仮想ヤコビを用いた逆運動学計算による 複雑構造ロボットの姿勢制御手法の開発

A Robotics control of Complicated Structure by means of Inverse Kinematics Calculation based on Virtual Jacobian Matrix

○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）

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

様々な環境で動作し，冗長性を有する複雑構造ロボットは，災害現場等における瓦礫中の探査など狭隘な環境下で使用する際，その形状制御が非常に重要であり，多関節を有する複雑構造ロボットが環境や動作に応じて多様な姿勢・形状となる場合，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，ロボット全体の次の姿勢を決定する必要がある．そのため，周りの環境とロボット自身の運動状態・姿勢を把握して，次の姿勢を計算し，動作する仕組みが必要である．

本稿では，複雑構造ロボットの姿勢を効率的に計算する手法として，ヤコビ行列のプレコンディションによる逆運動学計算法を用いた，多関節を有する複雑構造ロボットの姿勢・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．

2.　逆運動学計算

2.1　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$\theta = [\theta_1, \theta_2 \ldots, \theta_n]^T$，手先の位・姿勢を表すベクトル$x = [x_1, x_2 \ldots, x_m]^T$の関係は次式となる．

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

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．

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

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．

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

本研究では，実際の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を図 1 に示し，関節空間の関係を図 2 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．

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

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{x1} & j_{x2} & j_{x3} \\ j_{y1} & j_{y2} & j_{y3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (4)$$

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．

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

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行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．

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

(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．

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

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{xi}k_{1i} & j_{xi}k_{2i} & j_{xi}k_{3i} \\ j_{yi}k_{1i} & j_{yi}k_{2i} & j_{yi}k_{3i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{1i}\theta_i \\ k_{2i}\theta_i \\ k_{3i}\theta_i \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (7)$$

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と直交し内積が 0 となるため，(7)式は以下のようになる．

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

$$\dot{x} = J'\dot{\varphi} \quad \cdots \quad (8)$$

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 $\dot{\varphi}$ を次式から求める

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

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．

$$\dot{\theta} = K\dot{\varphi} \quad \cdots \quad (10)$$

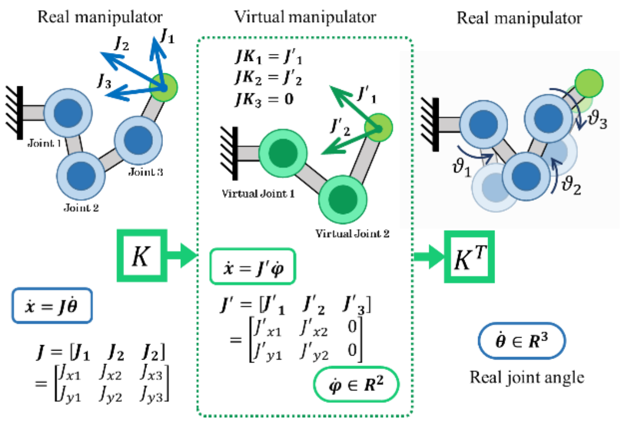


Fig.1 Virtual Manipulator Image

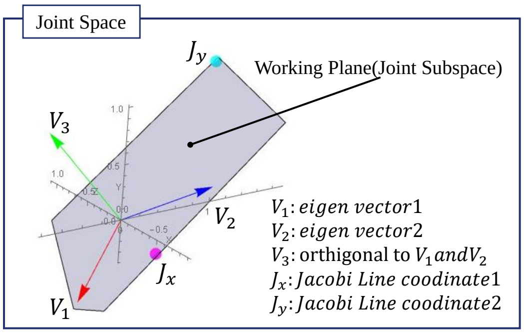
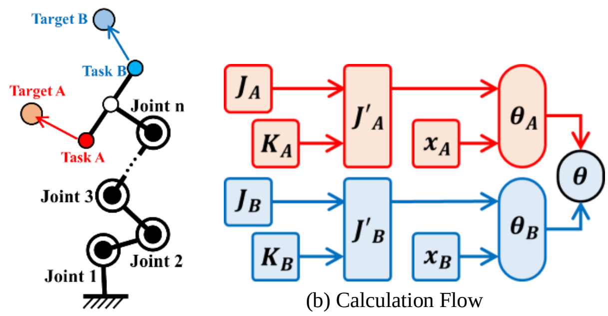


Fig.2 Basis Vector and Eigen Vector

2.2 提案手法による多目標の逆運動学計算

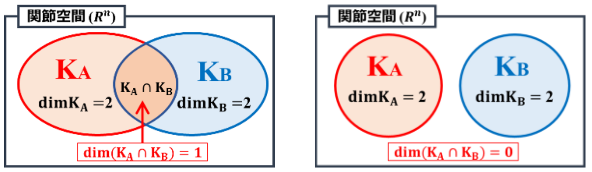
多関節ロボットに A と B の 2 目標を与えた場合の逆運動学計算の流れを Fig.3 に示す．2 目標を与えた場合，今回提案する手法ではそれぞれの目標に対して，K を決定し，仮想ヤコビを使った逆運動学計算を行う．そして，得られた関節変位足し合わせて実際の関節変位を求める．擬似逆行列によって解を求める場合，行数 m=6，列数 n=7 のヤコビ行列について解く必要がある．目標数，関節数が増加すると，ヤコビ行列自体が複雑化する．本手法では，1 目標についての解を組み合わせることによって，関節変位を求める．

本手法で K を決定する際，図 4 に示すように(a)(b)の 2 つの場合が考えられる．図 4 (a)のように関節空間のなかで独立な関係であれば，それぞれ得られた関節変位を足し合わせて計算を行うことができる．しかし，図 4(b)のように K が従属な関係を持つ場合，それぞれ得られた関節変位が互いの目標に影響を及ぼすため，単純に足し合わせて計算を行うことができない．この問題を解決するため，K の従属部分の関係について数値シミュレーションを使った検討を行っている．



(a) Image (b) Calculation Flow

Fig.3 Calculation Model



(a) Subordinate relation (b) Independence relationship

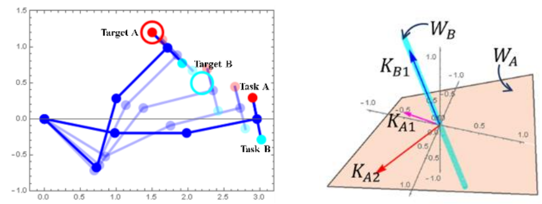
Fig.4 Venn diagram of K in Joint Subspace

3. シミュレーション

2 次元空間で動作する 3 関節の図 3(a)のモデルを対象として数値シミュレーションを行う．その際，タスク点 A と B について求めたK_A，K_Bの条件を以下のように設定し動作を検討した．

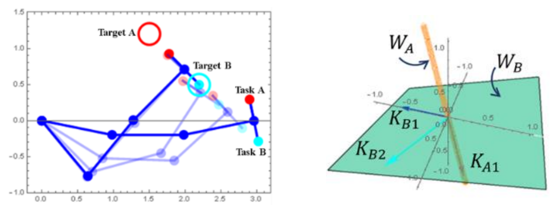
1. $\dim K_A = 2$ ，$\dim K_B = 1$ ，$K_A \perp K_B$
2. $\dim K_A = 1$ ，$\dim K_B = 2$ ，$K_A \perp K_B$

図 5，図 6 に結果を示す．図 5(b)のように，K_Aに 2 自由度，K_Bに 1 自由度使って目標計算を行うと図 5(a)のように目標 A に到達した．これにより，自由度を変えることで，優先度を変更できることが分かった．B も同様に変更できることを確認した．



(a) Operation up to the target point A (b)Joint Space R3 (Target A)

Fig.5 Result of simulation 1



(a) Operation up to the target point B (b) Joint Space R3 (Target B)

Fig.6 Result of simulation 2

4. 結論

複雑構造ロボットの姿勢を効率的に計算する手法として，ヤコビ行列のプレコンディションによる逆運動学計算法を用いた，多関節を有する複雑構造ロボットの姿勢・形状制御のシミュレーションを行い，その有用性の検証を行った．多目標を与えた場合に，本手法の K を変化させることで目標への優先度の変更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適切な K を計算する方法についての検討を行う．

参考文献

[1]Dragomr N. Nenchev, “Redundancy Resolution through Local Optimization: Review”, Journal of Robotics Systems 6(6), pp.770-775(1989).

[2]関段友哉,福丸浩史,林朗弘,原槇真也,佐竹利文,” プレコンディション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