2 目標の関節角度解は、目標点ごとに計算した関節角度を足し合わせたものとする。[3]

ここで、3 章(5)に示す K の条件を以下のように設定した。ただし、 K の添え字の 1 項目はタスク点、2 項目は列を表す。

KA1 : JA1 を正規化 (JA1 はタスク点 A のヤコビの第 1 行目)

KA2 : KA1 に対して JA2 を正規直交化

KB1 : KA1 に対して JB1 を正規直交化

KB2 : KB1 に対して JB2 を正規直交化

この時の動作の様子を Fig.6、 K の変化の様子を Fig.7 に示す。Fig.6 では、目標点 A にタスク点 A が到達している。これは、タスク点 A とタスク点 B のヤコビの可操作度が影響していると考えられる。

次に、 K の列ベクトルにそれぞれ優先係数を与えた場合の目標偏差の様子を Fig.8 に示す。その結果から、Fig.8(d) の KB2 に優先係数を与えたときのみ、目標点 B に到達することがわかる。これは、Fig.7 の “KA1 & KB2” に注目すると、これら 2 つのベクトルの内積は負であるから、2 つのベクトルが計算する関節角度は互いを打ち消しあうため、ノルムが大きな方が優先される関係であることがわかる。したがって、Fig.8(d) の場合には、KB2 が優先され、目標点 B に到達している。

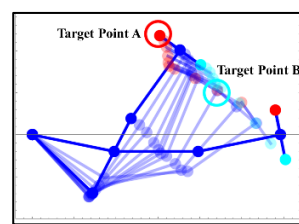


Fig.6 Manipulator

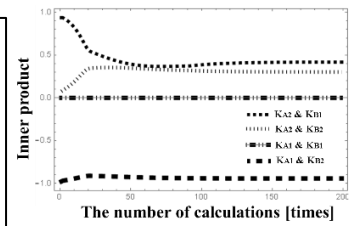
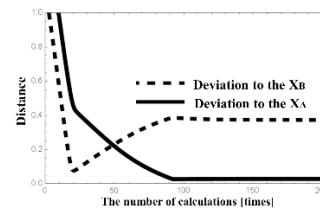
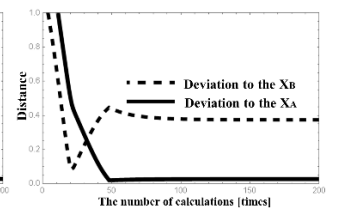


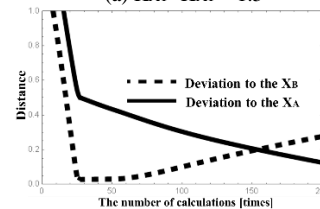
Fig.7 State of the K of subspace



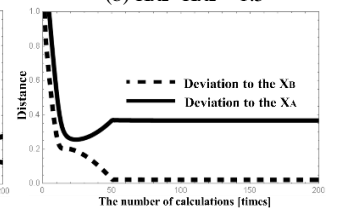
(a) KA1=KA1 × 1.5



(b) KA2=KA2 × 1.5



(c) KB1=KB1 × 1.5



(d) KB2=KB2 × 1.5

Fig.8 Changes in the coefficient of K

5. 結論

複雑構造ロボットの制御手法開発を目的として、その構造と運動伝達を表すグラフを取り入れ、身体情報を把握しながら運動学計算を行うモデルを提案した。また、仮想マニピュレータの考え方に基づいた逆運動学計算手法によって、多目標を与えた場合でも、本手法の K を変化させることで姿勢制御が可能であることを確認した。

今後は、多目標の計算において、運動学計算が互いに影響しあうような K の部分空間の共通部分に着目し、 K の条件によるマニピュレータの動作について検討を行う。

参考文献

- [1] 新垣涼平, 他: 身体情報に基づく複雑構造ロボットの形状制御モデルの開発, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.5-6, 2016.
- [2] Dragonm N. Nenchev, “Redundancy Resolution through Local Optimization: Review”, Journal of Robotics Systems 6(6), pp.770-775(1989).
- [3] 関段友哉, 福丸浩史, 林朗弘, 原慎真也, 佐竹利文, “プレコンディショニングを行ったヤコビ行列を用いた超冗長マニピュレータの逆運動学計算法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P1-03b5, 2016