学術論文

冗長自由度を有するマニピュレータの
逆運動学の高速かつ安定な解法

小金澤 鋼 一*

A Fast and Singularity-free Solution of
Inverse Kinematics for Redundant Manipulators

Koichi Koganezawa*

In this paper one deals with the inverse kinematics of serial-link manipulators with redundant DOFs. At first, one proposes a new algorithm to solve the joint rate variables of redundant manipulators in the framework of the weighted generalized inverse of Jacobian. In the proposed algorithm the weights are determined so as to avoid the computational illconditioning during the recursive procedures of computation, which means no off-line task for determining weights is necessary. Some ways of computing the weights are considered and evaluated with respect to condition number in the simulation. The proposed algorithm takes the least additional load to compute the projection operator which projects arbitrary joint rates into the null-space of the end-effector's Cartesian coordinates. It is due to the algorithmic structure of the proposed algorithm in which some variables produced in the process of the generalized inverse of the Jacobian are made use of computing the projection operator. The anthropomorphic type seven DOF manipulator was taken as an example to evaluate the proposed algorithm. Some ways to determine the arbitrary joint rate vectors were considered so as to make the manipulator behave like a human. Simulations also reveal the stable behavior of the manipulator due to the proposed algorithm when the manipulator is indicated to take singular postures.

Key Words: Redundant DOF, Manipulator, Inverse kinematics

1. は じ め に

冗長自由度を有するマニピュレータの運動学に関して数多くの研究成果が報告されている。冗長性を利用して、障害物回避[8]、特異姿勢の回避[14]、エネルギーやトルクの最適化[12][5]などの可能性が報告されている。

これまで提案されてきた、関節変数の軌道を計算する一般的な手法は主に二つに分類される。一つは、非正定ヤコビアン的一般化逆行列と、ヌル空間射影オペレータを計算する方法であり[7][19]、他方はいくつかの拘束式を用いて正定化したヤコビアン逆行列を計算する方法[1][2][4][16]である。いずれの方法においても冗長マニピュレータの巧緻性ある運動を実現するための評価式を組み込むことができる。本研究においては、一般化逆行列および射影オペレータに基礎をおく逆問題の計算手法を主に取り扱う。

マニピュレータの逆運動学の計算には以下の二つの点が要求される。一つは、オンライン計算を可能とするだけの計算スピードであり、もう一つは計算における特異状態を回避できることである。特異状態の回避に関して最も広く用いられ

ている手法は、ヤコビアンと転置ヤコビアン積($\mathbf{J}\mathbf{J}^T$)の対角成分に“ダンピングファクタ”を加え、正則にする方法である[9][13][14][18]。この手法において、ダンピングファクタを一定値とすることは簡便さと高速性の観点からは有効であるが、一般化逆行列のMoor-Penrose条件が満足されなくなる。より正確な手先軌道を実現するためには、マニピュレータの現姿勢がどれだけ特異姿勢に近いかを判断し、ダンピングファクタの値を変化させる必要がある。これは、ヤコビアンを特異値分解(以下、SVD)することによって得られる[10][11]が、SVDの計算量は重く、冗長自由度の数が多くなるに従いオンライン計算が困難になる。このため、パラレルプロセッシングの手法が提案されている[11]が、より高速でかつロバストな手法が求められる。

本論文は冗長自由度を有する直列リンクマニピュレータを扱う。次章においてヤコビアン重み付き一般化逆行列を用いた関節変数の解法の一手法を提案する。提案する手法では、逆行列の再帰計算過程において、計算不能を回避するように重み行列の要素をオンラインで決定する。この決定についてのいくつかの方法をシミュレーションで比較検討する。提案する手法はヌル射影オペレータ算出のための計算量をあまり必要としない。それはヤコビアン逆行列を計算する過程で得られる変数

原稿受付 1997年9月8日

*東海大学工学部

*Faculty of Engineering, Tokai University

をそのまま利用してヌル射影オペレータを計算できるからである。人間型7自由度マニピュレータについてシミュレーションを行った結果について第3章にて詳述する。ヌル射影オペレータに掛ける任意の微小変位ベクトルの決定について、人間の日常作業における上腕の姿勢を模擬するような決定法の提案を行い、シミュレーションで検討する。第4章において結論および考察を述べる。

2. 関節変数ベクトル算出のための再帰アルゴリズム

手先の微小位置変位および微小角変位ベクトル $\dot{\mathbf{x}} = (\omega_e^T \mathbf{p}_e^T)^T \in \mathbf{R}^m$ と関節変数の微小変化ベクトル $\dot{\boldsymbol{\theta}}_n \in \mathbf{R}^n$ が以下の線形方程式で記述されるとする。

$$\mathbf{J}_n \dot{\boldsymbol{\theta}}_n = \dot{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

ここで、ヤコビアン $\mathbf{J}_n \in \mathbf{R}^{m \times n}$ は以下の要素をもつ。

$$\mathbf{J}_n = \begin{pmatrix} \gamma_1 & \cdots & \gamma_n \\ \beta_1 & \cdots & \beta_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

γ_i and β_i , $i = 1 \sim n$ は次式で計算される [19].

$$\begin{cases} \gamma_i = \mathbf{z}_i & \text{for rotational joint,} \\ \beta_i = -\mathbf{z}_i \times \mathbf{t}_i & \\ \gamma_i = \mathbf{0} & \text{for sliding joint,} \\ \beta_i = \mathbf{z}_i & \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{z}_i$ は i 番目の関節の回転軸に平行な単位ベクトルあるいはスライド方向の単位ベクトルであり、 $\mathbf{t}_i$ は i 番目の座標系原点から手先座標系原点までの距離ベクトルである。式 (1) の一般解は以下のようになる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_n = \mathbf{J}_n^\dagger \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{P}^\perp(\mathbf{J}_n) \dot{\boldsymbol{\psi}} = \tilde{\boldsymbol{\theta}}_n + \dot{\mathbf{r}}_n, \quad (4)$$

ここで、 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_n = \mathbf{J}_n^\dagger \dot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{r}}_n = \mathbf{P}^\perp(\mathbf{J}_n) \dot{\boldsymbol{\psi}}$ であり、 $\mathbf{J}_n^\dagger$ は $\mathbf{J}$ の一般化逆行列を表し、以下の重み行列 $\mathbf{D}_n$ を含む式で計算されるとする。

$$\mathbf{J}_n^\dagger = \mathbf{D}_n \mathbf{J}_n^T (\mathbf{J}_n \mathbf{D}_n \mathbf{J}_n^T)^{-1}, \quad (5)$$

また、 $\mathbf{P}^\perp(\mathbf{J}_n)$ は $\mathbf{J}_n$ に関する手先のデカルト座標系へのヌル射影オペレータである。 $\dot{\boldsymbol{\psi}}$ は冗長自由度を利用して任意に設定できる関節変数の微小変位ベクトルであり、マニピュレータの姿勢を特異姿勢からなるべく遠ざけるように設定したり [17]、障害物を回避するように設定する [8] 例などが報告されている。ここで、重み行列 $\mathbf{D}_n$ は簡単のため次のような対角行列に限定する。

$$\mathbf{D}_n = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_n\} \in \mathbf{R}^{n \times n}. \quad (6)$$

m 行 m 列の行列 $\mathbf{H}_\nu$ を次のように定義する。

$$\mathbf{H}_\nu \equiv \mathbf{J}_\nu \mathbf{D}_\nu \mathbf{J}_\nu^T \in \mathbf{R}^{m \times m}, \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{J}_\nu$ は、 $\mathbf{J}_n$ の ν 番目までの列ベクトルをもつ $m \times \nu$ の行列であり、 $\mathbf{D}_\nu \in \mathbf{R}^{\nu \times \nu}$ は $\mathbf{D}_n$ の ν 番目の主対角行列である。

$\mathbf{H}_\nu$ は以下のように再帰式に展開できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_\nu &= (\mathbf{J}_{\nu-1} \mathbf{j}_\nu) \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{\nu-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & d_\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{\nu-1}^T \\ \mathbf{j}_\nu^T \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{J}_{\nu-1} \mathbf{D}_{\nu-1} \mathbf{J}_{\nu-1}^T + d_\nu \mathbf{j}_\nu \mathbf{j}_\nu^T \\ &= \mathbf{H}_{\nu-1} + d_\nu \mathbf{j}_\nu \mathbf{j}_\nu^T. \end{aligned} \quad (8)$$

式 (9) の逆行列はよく知られた逆行列の公式 [15] を用いて次式で計算できる。

$$\mathbf{H}_\nu^{-1} = \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} - \frac{d_\nu \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu \mathbf{j}_\nu^T \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1}}{1 + d_\nu \mathbf{j}_\nu^T \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu} \in \mathbf{R}^{m \times m}. \quad (9)$$

ν 回目の再帰計算で得られるヤコビアン的一般化逆行列は次のように定義できる。

$$\mathbf{J}_\nu^\dagger \equiv \mathbf{D}_\nu \mathbf{J}_\nu^T \mathbf{H}_\nu^{-1} \in \mathbf{R}^{\nu \times m}. \quad (10)$$

これに式 (9) を代入し、 $\mathbf{H}_{\nu-1}^{-1}$ の対称性を考慮して、簡単な操作を行うことにより、次のように展開できる。

$$\mathbf{J}_\nu^\dagger = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{\nu-1}^\dagger - \frac{d_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \boldsymbol{\zeta}_\nu \boldsymbol{\xi}_\nu^T \\ \frac{d_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \boldsymbol{\xi}_\nu^T \end{pmatrix}, \quad (11)$$

上式中の変数は以下のように定義されている。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi}_\nu &= \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu \in \mathbf{R}^m, \\ \boldsymbol{\zeta}_\nu &= \mathbf{J}_{\nu-1}^T \boldsymbol{\xi}_\nu \in \mathbf{R}^{(\nu-1)}, \\ \phi_\nu &= \mathbf{j}_\nu^T \boldsymbol{\xi}_\nu \in \mathbf{R}. \end{aligned} \quad (12)$$

式 (11) は重み行列の ν 番目の対角成分 d_ν をうまく設定することにより、計算不能に陥らずに計算することが可能となる。式 (11) を用いて $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_\nu$ (式 (4) 参照) の ν 番目の更新値を次の再帰式で計算することができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}_\nu = \mathbf{J}_\nu^\dagger \dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{\nu-1} - \frac{d_\nu \chi_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \boldsymbol{\zeta}_\nu \\ \frac{d_\nu \chi_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

ここで、

$$\chi_\nu = \boldsymbol{\xi}_\nu^T \dot{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}. \quad (14)$$

である。

続いて、射影オペレータを計算するための再帰アルゴリズムを導出する。重み付き一般化逆行列に対応する射影オペレータは以下のように定義される。

$$\mathbf{P}(\mathbf{J}_n) = \mathbf{D}_n \mathbf{J}_n^T (\mathbf{J}_n \mathbf{D}_n \mathbf{J}_n^T)^{-1} \mathbf{J}_n \in \mathbf{R}^{n \times n}. \quad (15)$$

前と同様に ν 番目の繰り返し計算で算出される射影オペレータ $\mathbf{P}(\mathbf{J}_\nu) \in \mathbf{R}^{\nu \times \nu}$ が定義でき、式 (9) を導入することにより以下のように再帰式に展開できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\mathbf{J}_\nu) &\equiv \mathbf{D}_\nu \mathbf{J}_\nu^T \mathbf{H}_\nu^{-1} \mathbf{J}_\nu \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{\nu-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & d_\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{\nu-1}^T \\ \mathbf{j}_\nu^T \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} - \frac{d_\nu \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu \mathbf{j}_\nu^T \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1}}{1 + d_\nu \mathbf{j}_\nu^T \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu} \right) (\mathbf{J}_{\nu-1} \quad \mathbf{j}_\nu) \\
&= \begin{pmatrix} \mathbf{P}(\mathbf{J}_{\nu-1}) - \frac{d_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \zeta_\nu \zeta_\nu^T & \frac{1}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \zeta_\nu \\ \frac{d_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \zeta_\nu^T & \frac{d_\nu \phi_\nu}{1 + d_\nu \psi_\nu} \end{pmatrix} \quad (16)
\end{aligned}$$

ベクトル $\dot{\mathbf{r}}_n$ (式 (4)) の ν 回目の再帰計算の結果を $\dot{\mathbf{r}}_\nu$ としたとき, $\dot{\mathbf{r}}_\nu$ は式 (16) を用いて次のように計算できる.

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{r}}_\nu &\equiv \mathbf{P}^\perp(\mathbf{J}_\nu) \dot{\psi}_\nu = (\mathbf{I} - \mathbf{P}(\mathbf{J}_\nu)) \dot{\psi}_\nu \\
&= \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{\nu-1} - \frac{\dot{\psi}_\nu - d_\nu \delta_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \zeta_\nu \\ \frac{\dot{\psi}_\nu - d_\nu \delta_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \end{pmatrix} \quad (17)
\end{aligned}$$

ここで,

$$\delta_\nu = \zeta_\nu^T \dot{\psi}_{\nu-1} \quad (18)$$

であり, $\dot{\psi}_\nu$ は $\dot{\psi}$ の ν 番目までの要素をもつベクトル, $\dot{\psi}_\nu$ は ν 番目の要素である. 式 (17) に現れる他の変数は $\dot{\theta}_\nu$ の計算の際に用いるものと同じである. しかるに式 (17) が要する計算量は非常に少なく済む. 式 (1) の $\dot{\theta}$ を計算するのに要する計算量は以下のとおりである. 比較のためにガウスの消去法を用いて逆行列計算を行った場合, および SVD を用いた場合 [10][11] の計算量も併記する ($m = 6$ としている).

proposed	$\frac{11}{2}n^2 + \frac{185}{2}n - 44,$	873 ($n = 7$)
by Gauss-Jordan	$6n^2 + 63n + 222,$	957 ($n = 7$)
by SVD method	$\frac{5n^3}{2} + 15n^2 + \frac{29}{2}n,$	1820 ($n = 7$)

ここで, n は自由度数である. 提案したアルゴリズムは計算速度の点から従来の手法よりも有利であり, ガウス消去法には匹敵するかそれに勝る計算量であることが分かる.

以上の導出結果をまとめて計算順序でなると以下のようになる.

Algorithm

初期設定: $\mathbf{H}_0^{-1} = c\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{m \times m}$

c は十分大きな値とする.

$\dot{\psi} = (\dot{\psi}_1 \dot{\psi}_2 \cdots \dot{\psi}_n)^T$ を与える.

For($\nu = 1; \nu \leq n; \nu++$) {

$\mathbf{j}_\nu$ が得られる;

$\mathbf{J}_\nu = (\mathbf{J}_{\nu-1} \quad \mathbf{j}_\nu);$

$\xi_\nu = \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} \mathbf{j}_\nu;$

$\zeta_\nu = \mathbf{J}_{\nu-1}^T \xi_\nu;$

$\phi_\nu = \mathbf{j}_\nu^T \xi_\nu;$

$\chi_\nu = \xi_\nu^T \dot{\mathbf{x}};$

$\delta_\nu = \zeta_\nu^T \dot{\psi}_{\nu-1};$

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}_\nu &= \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{\nu-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & d_\nu \end{pmatrix}; \\
\mathbf{H}_\nu^{-1} &= \mathbf{H}_{\nu-1}^{-1} - \frac{d_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \xi_\nu \xi_\nu^T; \\
\tilde{\theta}_\nu &= \begin{pmatrix} \tilde{\theta}_{\nu-1} - \frac{d_\nu \chi_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \zeta_\nu \\ \frac{d_\nu \chi_\nu}{1 + d_\nu \psi_\nu} \end{pmatrix}; \\
\dot{\mathbf{r}}_\nu &= \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{\nu-1} - \frac{\dot{\psi}_\nu - d_\nu \delta_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \mathbf{D}_{\nu-1} \zeta_\nu \\ \frac{\dot{\psi}_\nu - d_\nu \delta_\nu}{1 + d_\nu \phi_\nu} \end{pmatrix}; \\
\dot{\theta}_n &= \tilde{\theta}_n + \dot{\mathbf{r}}_n
\end{aligned}$$

3. シミュレーション

前章で提案したアルゴリズムを検証する目的でシミュレーションを行った. シミュレーションに用いたマニピュレータは Fig. 1 に示す人間と同等の自由度構成をもつ 7 自由度マニピュレータである. リンク長さは以下の通りである.

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_5 = L_7 = 0, \quad L_4 = L_6 = 0.3 \text{ m},$$

(a) DOF disposition

(b) Links length and joints initial angles

Fig. 1 Configuration of anthropomorphic type 7-DOF manipulator

Fig. 2 Condition number and stick diagram when the end-effector moves upward along Z-axis

$L_8 = 0.1 \text{ m}$.

まず始めに、重み行列の対角要素 d_ν , $\nu = 1 \sim n$ (式 (6)) のオンライン決定法について以下に示す三つの方法を検討した。

- (1) $d_\nu = \phi_\nu$,
- (2) $d_\nu = \phi_\nu / \eta_\nu$,
- (3) $d_\nu = \text{sgn}(\phi_\nu)$,

ここで、 $\eta_\nu = \mathbf{j}_\nu^T \mathbf{j}_\nu$ である。また、 $\text{sgn}(\phi_\nu)$ は ϕ_ν の符号 (± 1) を示す。このいずれの方法においても、オンライン決定が可能であり、かつ計算不能を回避できる ([Algorithm] 参照)。評価のための巧緻性指数 (dextrous measure) として $\mathbf{H}_n$ のコンディション数 (condition number, 以下 CN) を計算した。CN は $\mathbf{H}_n$ の固有値 σ_i , $i = 1 \sim m$ を用いて以下で定義される [6]。

$$CN = \frac{\max\{\sigma_i | i = 1 \sim m\}}{\min\{\sigma_i | i = 1 \sim m\}}$$

CN が小さい値を示すほど、マニピュレータが特異姿勢から遠い状態にあり、あらゆる方向における手先の移動ならびに回転の可動性があることを示す。

初期関節角度が、

Fig. 3 Condition number and stick diagram when the end-effector rotates about Z-axis

$\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = \theta_6 = 0$,

$\theta_2 = -\pi/3$, $\theta_4 = 7\pi/12$, $\theta_7 = -\pi/4$

の姿勢から手先を z-軸正方向 (垂直上方) に 20 [cm] (1 回の微小変位を 1 [cm] として 20 回) 移動させたときの CN の変化およびマニピュレータのスティック線図を Fig. 2 に示す。また、z-軸まわりに $\pi/4$ [rad] (1 回の微小角度変化を $\pi/80$ として 20 回) 回転させたときの CN の変化およびマニピュレータのスティック線図を Fig. 3 に示す。Fig. 2 および Fig. 3 に示した動き以外のあらゆる動作における CN の変化も、第 3 の方法 ($d_\nu = \text{sgn}(\phi_\nu)$) が有利であることを示したので、以後のシミュレーションにおいては、第 3 の方法により重み行列を決定することとした。

続いて、冗長性を利用するための任意に設定可能なベクトル $\dot{\psi}_n$ を設定するための試みを行った。日常の動作において、人間の upper limb (7 自由度) に存在する一つの冗長自由度は次のように利用されていると考えられる。指および手における複雑かつ微細な作業をやすくするために、手首関節角度をできるだけゼロに近いように上腕の関節角度を操作している。しかしながら、この指標のみでは、肩の関節角度が大きくなり、腕全体の

Fig. 4 Stick diagrams when the end-effector rotates $\pi/2$ about z-axis

位置ポテンシャルが上がる可能性がある。したがって、冗長自由度を拘束するスカラー量として次の相反するポテンシャルの和を考える。

$$E = (\text{手首 2 関節角度の二次形式}) \\ + (\text{腕全体の位置エネルギー})$$

第 1 項は、Fig. 1 の 7 自由度マニピュレータにおいては、 $(\mathbf{i}_6 - \mathbf{i}_8)^T(\mathbf{i}_6 - \mathbf{i}_8)$ となる。ここで $\mathbf{i}_6$ および $\mathbf{i}_8$ は、それぞれ前腕および手の長手方向の単位ベクトルである。また、第 2 項は、腕全体の位置エネルギーを計算する代わりに肘位置の垂直方向成分 $\mathbf{p}_{4z}$ で代表できると考える。以上よりポテンシャル E を次式により定義する。

$$E = (\mathbf{i}_6 - \mathbf{i}_8)^T(\mathbf{i}_6 - \mathbf{i}_8) + g_1 \mathbf{p}_{4z} \quad (19)$$

ここで、 g_1 は定数である。 $\dot{\psi}$ は次のように計算される。

$$\dot{\psi} = -g_0 \left(\frac{\partial E}{\partial \theta} \right)^T \quad (20)$$

ここで、 g_0 は定数である。

Fig. 4 に手先を z-軸まわりに $\pi/2$ [rad] (1 回の微小角度変化を $\pi/60$ として 30 回) 回転させたときのスティック線図を示す。Fig. 4(a) は $g_0 = g_1 = 0$ の場合である。この場合、手首関節角度はかなり大きな値となり、肘の位置は下に下がっている。Fig. 4(b) は $g_0 = 0.19$ の場合である。手首 2 関節の角度は小さくなり、それに対応して肘位置が上昇している。Fig. 4(c) および (d) は g_1 を変化させた場合である。 g_1 の値を大きくするほど肘位置が下がることが分かる。

Fig. 5 に手先を y-軸方向に -30 [cm] 移動させたときのスティック線図を示す。Fig. 5(a) は $g_0 = 0$ の場合、Fig. 5(b) は $g_0 = 0.19$ の場合である。Fig. 5(b) の場合手首関節角度が小さくなり、そのため手首の可動範囲が広がることが期待される。

最後に、提案したアルゴリズムの安定性について、シミュレーションで確認した。Fig. 6(a) 手先を y-軸方向に -60 [cm] 移動するよう指示した場合、Fig. 6(b) は z-軸方向に 70 [cm] 移動するよう指示した場合で、いずれもマニピュレータに与えた初期姿勢とリンク寸法では不可能な動きであり、従来の逆行列

Fig. 5 Stick diagrams when the end-effector moves -30 [cm] along y-axis

Fig. 6 Stick diagrams when the end-effector is indicated to take the singular posture

計算では計算不能に陥るケースである。提案したアルゴリズムにおいては計算不能はあり得ず、図に示すように特異姿勢を指示しても、姿勢限界において安定した姿勢を保つことが分かる。

4. 結 論

本論文において、冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動学解法のための新しい手法を提案した。この手法の特徴を以

下に挙げる。

- (1) 従来の逆行列計算の手法に比べ高速である。
- (2) 計算過程において計算不能に落ちることはありえず、その特異状態を避けるために導入する重み行列は計算過程でオンラインで決定される。

7自由度を有する人間型マニピュレータについてシミュレーションを行い、提案したアルゴリズムを検証した。人間が手作

業を行う際、一つの冗長自由度を利用してより手作業がしやすい姿勢をとっていると考え、この姿勢を実現するためのポテンシャル関数を提案し、任意に設定できる速度ベクトル $\dot{\psi}_n$ を決定した。提案したアルゴリズムはマニピュレータに特異姿勢を指示した場合においても、計算不能に陥らず、マニピュレータは姿勢限界付近で安定した姿勢を保つことが分かった。

参 考 文 献

- [1] J. Baillieul: "Kinematic programming alternatives for redundant manipulators," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automat., St. Louis, MO, pp.722-728, 1985.
- [2] R. Colbaugh and K. Glass: "Cartesian control of redundant robots," J. of Robotic Systems, vol.6, no.4, pp.427-459, 1989.
- [3] K.L. Doty, C. Melchiorri and C. Bonivento: "A theory of Generalized Inverses Applied to Robotics," Int. J. of Robotics Res., vol.12, no.1, pp.1-19, 1993.
- [4] O. Egeland: "Task-space tracking with redundant manipulators," IEEE J. of Robotics and Automat., vol.RA-3, no.5, pp.471-475, 1987.
- [5] J.M. Hollerbach and K.C. Suh: "Redundancy resolution of manipulators through torque optimization," IEEE J. of Robotics and Automat., vol.RA-3, no.4, pp.308-316, 1987.
- [6] C.A. Klein and B.E. Blaho: "Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators," The Int. J. of Robotics Res., vol.6, no.2, pp.72-84, 1987.
- [7] Liégeois: "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern., vol.SMC-7, no.12, pp.868-871, 1977.
- [8] A.A. Maciejewski and C.A. Klein: "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environment," The Int. J. of Robotics Res., vol.4, no.3, pp.109-117, 1985.
- [9] A.A. Maciejewski and C.A. Klein: "Numerical filtering for the operation of robotic manipulators through kinematically singular configurations," J. of Robotics Systems, vol.5, no.6, pp.527-552, 1988.
- [10] A.A. Maciejewski and C.A. Klein: "The singular value decomposition: Computation and application to robotics," The Int. J. of Robotics Res., vol.8, no.6, pp.63-79, 1989.
- [11] A.A. Maciejewski and J.M. Reagin: "A parallel algorithm and architecture for the control of kinematically redundant manipulators," IEEE Trans. on Robot. and Autom., vol.10, no.4, pp.405-414, 1994.
- [12] D.P. Martin, J. Baillieul and J.M. Hollerbach: "Resolution of kinematic redundancy using optimization technique," IEEE Trans. on Robotics and Automat., vol.RA-5, no.4, pp.529-533, 1989.
- [13] Mayorga, R.V., N. Milano and A.K.C. Wong: "A fast procedure for manipulator inverse kinematics computation and singularity prevention," J. of Robotic Systems, vol.10, no.1, pp.45-72, 1993.
- [14] Y. Nakamura and H. Hanafusa: "Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control," J. of Dynamic Systems, Meas., and Contr., vol.108, pp.163-171, 1986.
- [15] B. Noble: "Applied Linear Algebra," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.
- [16] H. Seraji: "Configuration control of redundant manipulators: Theory and implementation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.4, pp.472-490, 1989.
- [17] I.D. Walker and S.I. Marcus: "Subtask performance by redundancy resolution for redundant robot manipulators," IEEE J. of Robotics and Automation, vol.4, no.3, pp.350-354, 1988.
- [18] C.W. Wampler: "Manipulator inverse kinematics solutions based on vector formulations and damped least-squares methods," IEEE Trans. on System, Man and Cybern., vol.SMC-16, no.1, pp.93-101, 1986.
- [19] Whitney: "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," IEEE Trans. Man-Machine Systems, vol.10, no.47-53, 1969.

小金澤 鋼一 (Koichi Koganezawa)

1956年7月21日生。早稲田大学大学院博士後期課程修了，1987年いわき明星大学講師，1991年東海大学講師，1992年助教授，現在に至る。ロボットの運動学，歩行ロボット，剛性調節可能なマニピュレータの研究等に従事。計測自動制御学会，バイオメカニズム学会会員。（日本ロボット学会正会員）