学術・技術論文

関節の可動範囲を考慮に入れた7自由度冗長マニピュレータの 解析的逆運動学解法

清 水 昌 幸*¹ 角 谷 啓*² 尹 祐 根*¹ 北 垣 高 成*¹ 小 菅 一 弘*³

Analytical Inverse Kinematics for 7 DOF Redundant Manipulators with Joint Limits

Masayuki Shimizu*1, Hiromu Kakuya*2, Woo-Keun Yoon*1, Kosei Kitagaki*1 and Kazuhiro Kosuge*3

This paper addresses the inverse kinematic problem for 7 DOF anthropomorphic manipulators with joint limits. Specifically, the paper analyzes how the joint limits restrict the redundancy to develop practical inverse kinematic resolutions under the joint limits. First, the manipulator model considered in this paper is provided. Second, how to solve the inverse kinematics of the redundant manipulator is described. Third, how joint limits affect the inverse kinematic solutions is investigated. Forth, several suggestions for resolving redundancy under the joint limits are presented. Lastly, the effectiveness of the redundancy resolutions is illustrated by simulation results.

Key Words: Redundant Manipulator, Inverse Kinematics, Joint Limit, Arm Angle, Redundancy Resolution

1. はじめに

作業に必要な自由度より多くの自由度を有する冗長マニピュレータは、その余分な自由度を有効に利用することにより、ロボットの機能性の向上や多様な作業の実現などが可能となるため、近年、ロボット研究の分野においては、広く用いられるようになってきている.

冗長マニピュレータを用いて作業を行う場合,作業により手先の位置および姿勢が拘束されたとしても,関節の変位は一意には定まらず,無数の解が存在する。そのため,実際に制御する際は,何らかの方法で関節変位を一意に定める必要がある.指定された手先位置・姿勢を満たす関節変位集合の中からただ一つの関節変位の組み合わせを選択する問題は,redundancy resolution と呼ばれており,従来から,この問題に対する様々なアプローチが提案されてきている.

これまでに提案されてきた冗長問題に対する解法としては、 ある瞬間における関節速度と手先速度の関係(ヤコビアン)に 基づいた評価関数を(その瞬間において)最適化することによ り、関節速度を一意に定めるというものが多い[1]. 最適化する 評価関数を適切に選択することにより、可操作性の向上[2],関節トルクの最適化[3][4],障害物回避[5][6],特異点回避[7][8],関節限界の回避[9][10]など様々なサブタスクを実現できることが示されている。しかしながら、このアプローチでは、ヤコビアンを用いているため、軌道追従誤差が大きくなる傾向があり、手先に閉じた軌道を追従させた場合、再現性が保証されないといった問題が指摘されている[4].この問題に対処するため、ある瞬間における局所的な評価関数ではなく、それを積分した大域的な評価関数を用いることにより、軌道追従特性を向上させる研究も行われている[4][11]が、根本的な問題として、ヤコビアンを用いたアプローチでは、関節速度解しか求められないため、絶対位置の精度は保証されないことになる[12].

これに対して、関節変位空間(コンフィグレーション空間)における冗長問題の解法がいくつか提案されている。Lee と Bejczyは、冗長自由度をパラメータとして含む逆運動学問題を解き、そのパラメータを含む適切な評価関数を最適化する手法を提案した[13]. Seraji らも同様の手法を提案している[14]が、冗長自由度のパラメータ化の手法が異なる。Asfour と Dillmann は、人間の腕と同様の運動を実現するために、人間の上腕の姿勢を表すパラメータを用いて逆運動学計算を行い、そのパラメータを人間の腕の運動から得られた実測値とする手法を示した[15].これらの手法では、冗長問題が大域的コンフィグレーション空間で解かれるため、速度空間の場合と異なり、手先の位置・姿勢の精度や再現性が保証されるという利点がある。

本論文では、冗長マニピュレータの手先位置・姿勢を PTP (Point To Point) 制御することを考える. この場合, 手先の目

原稿受付 2006 年 8 月 14 日

^{*1}産業技術総合研究所

^{*2}株式会社日立製作所

^{*3}東北大学

^{*}¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2}Hitachi, Ltd.

^{*3}Tohoku University

標位置・姿勢を実現するための目標関節変位を陽に求める必要 があるため、コンフィグレーション空間で冗長問題を解く必要 がある. しかしながら、これまでに提案されてきたコンフィグ レーション空間での冗長問題の解法 [13]~[15] では、関節制限の 問題[16]には対処できないという難点がある。実在のマニピュ レータでは, 各関節の可動範囲は, 機構的な制約のために, あ る有限の範囲に限定される場合が多い. また, マニピュレータ の可動範囲内に障害物がある場合や, ヒューマノイドロボット のようにマニピュレータとボディとの自己衝突が起こり得る場 合など, 各関節の許容変位が周囲の環境によって制限される場 合もある. このように、関節変位に制限が課せられる場合、冗 長問題の解として得られた関節変位が実現不可能な場合がある が、これまでの手法ではその問題は考えられていない。したがっ て, 関節制限および目標手先位置・姿勢を同時に満たす実現可 能な関節変位を求めるためには、関節制限を陽に考慮に入れて 冗長問題を解かなければならない.

本論文では、関節の可動範囲を考慮に入れた7自由度冗長マニピュレータの解析的逆運動学解法を提案する。本論文では、指定された目標手先位置・姿勢を実現する関節変位集合の内、可動範囲内に属するすべての関節変位集合を求めることを目的とし、大域的なコンフィグレーション空間における関節制限付きの逆運動学問題を解析的に解くための手法を提案する。本論文で提案する手法を用いることによって、関節制限および目標手先位置・姿勢を満たしつつ、ある評価関数を最適化する関節変位解を求めるといったことが可能になる。本手法の利点としては、以下が挙げられる。

- (1) 手先の絶対位置・姿勢の精度や再現性が保証される.
- (2) 関節変位が閉じた形での解析解として与えられるため、逆 運動学計算における計算負荷が小さい.
- (3) 条件を満たす関節変位解が複数存在する場合でも、すべての解を求めることができる.

本論文の構成は以下の通りである。初めに、第2章において、本論文で扱う7自由度マニピュレータについて説明する。次に、第3章で、7自由度マニピュレータの逆運動学解を導出する。その後、第4章において、関節制限によって冗長自由度がどのような制限を受けるかを解析し、関節制限を満たす実現可能な逆運動学解を求める手法を示す。第5章では、提案した手法に基づいた冗長自由度の利用例を示す。最後に、第6章において、本手法の有用性をシミュレーションにより確認する。

2. 7自由度マニピュレータ

初めに、本論文で扱うマニピュレータの機構モデルについて説明する。本論文では、 $\mathbf{Fig.1}$ に示すような $\mathbf{7}$ 自由度マニピュレータを考える。このマニピュレータの関節は、すべて回転関節で構成されており、肩部の三関節(第 $\mathbf{1} \sim \mathbf{3}$ 関節)の関節軸と手首部の三関節(第 $\mathbf{5} \sim \mathbf{7}$ 関節)の関節軸はそれぞれ一点で交差し、また、隣接する関節の関節軸が互いに直交する構造となっている。このような単純な構造のために、肩部三関節と手首部三関節はそれぞれ仮想的な球面機構を構成しているとみなすことができるため、この種のマニピュレータは、 $\mathbf{3R-1R-3R}$ または $\mathbf{S-R-S}$ 型マニピュレータとして分類されている [17] [18]。こ

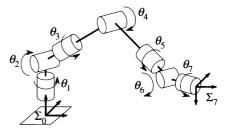


Fig. 1 7 DOF manipulator model

Table 1 D-H parameters of 7 DOF manipulator model

i	θ_i	$lpha_i [{ m rad}]$	d_i	a_i
1	θ_1	$-\pi/2$	d_{bs}	0
2	θ_2	$\pi/2$	0	0
3	θ_3	$-\pi/2$	d_{se}	0
4	θ_4	$\pi/2$	0	0
5	θ_5	$-\pi/2$	d_{ew}	0
6	θ_6	$\pi/2$	0	0
7	θ_7	0	d_{wt}	0

のマニピュレータのリンクパラメータは、Denavit-Hartenberg 表記法 [19] を用いると、**Table 1** のように表すことができる。なお、一般に、Denavit-Hartenberg 表記法は一意ではないため、Fig. 1 の機構を表すリンクパラメータとして Table 1 の表記は唯一ではなく、異なる表記も可能であることに注意されたい.

次に、本論文中で使用する座標系の定義について説明する. 最初に、空間に固定された絶対座標系として Σ_0 を Fig.1 に示すように定める. 次に、各関節に対して固定された座標系 Σ_i $(i=1,2,\cdots,6)$ を Denavit-Hartenberg 記法に則って定める. すなわち、座標系 Σ_i の原点は、関節軸 i および i+1 の共通法線と関節軸 i+1 との交点に一致させ、その座標軸の方向は、 x_i 軸はその共通法線と一致、 z_i 軸は関節軸 i+1 と一致するように定める. 最後に、一番先端の関節 7 に対して固定された座標系 Σ_7 を定める. このとき、 Σ_7 の原点はマニピュレータの手先と一致し、座標軸の向きは、すべての関節変位 θ_i $(i=1,2,\cdots,7)$ が零になったときに絶対座標系 Σ_0 の座標軸と一致するようにとる. このように座標系を定義することによって、マニピュレータの手先位置・姿勢は、座標系 Σ_0 から見た座標系 Σ_7 の位置・姿勢として記述することができる.

3. 逆 運 動 学

本章では、S-R-S型7自由度マニピュレータの逆運動学解析を行う。初めに、冗長自由度を表現するためのパラメータについて説明する。次に、そのパラメータを用いた運動学式を導出する。最後に、指定された手先位置・姿勢を実現する関節変位の計算手法を示す。

3.1 冗長自由度の表現

空間内におけるマニピュレータの手先の位置・姿勢は六つのパラメータで一意に表現できるため、7自由度マニピュレータでは、余分な自由度が一つ存在する。この冗長自由度のために、7自由度マニピュレータでは、手先位置・姿勢に影響を及ぼさない機構内部における1自由度のセルフモーションが可能である。したがって、セルフモーションを含めた7自由度マニピュ

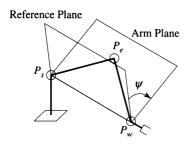


Fig. 2 Definition of arm angle ψ

レータの運動学を解析するためには、この冗長自由度を表現するためのパラメータを導入する必要がある.

冗長自由度のパラメータ化の手法はこれまでにもいくつか提案されてきている. Lee と Bejczy [13] は、冗長自由度の数の分だけの関節を冗長関節として選択し、その関節変位を冗長パラメータとする方法を提案している. しかしながら、この方法では、どのように冗長関節を選択するかが問題となる. また、この場合、冗長パラメータとセルフモーションとの関係も複雑になるため、セルフモーションの解析には不向きであると考えられる. これに対して、Kreutz-Delgadoら [17] は、"アームアングル"というパラメータを提案している. アームアングルは、7自由度マニピュレータのセルフモーションを直接的に記述するパラメータであり、セルフモーションの解析に最適であると考えられる. 本論文でも、このアームアングルを冗長自由度を表すパラメータとして用いることにする.

アームアングル ψ は、 $\mathbf{Fig.2}$ に示すように、肩部三関節の交点 P_w の三点を通る平面とその参照面との間の角度として定義される。このアームアングル表記法における問題としては、アームアングルの参照面が不定になる場合があることである。これは、 \mathbf{Kreutz} -Delgadoらの方法では、参照面を形成するベクトルとしてある固定ベクトルを用いているために起きる現象である。このアルゴリズミックな特異点を回避するために、本論文では、アームアングルの参照面を以下のように定めることにする。

本論文で考える7自由度マニピュレータは、第3関節を固定することにより、非冗長マニピュレータとみなすことができる、いま、第2関節の軸方向と第4関節の軸方向が一致するときの第3関節の変位を θ_3^o とする。この機構の特性上、第3関節変位をこのように固定した場合でも、可動範囲内の任意の手先位置・姿勢を実現する関節変位が存在する。この場合、元の7自由度マニピュレータとは異なり、セルフモーションは存在しないため、肩-H-手首により形成される面は固定面となり、不定になることはない。したがって、この面を参照面とすることにより、参照面が不定となる問題を回避することができる。以下、本論文では、 $\theta_3 = \theta_3^o$ となる場合に、肩-H-+首により形成される面を参照面として利用することにする。

3.2 アームアングルを用いた運動学の定式化

マニピュレータの手先位置・姿勢は、絶対座標系 Σ_0 から見た手先座標系 Σ_7 の位置・姿勢として表すことができる。いま、絶対座標系から見た手先座標系の原点位置を ${}^0x_7 \in \Re^3$ 、姿勢を ${}^0R_7 \in SO(3)$ とすると、通常の順運動学解析より、次の関係式

が得られる.

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7} = {}^{0}\boldsymbol{l}_{bs} + {}^{0}\boldsymbol{R}_{3} \left\{ {}^{3}\boldsymbol{l}_{se} + {}^{3}\boldsymbol{R}_{4} \left({}^{4}\boldsymbol{l}_{ew} + {}^{4}\boldsymbol{R}_{7}{}^{7}\boldsymbol{l}_{wt} \right) \right\}$$
(1)

$${}^{0}\mathbf{R}_{7} = {}^{0}\mathbf{R}_{3}{}^{3}\mathbf{R}_{4}{}^{4}\mathbf{R}_{7} \tag{2}$$

ここで、各ベクトルまたは行列の左上の添字は、そのベクトルまたは行列の基準となる座標系を表すものであり、 ${}^{i}\mathbf{R}_{j} \in SO(3)$ は、座標系 Σ_{i} から見た座標系 Σ_{j} の姿勢を表す回転行列である。前章で示した定義に基づくと、座標系 Σ_{i-1} と Σ_{i} との間の回転行列 ${}^{i-1}\mathbf{R}_{i}$ $(i=1,2,\cdots,7)$ は、次式のように求められる。

$${}^{i-1}\mathbf{R}_{i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i} & -\sin\theta_{i}\cos\alpha_{i} & \sin\theta_{i}\sin\alpha_{i} \\ \sin\theta_{i} & \cos\theta_{i}\cos\alpha_{i} & -\cos\theta_{i}\sin\alpha_{i} \\ 0 & \sin\alpha_{i} & \cos\alpha_{i} \end{bmatrix}$$

$$(3)$$

また、 $\mathbf{l}_{bs} \in \Re^3$ 、 $\mathbf{l}_{se} \in \Re^3$ 、 $\mathbf{l}_{ew} \in \Re^3$ 、および $\mathbf{l}_{wt} \in \Re^3$ は、それぞれ、絶対座標系原点から肩位置までのベクトル、肩位置から肘位置までのベクトル、肘位置から手首位置までのベクトル、および手首位置から手先位置までのベクトルであり、以下で与えられる。

$$egin{aligned} & \mathbf{l}_{bs} = \left[egin{array}{cccc} 0 & 0 & d_{bs} \end{array}
ight]^T \ & \mathbf{l}_{se} = \left[egin{array}{cccc} 0 & -d_{se} & 0 \end{array}
ight]^T \ & \mathbf{l}_{ew} = \left[egin{array}{cccc} 0 & 0 & d_{ew} \end{array}
ight]^T \ & \mathbf{l}_{wt} = \left[egin{array}{cccc} 0 & 0 & d_{wt} \end{array}
ight]^T \end{aligned}$$

次に、上記の運動学式にアームアングルを導入し、関節変位と手先位置・姿勢およびアームアングルとの関係式を導出する。 手先位置・姿勢が指定された場合、 $^{0}x_{7}$ および $^{0}R_{7}$ は一定となるため、式(1)より得られる次のベクトル、

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{sw} \equiv {}^{0}\boldsymbol{x}_{7} - {}^{0}\boldsymbol{l}_{bs} - {}^{0}\boldsymbol{R}_{7}{}^{7}\boldsymbol{l}_{wt} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{3} \left({}^{3}\boldsymbol{l}_{se} + {}^{3}\boldsymbol{R}_{4}{}^{4}\boldsymbol{l}_{ew}\right)$$
(4)

は固定ベクトルとなる。式(4)の右辺は、肩から手首までの位置ベクトルに相当するため、手先位置・姿勢が固定された場合、肩と手首とを結ぶ軸は固定となることが分かる。アームアングルは、この固定軸回りの回転変位として定義されるため、その変位は手首位置には変化を及ぼさないが、手首位置における姿勢には変化を及ぼす。いま、アームアングルが零のときの手首位置での姿勢を \mathbf{R}_4^o \in SO(3)とすると、アームアングルの変位が ϕ のときの手首位置での姿勢は、次のように表せる。

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{4} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{\psi}{}^{0}\boldsymbol{R}_{4}^{o} \tag{5}$$

ここで、 ${}^{0}\mathbf{R}_{\psi} \in SO(3)$ は、 \mathbf{R} -手首軸回りに角度 ψ だけ回転させたときの回転行列を表し、それは次式で与えられる。

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{\psi} = \boldsymbol{I}_{3} + \sin\psi \left[{}^{0}\boldsymbol{u}_{sw} \times \right] + (1 - \cos\psi) \left[{}^{0}\boldsymbol{u}_{sw} \times \right]^{2}$$

$$(6)$$

ここで、 ${}^{0}\boldsymbol{u}_{sw} \in \Re^{3}$ は、式(4)で与えられるベクトル ${}^{0}\boldsymbol{x}_{sw}$ の単位方向ベクトル、 $\left[{}^{0}\boldsymbol{u}_{sw} \times \right] \in \Re^{3\times3}$ は、単位方向ベクトル ${}^{0}\boldsymbol{u}_{sw}$ の外積演算を与える歪対称行列である.

先に述べたように、本論文では、アームアングルの参照面を $\theta_3 = \theta_3^\circ$ のときに肩-肘-手首が張る平面としている。このときの 肩から手首までのベクトルは、式(4) より、

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{sw} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{2} \left({}^{2}\boldsymbol{R}_{3}|_{\theta_{s}^{g}} \right) \left({}^{3}\boldsymbol{l}_{se} + {}^{3}\boldsymbol{R}_{4}{}^{4}\boldsymbol{l}_{ew} \right)$$
(7)

と表せる。この関係式より、 $\theta_3=\theta_3^\circ$ のときの θ_1° 、 θ_2° および θ_4° を求めることができ、これらの値より、 $\psi=0$ のときの手首位置での姿勢 \mathbf{R}_4° が定められる。また、式 (4) および式 (7) より、 θ_4 の値は θ_3 の値によらず一定となることが分かる。なぜなら、式 (4) および式 (7) より、

$$egin{aligned} & {}^{0}oldsymbol{R}_{3}\left({}^{3}oldsymbol{l}_{se}+{}^{3}oldsymbol{R}_{4}{}^{4}oldsymbol{l}_{ew}
ight) \ &=\left({}^{0}oldsymbol{R}_{1}|_{ heta_{0}^{o}}
ight)\left({}^{1}oldsymbol{R}_{2}|_{ heta_{2}^{o}}
ight)\left({}^{2}oldsymbol{R}_{3}|_{ heta_{3}^{o}}
ight)\left\{{}^{3}oldsymbol{l}_{se}+\left({}^{3}oldsymbol{R}_{4}|_{ heta_{4}^{o}}
ight){}^{4}oldsymbol{l}_{ew}
ight\} \end{aligned}$$

の関係が成り立つが、両辺のノルムの二乗和を計算すると、

$${}^{3}\boldsymbol{l}_{se}^{T}{}^{3}\boldsymbol{R}_{4}{}^{4}\boldsymbol{l}_{ew}={}^{3}\boldsymbol{l}_{se}^{T}\left({}^{3}\boldsymbol{R}_{4}|_{\theta_{4}^{o}}
ight){}^{4}\boldsymbol{l}_{ew}$$

となり、これを満たすためには、 $\theta_4 = \theta_4^\circ$ でなければならないためである. したがって、式(5)より、次式が得られる.

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{3} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{w}{}^{0}\boldsymbol{R}_{3}^{o} \tag{8}$$

以上の結果を用いると、アームアングルを用いた運動学は、式 (8) を式 (1) および式 (2) に代入することにより、以下のように表すことができる.

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7} = {}^{0}\boldsymbol{l}_{bs} + {}^{0}\boldsymbol{R}_{\psi}{}^{0}\boldsymbol{R}_{3}^{o} \left\{ {}^{3}\boldsymbol{l}_{se} + {}^{3}\boldsymbol{R}_{4} \left({}^{4}\boldsymbol{l}_{ew} + {}^{4}\boldsymbol{R}_{7}{}^{7}\boldsymbol{l}_{wt} \right) \right\}$$
(9)

$${}^{0}\mathbf{R}_{7} = {}^{0}\mathbf{R}_{\psi}{}^{0}\mathbf{R}_{3}{}^{o}{}^{3}\mathbf{R}_{4}{}^{4}\mathbf{R}_{7} \tag{10}$$

3.3 関節変位の計算

次に、指定された手先位置・姿勢を満たす関節変位を計算することを考える。いま、マニピュレータの目標手先位置・姿勢が $\mathbf{x}_7^q \in \mathbb{R}^3$ および $\mathbf{R}_7^q \in SO(3)$ で指定されたとする。前節の解析結果を基にすると、各関節変位は以下の手順で計算できる。

(1) 肘関節変位 (θ4) の計算

初めに、肩から手首までのベクトル $^0x_{sw}$ を次式より計算する.

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{sw} = {}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d} - {}^{0}\boldsymbol{l}_{bs} - {}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d} {}^{7}\boldsymbol{l}_{wt}$$

式(4)の両辺のノルムの二乗和を計算すると、

$$\left\| {^0}\boldsymbol{x}_{sw} \right\|^2 = \left\| {^3}\boldsymbol{l}_{se} \right\|^2 + \left\| {^4}\boldsymbol{l}_{ew} \right\|^2 + 2\left({^3}\boldsymbol{l}_{se}^{T~3}\boldsymbol{R}_4{^4}\boldsymbol{l}_{ew} \right)$$

となるため、 肘関節変位は次式より求めることができる.

$$\cos \theta_4 = \frac{\|{}^0 \boldsymbol{x}_{sw}\|^2 - d_{se}^2 - d_{ew}^2}{2d_{se}d_{ew}}$$
(11)

(2) 肩関節変位 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ の計算

初めに、アーム平面が参照面に一致する場合の肩関節変位を計算する。 リンクパラメータが Table 1 で与えられる場合、 $\theta_3=0$ のときがアームアングルの参照面に相当するため、式 (7) に $\theta_3^{\alpha}=0$ を代入することにより、

$${}^{0}oldsymbol{x}_{sw}={}^{0}oldsymbol{R}_{1}^{o}\,{}^{1}oldsymbol{R}_{2}^{o}\left(\left.^{2}oldsymbol{R}_{3}
ight|_{ heta_{3}=0}
ight)\left(^{3}oldsymbol{l}_{se}+{}^{3}oldsymbol{R}_{4}^{4}oldsymbol{l}_{ew}
ight)$$

の関係式が得られる。すでに、 ${}^{0}x_{sw}$ および θ_{4} が求められているため、上式より θ_{1}^{o} および θ_{2}^{o} を求めることができる。 次に、アームアングルが ψ のときの肩関節変位を計算する。式 (6) および式 (8) より、以下の関係式が得られる。

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{3} = \boldsymbol{A}_{s} \sin \psi + \boldsymbol{B}_{s} \cos \psi + \boldsymbol{C}_{s} \tag{12}$$

ここで、 $\mathbf{A}_s \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $\mathbf{B}_s \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ および $\mathbf{C}_s \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は、それぞれ次式で与えられる定数行列である。

$$egin{aligned} oldsymbol{A}_s &= \left[egin{aligned} oldsymbol{u}_{sw} imes
ight] oldsymbol{^0} oldsymbol{R}_3^o \ oldsymbol{B}_s &= -\left[oldsymbol{^0} oldsymbol{u}_{sw}
ight] oldsymbol{^0} oldsymbol{R}_3^o \ oldsymbol{C}_s &= \left[oldsymbol{^0} oldsymbol{u}_{sw}
ight] oldsymbol{^0} oldsymbol{R}_3^o \end{aligned}$$

Table 1 の値を用いて ${}^{0}\mathbf{R}_{3}$ を計算すると,

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{3} = \begin{bmatrix} - & -\cos\theta_{1}\sin\theta_{2} & - \\ - & -\sin\theta_{1}\sin\theta_{2} & - \\ -\sin\theta_{2}\cos\theta_{3} & -\cos\theta_{2} & \sin\theta_{2}\sin\theta_{3} \end{bmatrix}$$

となる. ここで、- で示されている成分は不要なため省略した. この行列を式 (12) に代入することにより、肩関節の変位は、アームアングル ψ をパラメータとして、以下のように表せる.

$$\tan \theta_1 = \frac{-a_{s22} \sin \psi - b_{s22} \cos \psi - c_{s22}}{-a_{s12} \sin \psi - b_{s12} \cos \psi - c_{s12}}$$
(13)

$$\cos \theta_2 = -a_{s32} \sin \psi - b_{s32} \cos \psi - c_{s32}$$
(14)

$$\tan \theta_3 = \frac{a_{s33} \sin \psi + b_{s33} \cos \psi + c_{s33}}{-a_{s31} \sin \psi - b_{s31} \cos \psi - c_{s31}}$$
(15)

ここで、 a_{sij} 、 b_{sij} および c_{sij} は、それぞれ行列 \boldsymbol{A}_s 、 \boldsymbol{B}_s および \boldsymbol{C}_s の (i,j) 成分を表す.

(3) 手首関節変位 $(\theta_5, \theta_6, \theta_7)$ の計算式 (2) より,以下の関係式が得られる.

$${}^{4}\mathbf{R}_{7} = {}^{3}\mathbf{R}_{4}^{T} {}^{0}\mathbf{R}_{3}^{T} {}^{0}\mathbf{R}_{7}^{d}$$

これに式(12)を代入すると、次のようになる.

$${}^{4}\boldsymbol{R}_{7} = \boldsymbol{A}_{w}\sin\psi + \boldsymbol{B}_{w}\cos\psi + \boldsymbol{C}_{w} \qquad (16)$$

ここで、 $\mathbf{A}_w \in \Re^{3 \times 3}$ 、 $\mathbf{B}_w \in \Re^{3 \times 3}$ および $\mathbf{C}_w \in \Re^{3 \times 3}$ は、それぞれ次式で与えられる定数行列である。

$$\boldsymbol{A}_w = {}^{3}\boldsymbol{R}_{4}^{T}\,\boldsymbol{A}_{8}^{T\,0}\boldsymbol{R}_{7}^{d}$$

$$oldsymbol{B}_w = {}^3 oldsymbol{R}_4^T \, oldsymbol{B}_s^{T \, 0} oldsymbol{R}_7^d \ oldsymbol{C}_w = {}^3 oldsymbol{R}_4^T \, oldsymbol{C}_s^{T \, 0} oldsymbol{R}_7^d$$

Table 1 の値を用いて ${}^4\mathbf{R}_7$ を計算すると、

$${}^{4}\mathbf{R}_{7} = \begin{bmatrix} - & - & \cos\theta_{5}\sin\theta_{6} \\ - & - & \sin\theta_{5}\sin\theta_{6} \\ -\sin\theta_{6}\cos\theta_{7}\sin\theta_{6}\sin\theta_{7} & \cos\theta_{6} \end{bmatrix}$$

となる. これを式 (16) に代入することにより、手首関節 の変位は、アームアングル ψ をパラメータとして、以下のように表せる.

$$\tan \theta_5 = \frac{a_{w23} \sin \psi + b_{w23} \cos \psi + c_{w23}}{a_{w13} \sin \psi + b_{w13} \cos \psi + c_{w13}}$$
 (17)

$$\cos \theta_6 = a_{w33} \sin \psi + b_{w33} \cos \psi + c_{w33}$$
 (18)

$$\tan \theta_7 = \frac{a_{w32} \sin \psi + b_{w32} \cos \psi + c_{w32}}{-a_{w31} \sin \psi - b_{w31} \cos \psi - c_{w31}}$$
(10)

(19)

ここで、 a_{wij} 、 b_{wij} および c_{wij} は、それぞれ行列 $m{A}_w$ 、 $m{B}_w$ および $m{C}_w$ の (i,j) 成分を表す.

以上のように、手先位置・姿勢が指定されたとき、肘関節変位は一意に求められるが、肩関節変位および手首関節変位はアームアングルに依存することが分かる。したがって、各関節変位を一意に決定するためには、アームアングルを指定する必要があるが、これは、関節可動範囲などの制限がなければ、ユーザが任意に指定することができる。

上記の逆運動学計算において問題となりうるのが、逆運動学解が複数存在することである。本論文で考える S-R-S 型マニピュレータの場合、8 通りの逆運動学解が存在する。解を一意に定めるためには、何らかの方法でこれらの中から一つを選択しなければならないが、本論文における以下の議論は、それぞれの解に対して同様に成り立つため、解の選択方法に対して何ら制限を与えない。したがって、逆運動学解を計算する場合には、関節可動範囲や肘位置などを考慮に入れて、8 通りの解の中から一つの解を適切に選択する必要がある。なお、それぞれの逆運動学解は異なったセルフモーション多様体を形成するため[20]、異なった解の間の移行は、セルフモーションを利用しても実現できないことに注意されたい。

逆運動学計算における別の問題として、特異点の問題がある.一般に、特異点は2種類に分類することができる [21].一つは、saturation singularity で、これはマニピュレータの可動範囲境界に存在する特異点である.もう一つは、internal singularity で、これは可動範囲内に存在する特異点である.本論文では、saturation singularity は考慮せず、internal singularity のみを考慮することにする.非冗長マニピュレータの internal singularity としては、肩特異点および手首特異点があるが、S-R-S型7自由度マニピュレータの場合は、肩特異点は特異点とはみなされず、手首特異点と S-R-S 型マニピュレータ特有の肩部の特異点の2種類が internal singularity となる [18].第5章で詳細に述べるが、これらの特異点は、セルフモーションによって回避可能であるため、ここでは議論しない.これとは別に、本

論文の逆運動学計算手法に特有の特異点問題が存在する.本論文では、アームアングルの参照面を決めるために、第3関節を固定した仮想的な非冗長マニピュレータの逆運動学解を計算しなければならないが、この計算において、非冗長マニピュレータの肩特異点の問題が生じうる.なお、本論文の手法では、仮想非冗長マニピュレータの逆運動学解は、肩関節の部分しか必要としないため、手首特異点が問題になることはない。肩特異点においては、手首が第1関節軸の延長線上に位置するため、第1関節の変位が不定となるが、この場合、第1関節の変位そのものがアームアングルに相当するため、第1関節の変位を零に固定することによって、アームアングルの参照面を一意に決めることが可能となる。

4. 関節制限による冗長自由度の制限

関節の可動範囲に制限がない場合,手先位置・姿勢を保ったまま,アームアングルのみを任意に変えることができるが,関節制限が存在する場合,その制限のために到達できないアームアングルが存在する場合がある.したがって,アームアングルを決定する際には,その実現可能性を考慮に入れなければならない.本章では,関節制限がアームアングルに与える影響について調べ,アームアングルの実現可能な領域を求める.

4.1 関節可動範囲

本論文では、各関節ごとに実現可能な最大変位および最小変位が存在し、それぞれの関節の可動範囲は、その他の関節変位によって影響を受けないと仮定する。すなわち、関節可動範囲は、関節空間において超直方体を形成し、その領域は次のように表されると仮定する。

$$\theta_i^l \le \theta_i \le \theta_i^u \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \tag{20}$$

ここで、 θ_i^l および θ_i^u は θ_i の下限値および上限値である.

回転関節の変位を扱う際に注意すべきことは、回転変位はトーラスを形成するということである [20]. すなわち、ある関節変位から 2π [rad] だけ離れた値は、同一のものであるということである。事実、前章で述べた逆運動学解法を用いて回転関節変位を求めるとき、 θ_i と θ_i ± 2π は区別のしようがなく、 θ_i の範囲を 2π [rad] 以内に限定しなければ、 θ_i を一意に定めることができない。それゆえ、本論文では、関節可動範囲の幅は 2π [rad] 以内として考えることにする。したがって、もし、 $(\theta_i^u-\theta_i^l)$ が 2π [rad] より大きければ、その関節変位には制限がないとみなされることになる。しかしながら、実際は、関節の可動範囲に上下限が存在するときは、 θ_i と θ_i ± 2π は違うものとして考えなければならない [16]. 以下では、簡単のため、関節変位の幅は 2π [rad] 以内を想定して議論を進めるが、以下の解析手法は、 2π [rad] 以上の変位幅に対しても拡張可能である。

4.2 アームアングルと関節変位の関係

マニピュレータの手先位置・姿勢を一定に保ちながらアームアングルのみを変化させた場合、関節変位がどのような挙動を示すかを考えてみる。第 3.3 節で示したように、肘関節変位(θ_4)は、アームアングルによらず一定となるが、その他の関節変位は、アームアングルの値に応じて変化する。したがって、ここでは、アームアングルと肩関節変位(θ_1 , θ_2 , θ_3)および手首関

節変位 $(\theta_5, \theta_6, \theta_7)$ との関係を調べることにする. 式 (13) ~ (15) および式 (17) ~ (19) より,アームアングルと各関節変位の関係は、

$$\tan \theta_i = \frac{a_n \sin \psi + b_n \cos \psi + c_n}{a_d \sin \psi + b_d \cos \psi + c_d}$$
 (21)

または,

$$\cos \theta_i = a \sin \psi + b \cos \psi + c \tag{22}$$

の形で表されることが分かる。したがって、これら二つの場合におけるアームアングルと関節変位の関係を調べれば、すべての関節変位の挙動が分かることになる。なお、以下では、アームアングルと関節変位の関係が、式(21)の形で表される場合を正接関数型、式(22)の場合を余弦関数型と呼ぶことにする。

4.2.1 正接関数型の場合

関節変位 θ_i とアームアングル ψ の関係が、

$$\tan \theta_i = \frac{a_n \sin \psi + b_n \cos \psi + c_n}{a_d \sin \psi + b_d \cos \psi + c_d}$$

で表されるとする. この両辺を ψ で微分することにより, θ_i の 微分係数が次のように求められる.

$$\frac{d\theta_i}{d\psi} = \frac{a_t \mathbf{s}_{\psi} + b_t \mathbf{c}_{\psi} + c_t}{(a_n \mathbf{s}_{\psi} + b_n \mathbf{c}_{\psi} + c_n)^2 + (a_d \mathbf{s}_{\psi} + b_d \mathbf{c}_{\psi} + c_d)^2}$$
(23)

ここで、 $\mathbf{s}_{\psi} = \sin \psi$ および $\mathbf{c}_{\psi} = \cos \psi$ である。また、 a_t 、 b_t および c_t はそれぞれ以下で与えられる定数である。

$$a_t = b_d c_n - b_n c_d$$
$$b_t = a_n c_d - a_d c_n$$
$$c_t = a_n b_d - a_d b_n$$

式 (23) の分母は常に正または零であるため,アームアングル ψ に対する関節変位 θ_i の傾きは分子の符号によって決まる.式 (23) より,分子の符号は,以下の条件式を満たす場合にのみ ψ の値に応じて変化することが分かる.

$$a_t^2 + b_t^2 - c_t^2 > 0 (24)$$

この条件式を満たす場合,式 (23) の分子を零にするアームアングル ψ_0 は、次式で求められる。

$$\psi_0 = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{a_t - \sqrt{a_t^2 + b_t^2 - c_t^2}}{b_t - c_t} \\ 2 \tan^{-1} \frac{a_t + \sqrt{a_t^2 + b_t^2 - c_t^2}}{b_t - c_t} \end{cases}$$
(25)

これより、 θ_i は、これらの点において極大または極小となることが分かる。また、それぞれの点における θ_i の二階微分係数は、

$$\frac{d^{2}\theta_{i}}{d\psi^{2}}\Big|_{\psi_{0}} = \frac{-b_{t}s_{\psi_{0}} + a_{t}c_{\psi_{0}}}{(a_{n}s_{\psi_{0}} + b_{n}c_{\psi_{0}} + c_{n})^{2} + (a_{d}s_{\psi_{0}} + b_{d}c_{\psi_{0}} + c_{d})^{2}}$$
(26)

で与えられるため、これに式(25)を代入することにより、二

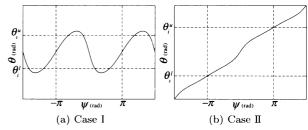


Fig. 3 Relationship between joint angle θ_i and arm angle ψ for tangent type; (a) Periodic function if the condition (24) is satisfied, and (b) Monotonic function if the condition is not satisfied

つの ψ_0 の内,一方の点において正,もう一方の点において負となることが示される.したがって,関数 $\theta_i(\psi)$ は, ψ の値域 $[-\pi,\pi]$ において,極大および極小がそれぞれ一つずつ存在することが分かる.さらに, θ_i の極大値および極小値を実際に計算してみると,それらは, θ_i の大域的最大値および最小値であることが示される.

以上をまとめると、アームアングル ψ と関節変位 θ_i の関係は、次の 2 種類の内のどちらかに分類されることが分かる.

(1) 条件式 (24) を満たす場合

関節変位 $\theta_i(\psi)$ は、式(25)で与えられる二つのアームアングル ψ_0 において、それぞれ大域的最小および大域的最大となる。また、アームアングル ψ および関節変位 θ_i は、 2π [rad] を単位としたトーラスを形成するため、 ψ と θ_i の関係は、**Fig. 3** (a) に示すように、周期関数で表される.

(2) 条件式(24)を満たさない場合

関節変位 $\theta_i(\psi)$ の傾きが、アームアングル ψ によらず常に同符号であるため、 ψ と θ_i の関係は、Fig. 3 (b) に示すように、単調増加または単調減少の関数で表される.

4.2.2 余弦関数型の場合

関節変位 θ_i とアームアングル ψ の関係が,

$$\cos \theta_i = a \sin \psi + b \cos \psi + c$$

で表されるとする. この両辺を ψ で微分し, θ_i の微分係数を求めると, 以下が得られる.

$$\frac{d\theta_i}{d\psi} = -\frac{1}{\sin\theta_i} \left(a\cos\psi - b\sin\psi \right) \tag{27}$$

したがって、式 (27) を零とするアームアングル ψ_0 は、

$$\psi_0 = \tan^{-1} \frac{a}{b}$$

で求められる. また、この点における θ_i の二階微分係数は、

$$\left. \frac{d^2 \theta_i}{d\psi^2} \right|_{\psi_0} = \frac{1}{\sin \theta_i} \left(a \sin \psi_0 + b \cos \psi_0 \right) \tag{28}$$

で与えられる.

ここで、 ψ_0 の値域を $[-\pi/2, \pi/2]$ に限定すると、 $\psi_0 \pm \pi$ も式 (27) を零にする解となり得ることが分かる。したがって、式 (27) を零にするアームアングルは、区間幅 2π [rad] において必ず二点存在する。さらに、式 (28) よりそれぞれの点における

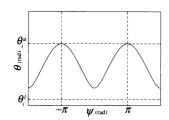


Fig. 4 Relationship between joint angle θ_i and arm angle ψ for cosine type

二階微分係数を計算することにより、これら二つの点の内、一方で θ_i は最大となり、もう一方で θ_i は最小となることが示される。したがって、アームアングル ψ と関節変位 θ_i の関係は、**Fig. 4** に示すように、周期関数で表される。

4.3 アームアングルの実現可能領域

以上で得られたアームアングルと関節変位の関係を用いて、 関節制限が存在する場合のアームアングルの実現可能領域がど のように求められるかを考えてみよう.

先に示したように、アームアングルの変化に対する関節変位の変化は、単調的になる場合と周期的になる場合がある。単調変化をする場合、Fig. 3 (b) に示すように、アームアングルの増加または減少に伴って関節変位は一様に増加または減少し、必ず可動限界に達する。したがって、この場合、関節変位の上限および下限におけるアームアングルの値がアームアングルの実現可能な最大値および最小値となり、その二つの値に挟まれた領域がアームアングルの実現可能領域となる。

これに対して、関節変位が周期的に変化する場合、関節変位には大域的最小および大域的最大が存在するため、アームアングルの実現可能領域は少々複雑になる。いま、関節変位 θ_i を最大にするアームアングルを ψ^{min} とし、それぞれに対応する関節変位の値を θ_i^{max} および θ_i^{min} とする。関節制限が式(20)で与えられるとしてアームアングルの実現可能領域を具体的に調べると、以下のように五つに場合分けされることが分かる。なお、以下では、簡単のため、アームアングルの定義域は $[-\pi,\pi]$ に限定して考えることにする。

- (1) $\theta_i^{max} < \theta_i^l$ または $\theta_i^{min} > \theta_i^u$ のとき アームアングルの実現可能領域は存在しない.
- (2) $\theta_i^l \leq \theta_i^{max} \leq \theta_i^u$ かつ $\theta_i^{min} < \theta_i^l$ のとき ψ^{max} を含むある領域がアームアングルの実現可能領域である。その領域の境界は、 $\theta_i(\psi) = \theta_i^l$ を満たす ψ として与えられる。
- (3) $\theta_i^{max} > \theta_i^u$ かつ $\theta_i^l \leq \theta_i^{min} \leq \theta_i^u$ のとき ψ^{min} を含むある領域がアームアングルの実現可能領域である。その領域の境界は、 $\theta_i(\psi) = \theta_i^u$ を満たす ψ として与えられる。
- (4) $\theta_i^{max} > \theta_i^u$ かつ $\theta_i^{min} < \theta_i^l$ のとき ψ^{max} を含むある領域と ψ^{min} を含むある領域が実現不可能な領域であるため,アームアングルの定義域からそれら の領域を除いたものが実現可能領域である.これらの領域 の境界は,それぞれ, $\theta_i(\psi) = \theta_i^u$ の解および $\theta_i(\psi) = \theta_i^l$ の

解として与えられる.

(5) $\theta_i^l \leq \theta_i^{max} \leq \theta_i^u$ かつ $\theta_i^l \leq \theta_i^{min} \leq \theta_i^u$ のとき アームアングルの定義域すべてが実現可能領域である.

上記の (1) の場合を除くと、アームアングルの実現可能領域は、一つまたは複数の閉じた領域から構成されることが分かる。したがって、ある関節 i の関節制限を満たすアームアングルの実現可能領域 Ψ_i は、次のように表すことができる。

$$\Psi_i = \bigcup_{j=1}^{n_i} \Psi_{ij} \tag{29}$$

ここで、 Ψ_{ij} は、それぞれに閉じた実現可能領域、 n_i はその領域の数を表す。式(29)より、すべての関節の関節制限を満たすアームアングルの実現可能領域 Ψ は、

$$\Psi = \bigcap_{i=1}^{7} \Psi_i \tag{30}$$

のように表すことができる.

以上の方法より、手先位置・姿勢が指定された場合のアームアングルの大域的な実現可能領域を解析的に求めることができる。関節制限を満たしつつ指定された手先位置・姿勢を実現するためには、アームアングルがその領域内に属するように制御しなければならない。また、アームアングルの実現可能領域が空集合となる場合は、指定された手先位置・姿勢は、関節制限のために、セルフモーションを使っても実現できないことが保証される。

5. 冗長自由度の利用法

前章までに得られた結果を用いると,関節可動範囲に制限がある場合の冗長自由度の利用法を容易に考案することができる.本章では,特異点回避および関節限界の回避を目的とした冗長自由度の利用例を示す.

5.1 特異点回避

冗長自由度を用いた特異点回避に関しては、従来から様々な手法が提案されてきているが、それらの多くは、特異点回避のための適当な評価関数を最適化するというアプローチをとっている。しかしながら、特異点は、マニピュレータの可動範囲内のごく限られた領域でしか起こらないため、特異点回避のみに冗長自由度を用いるのは、冗長自由度の利用法としては、無駄が多いように思われる。本論文で示した逆運動学解析手法を応用すると、特異点に陥るアームアングルの値が陽に求められるため、その点およびその周辺を避けるようにアームアングルを制御すれば、特異点を回避するという目的は十分達成されると考えられる。したがって、ここでは、特異点に陥るアームアングルの同定のみを行うことにする。

第3.3節でも述べたように、マニピュレータの特異点は、一般に、saturation singularity と internal singularity の2種類に大別でき、saturation singularity は冗長自由度を用いても回避できない。本論文で扱う7自由度マニピュレータの場合、internal singularityに属する特異点は、肩部の三つの関節で張られる部分空間が縮退する場合と手首部の三つの関節で張られ

る部分空間が縮退する場合の2種類あり[18], これらは、冗長自由度を用いて回避可能である.以下では、それぞれの特異点に対応するアームアングルを求めることを考える.

まず、肩部の特異点について考える。この特異点は、第1関節の回転軸と第3関節の回転軸が平行になる場合に生じる。S-R-S型マニピュレータの場合、この条件を満たすのは、 $\theta_2=0$ または $\theta_2=\pm\pi$ のときである。 $\theta_2=\pm\pi$ は、 θ_2 の可動範囲外であることが多いので、ここでは、 $\theta_2=0$ の場合のみを考えることにする。手先位置・姿勢が指定された場合の第2関節の変位とアームアングルの関係は、式(14)で与えられるため、特異点に陥るアームアングルの条件は以下のように表される。

$$a_{s32}\sin\psi + b_{s32}\cos\psi + c_{s32} + 1 = 0$$

この式を満たすアームアングル ψ が存在するためには、

$$a_{s32}^2 + b_{s32}^2 - (c_{s32} + 1)^2 \ge 0$$

でなければならないが、 $\cos \theta_2$ の値域の制限より、

$$a_{s32}^2 + b_{s32}^2 - (c_{s32} + 1)^2 \le 0$$

が成り立つので、特異点が存在する条件は、次のようになる.

$$a_{s32}^2 + b_{s32}^2 - (c_{s32} + 1)^2 = 0 (31)$$

したがって、もし、式 (31) を満たさない場合、任意のアームアングルに対して特異点に陥ることがないことが保証される.また、式 (31) を満たす場合、特異点に陥るアームアングルは、以下のように求められる.

$$\psi = 2 \tan^{-1} \frac{a_{s32}}{b_{s32} - c_{s32} - 1} \tag{32}$$

次に、手首部の特異点について考える.この特異点は、第5 関節の回転軸と第7関節の回転軸が平行になる場合に生じる. 先程と同様に考えると、特異点に陥るアームアングルが存在する条件は、式(18)より、以下のように求められる.

$$a_{w33}^2 + b_{w33}^2 - (c_{w33} - 1)^2 = 0 (33)$$

この条件を満たす場合,特異点に陥るアームアングルは、

$$\psi = 2 \tan^{-1} \frac{a_{w33}}{b_{w33} - c_{w33} + 1} \tag{34}$$

で与えられる.

以上より、肩部および手首部の特異点を回避するためには、それぞれの特異点について、その存在条件を評価し、もしそれを満たすならば、特異点に陥るアームアングルを同定し、その点を回避するようにアームアングルを制御すればよいことが分かる.

5.2 関節限界の回避

マニピュレータの手先で作業をする場合、手先の可動範囲は可能な限り広いほうが望ましい。S-R-S型7自由度マニピュレータの場合、各関節変位は、手先位置・姿勢に加えてアームアングルにも依存するため、手先の可到達領域は、アームアングルの決め方に依存する。また、手先の可到達限界は、一つまたは複数の関節変位がその可動限界に到達することにより生じるた

め、各関節変位をその限界からできるだけ遠ざけるようにアームアングルを制御することによって、手先の可到達領域が広がることが期待される。ここでは、関節限界回避のためのアームアングルの決定法の一例を示す。

5.2.1 方法

第 3.3 節で示したように、肘関節変位 (θ_4) はアームアングルによらず、手先位置・姿勢が決まれば一意に決められるため、アームアングルのみによって調節可能な関節変位は、肩関節変位 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ および手首関節変位 $(\theta_5, \theta_6, \theta_7)$ である。

S-R-S 型 7 自由度マニピュレータの肩関節および手首関節のそれぞれの部位は,仮想的な球面関節とみなすことができる。いま,ある仮想球面関節を構成する三つの関節がそれぞれ目標変位に到達したときの仮想球面関節の姿勢変位を $\mathbf{R}^d \in SO(3)$, 実際の姿勢変位を $\mathbf{R} \in SO(3)$ とする.各関節変位を目標変位に近づけるためには, \mathbf{R} を \mathbf{R}_d に近づければよく,これは,姿勢変位の差を表す行列 $\mathbf{R}\mathbf{R}^{dT}$ を単位行列に近づけることに等しい.この姿勢変位差は,ある軸回りの回転変位で表すことができるため [22], $\mathbf{R}\mathbf{R}^{dT}$ の大きさは,その回転軸回りの回転角 ゆで表すことができる.よって, $\mathbf{R}\mathbf{R}^{dT}$ を単位行列に近づける問題は,回転角 $\mathbf{\phi}$ を零に近づける問題に簡単化できる.したがって,姿勢変位差の大きさ $\mathbf{\phi}$ をできるだけ零に近づけるようにアームアングルを決めることによって,各関節変位が目標変位に近づき,その部位の関節限界を回避することが可能になると考えられる.

以下では、肩および手首のそれぞれの部位における関節限界の回避法とその両方を含んだマニピュレータ全体の関節限界の回避法を示す.

5.2.2 肩関節の関節限界回避

初めに、肩関節変位を目標変位に最も近づけるアームアングルを求める。いま、この部位を構成する各関節変位 θ_1 、 θ_2 および θ_3 の目標変位をそれぞれ θ_1^d 、 θ_2^d および θ_3^d とし、そのときの肩部の姿勢変位を ${}^0\mathbf{R}_3^d$ とする。肩部の姿勢変位差は、回転軸の単位ベクトル $\mathbf{u}_s \in \Re^3$ および回転角度 $\phi_s \geq 0$ を用いて、次のように表すことができる。

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{3}{}^{0}\boldsymbol{R}_{3}^{dT} = \boldsymbol{I}_{3} + \sin\phi_{s} \left[{}^{0}\boldsymbol{u}_{s} \times\right] + \left(1 - \cos\phi_{s}\right) \left[{}^{0}\boldsymbol{u}_{s} \times\right]^{2}$$

$$(35)$$

これより、回転軸の方向が任意に変化し得るとすると、肩部の 姿勢変位差を最小にするためには、回転角度 ϕ_s を最小にすればよいことが分かる.

式 (35) に式 (12) を代入し, 両辺のトレースを計算すると, 以下が得られる.

trace
$$\left\{ (\boldsymbol{A}_s \sin \psi + \boldsymbol{B}_s \cos \psi + \boldsymbol{C}_s)^0 \boldsymbol{R}_3^{dT} \right\}$$

= $a_s \sin \psi + b_s \cos \psi + c_s$
= $1 + 2 \cos \phi_s$

ここで、 $a_s = \operatorname{trace}\left(\boldsymbol{A_s}^0\boldsymbol{R_3^{dT}}\right)$ 、 $b_s = \operatorname{trace}\left(\boldsymbol{B_s}^0\boldsymbol{R_3^{dT}}\right)$ 、および $c_s = \operatorname{trace}\left(\boldsymbol{C_s}^0\boldsymbol{R_3^{dT}}\right)$ である.したがって、 ϕ_s を最小化する問題は、次の目的関数

$$f_s(\psi) = a_s \sin \psi + b_s \cos \psi + c_s \tag{36}$$

$$\begin{array}{c|c} \Psi_i & \Psi_{i+1} \\ \hline \psi_i^{max} & \psi^{opt} & \psi_{i+1}^{min} \end{array} \rightarrow \Psi$$

清 水 昌 幸

Fig. 5 The optimal arm angle is not always feasible under the joint limits

を最大化する問題に帰着できる。関数解析より、 $f_s(\psi)$ は、

$$\psi_s = \tan^{-1} \frac{a_s}{h_c} \tag{37}$$

において最大または最小となることが求められる。式(37)を満たすアームアングルは、領域 $[-\pi,\pi]$ において、常に二つ存在するが、目的関数 f_s を最大にする方のアームアングルを ψ_s^{opt} とすると、これが肩関節変位を目標変位に最も近づける最適アームアングルとなる。

以上の方法で最適アームアングルが求められるが、 ${\bf Fig.5}$ に示すように、関節制限のために、このアームアングルが実現不可能な場合がある。この場合、実現可能なアームアングルの内、式(36)で与えられる目的関数 $f_s(\psi)$ を最大にするものを探す必要がある。ところが、この目的関数は、 $\left[\psi_s^{opt}-\pi,\psi_s^{opt}\right]$ において単調増加、 $\left[\psi_s^{opt},\psi_s^{opt}+\pi\right]$ において単調減少であるため、実現可能でかつ最適なアームアングルは、 ψ_s^{opt} に最も近い実現可能なアームアングルであることが示される。 ${\bf Fig.5}$ に示すように、 ψ_s^{opt} に最も近い実現可能なアームアングルは、 ψ_i^{max} または ψ_{i+1}^{min} であるため、これらの内、 ψ_s^{opt} に近いアームアングルが最適アームアングルとなる。

5.2.3 手首関節の関節限界回避

次に、手首関節変位を目標変位に最も近づける最適アームアングルを求めることを考える。 肩関節の場合と同様に考えると、最適化問題の目的関数は、式(16)より、

$$f_w(\psi) = a_w \sin \psi + b_w \cos \psi + c_w \tag{38}$$

のように求められる。ここで、手首部の目標姿勢変位を ${}^4\mathbf{R}_7^d$ と すると、 $a_w = \operatorname{trace}(\mathbf{A}_w {}^4\mathbf{R}_7^{dT})$ 、 $b_w = \operatorname{trace}(\mathbf{B}_w {}^4\mathbf{R}_7^{dT})$ 、および $c_w = \operatorname{trace}(\mathbf{C}_w {}^4\mathbf{R}_7^{dT})$ である。また、この関数は、

$$\psi_w = \tan^{-1} \frac{a_w}{b_w} \tag{39}$$

において最大または最小となるため、この式を満たす二つのアームアングルの内、目的関数 f_w を最大にするアームアングル ψ_w^{opt} が手首関節変位を最も目標変位に近づける最適アームアングル となる。なお、肩部の場合と同様に、最適アームアングル ψ_w^{opt} が実現不可能な場合は、その値に一番近い実現可能なアームアングルを最適アームアングルとすればよい。

5.2.4 マニピュレータ全体の関節限界回避

最後に、肩部と手首部の両方を含めたマニピュレータ全体の関節変位を目標変位に近づけることを考える。上述のように、肩関節変位は式(36)で与えられる目的関数 f_w をそれぞれ最大化することによって目標変位に近づくので、これら二つの目的関数を含む適当な目的関数 f を設定し、それを最適化することによって、肩部および手首部の関節変位が同時に目標変位に近づくアームアングルを求めることができる。このような目的関数

Table 2 Upper and lower bounds of joint angles assumed in simulations (unit: degree)

i	1	2	3	4	5	6	7
θ_i^u	90	45	120	135	90	90	120
θ_i^l	-90	-45	-120	0	-90	-90	-120

の候補として, 例えば,

$$f\left(\psi\right) = \frac{r_{s}f_{s}\left(\psi\right) + r_{w}f_{w}\left(\psi\right)}{r_{s} + r_{w}}$$

を考えることができる. ここで, $r_s \ge 0$ および $r_w \ge 0$ は重み 係数である. この場合, 目的関数 f を最大化または最小化する アームアングルは, 次式で与えられる.

$$\psi = \tan^{-1} \frac{r_s a_s + r_w a_w}{r_s b_s + r_w b_w} \tag{40}$$

したがって、マニピュレータ全体の関節変位を目標変位に近づける最適アームアングル ψ^{opt} は、式(40)を満たす二つの解の内、目的関数 f を最大にするもので与えられることが分かる。なお、先程と同様に、最適アームアングルが実現不可能な場合は、その値に最も近い実現可能なアームアングルが、最適アームアングルとなる。

6. 適 用 例

本章では、これまでに示した手法の有効性をシミュレーションにより確認する。ここでは、ケーススタディとして、三菱重工製の7自由度マニピュレータ PA10-7C を考える。このマニピュレータの肩部三関節および手首部三関節はそれぞれ一点で交差しており、また、隣り合う関節の回転軸が互いに直交していることより、このマニピュレータのリンクパラメータは、Table 1で表すことができる。ここで、各リンクの長さは、PA10-7Cの仕様書より、 $d_{bs}=0.317$ [m]、 $d_{se}=0.45$ [m]、 $d_{ew}=0.48$ [m]、 $d_{wt}=0.07$ [m] とする。また、各関節の可動範囲は、Table 2のように制限する。

6.1 アームアングルの実現可能領域

いま、手先の目標位置 ${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d}$ および目標姿勢 ${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d}$ を

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0.65 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}^{T} [m]$$

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(41)

と設定したときのアームアングルの実現可能領域を求めてみる. 第4章で示した方法を用いると、各関節に関するアームアン グルの実現可能領域が以下のように得られる.

$$\Psi_1 = [-180, 180] \text{ [deg]}$$

$$\Psi_2 = [-45.991, 45.991] \text{ [deg]}$$

$$\Psi_3 = [-111.734, 111.734] \text{ [deg]}$$

$$\Psi_5 = [-108.926, 108.926] \text{ [deg]}$$

$$\Psi_6 = [-62.154, 62.154] \text{ [deg]}$$

$$\Psi_7 = [-180, 180] \text{ [deg]}$$

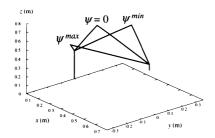


Fig. 6 Postures at arm angles $\psi = 0$, ψ^{min} and ψ^{max} for the tip pose given by (41)

なお、ここで、アームアングルの定義域は[-180, 180] [deg] とした、すべての関節制限を満たすアームアングルの実現可能領域は、これらの共通領域であるため、以下のように求められる.

$$\Psi = [-45.991, 45.991] [deg]$$

これを確かめるため,アームアングルが零の場合,最小アームアングル ψ^{min} の場合および最大アームアングル ψ^{max} の場合の各関節変位をそれぞれ求めてみると,

$$\boldsymbol{\theta}|_{\psi=0} = [0, 25.666, 0, 82.872, 0, 71.463, 0]^{T} \text{ [deg]}$$

$$\boldsymbol{\theta}|_{\psi^{min}} = [43.992, 45, -71.419, 82.872, \\
42.572, 82.193, -27.693]^{T} \text{ [deg]}$$

$$\boldsymbol{\theta}|_{\psi^{max}} = [-43.992, 45, 71.419, 82.872, \\
-42.572, 82.193, 27.693]^{T} \text{ [deg]}$$

となる。また、それぞれのアームアングルにおけるマニピュレータの姿勢を図示すると、 ${\bf Fig. 6}$ のようになる。これより、アームアングルの増減に従って第 2 関節の変位が増加し、アームアングルが ψ^{min} または ψ^{max} に達したとき、第 2 関節が可動限界に達するために、アームアングルをそれ以上変位させることができなくなることが分かる。

6.2 冗長自由度の利用例

6.2.1 特異点回避

いま、手先の目標位置 ${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d}$ および目標姿勢 ${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d}$ を

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0.55 & 0 & 0.767 \end{bmatrix}^{T} [m]$$

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

と設定した場合を考え、特異点に陥る可能性を調べてみる.

まず、肩部の特異点について調べる。この特異点の発生条件式(31)のパラメータを計算すると、 $a_{s32}=0$ 、 $b_{s32}=-0.532$ 、 $c_{s32}=-0.468$ が得られるため、肩部の特異点の条件が満たされることが分かる。したがって、肩部の特異点に陥るアームアングルが存在し、それは、式(32)より、 $\psi=0$ と求められる。手首の特異点に関しても同様に調べられる。この特異点の発生条件式(33)のパラメータは、 $a_{w33}=0$, $b_{s33}=0.468$ 、 $c_{w33}=0.532$ であるため、手首特異点の条件は満たされ、そのときのアームアングルは、式(34)より、 $\psi=0$ と求められる。

以上より、 $\psi=0$ において、肩部と手首部の特異点が同時に発生することが分かる。このときのアームアングルの実現可能領域は、[-63.277, 63.277] [deg] であるため、特異点に陥るアームアングルが実現可能領域内に存在する。したがって、特異点を回避するためには、 $\psi=0$ にならないようにアームアングルを制御しなければならないことが分かる。

6.2.2 関節限界の回避

いま、手先の目標位置 ${}^0m{x}_7^d$ および目標姿勢 ${}^0m{R}_7^d$ を

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0.65 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}^{T} [m]$$
 ${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$

と設定し、関節限界を回避するアームアングルを求めてみる. なお、この場合、アームアングルの実現可能領域は、 $\Psi = [-43.246, 43.246]$ [deg] であり、また、特異点に陥るアームアングルは存在しない.

第 5.2 節で示した手法を用いると,肩関節の関節限界を回避する最適アームアングル ψ_s^{opt} ,手首関節の関節限界を回避する最適アームアングル ψ_w^{opt} ,およびマニピュレータ全体の関節限界を回避する最適アームアングル ψ^{opt} を求めることができる.それらは,式(37),(39)および(40)より,それぞれ, $\psi_s^{opt}=0$, $\psi_w^{opt}=54.479$ [deg], $\psi^{opt}=25.017$ [deg] と求められる.ここで,式(40)における重み係数は, $r_s=r_w=0.5$ とした.これらの内, ψ_w^{opt} は実現可能領域外に存在するため, $\psi_w^{opt}=43.246$ [deg] が実現可能な最適アームアングルとなる.比較のために, $\psi=0$ のときの関節変位と $\psi=\psi^{opt}$ のときの関節変位を求めてみると.

$$\boldsymbol{\theta}|_{\psi=0} = [0, 25.666, 0, 82.872, \\ 0, 71.463, -90]^T \text{ [deg]}$$

$$\boldsymbol{\theta}|_{\psi=\psi^{opt}} = [-32.325, 32.687, 46.864, 82.872, \\ -24.101, 74.814, -73.709]^T \text{ [deg]}$$

が得られ、 $\psi=0$ のときの関節変位の絶対値の最大値は $|\theta_7|=90$ であるが、 $\psi=\psi^{opt}$ とすることによって、関節変位の絶対値の最大値は $|\theta_6|=74.814$ に減少することが分かる.

最後に、アームアングルを用いて関節限界を回避した場合とアームアングルを固定した場合における手先の可到達領域の違いについて調べてみる。ここでは、簡単のために、式 (41) で示す手先位置・姿勢を基準とし、この状態から、手先位置を固定したまま、姿勢のみを絶対座標系のz軸回りに連続的に回転させていく場合を考える。このとき、z軸回りの回転角度を γ とすると、手先の目標位置・姿勢は次のように表せる。

$${}^{0}\boldsymbol{x}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.0 & 0.5 \end{bmatrix}^{T} [m]$$

$${}^{0}\boldsymbol{R}_{7}^{d} = \begin{bmatrix} -\cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

γ を連続的に変化させていくと、手先は現在の位置を保ったま

ま z 軸回りに回転していくが、あるところで関節限界に達して しまい、それ以上の回転ができなくなる。この場合、手先の可 到達領域は、実現可能な γ の領域として表すことができる。

初めに、アームアングル ψ を $\psi=0$ に固定した場合を考える。この場合、手先の z 軸回りの姿勢変位は、第7関節の変位によってのみ変化するため、 γ の実現可能領域 Γ_0 は、その関節の可動範囲と等価であり、以下のように求められる。

$\Gamma_0 = [-120, 120] [deg]$

次に、式(40)で示されるようにアームアングルを制御し、マニピュレータ全体の関節限界を回避した場合を考える。このときの γ の実現可能領域 Γ を数値計算より求めると、以下が得られる。

$\Gamma = [-147.693, 147.693] [deg]$

これより, アームアングルを用いて関節限界を回避した場合は, アームアングルを固定した場合に比べ, 手先の可到達領域が広 くなることが分かる.

7. お わ り に

本論文では、関節の可動範囲を考慮に入れた7自由度冗長マ

ニピュレータの解析的逆運動学解法を提案した。初めに、アームアングルパラメータを用いた7自由度マニピュレータの逆運動学解法を示した。次に、関節制限が存在する場合のアームアングルの実現可能領域を解析的に求める手法を示した。また、提案した逆運動学解析手法に基づいた冗長自由度の利用例として、特異点回避法や関節限界の回避法を示した。最後に、提案した手法を用いて逆運動学シミュレーションを行い、関節制限を満たす実現可能な逆運動学解が解析的に求められることを示した。本論文では、対象とするマニピュレータをS-R-S型7自由度マニピュレータに限定して逆運動学解析を行ったが、それ以外の7自由度マニピュレータに対して本論文の手法を適用できるかどうかについては、そのマニピュレータの機構に依存するため、一概には言えない。しかしながら、S-R-S型のように、手先位置・姿勢とは独立にセルフモーションをパラメータ化できれば、本論文の手法を応用することができると考えられる。

参考文献

- D.N. Nenchev: "Redundancy Resolution through Local Optimization: A Review," J. Robotic Systems, vol.6, no.6, pp.769

 798, 1989.
- [2] T. Yoshikawa: "Manipulability and Redundancy Control of Robotic Mechanisms," Proc. 1985 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1004-1009, 1985.
- [3] J.M. Hollerbach and K.C. Suh: "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," IEEE J. Robotics and Automation, vol.RA-3, no.4, 1987.
- [4] K.C. Suh and J.M. Hollerbach: "Local versus Global Torque Optimization of Redundant Manipulators," Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.619-624, 1987.

- [5] J. Baillieul: "Avoiding Obstacles and Resolving Kinematic Redundancy," Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1698–1704, 1986.
- [6] Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: "Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators," Int. J. Robotics Research, vol.6, no.2, pp.3-15, 1987.
- [7] R.V. Mayorga and A.K.C. Wong: "A Singularities Avoidance Approach for the Optimal Local Path Generation of Redundant Manipulators," Proc. 1988 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.49–54, 1988.
- [8] D.N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Takahashi: "Singularity-Consistent Kinematic Redundancy Resolution for the S-R-S Manipulator," Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.3607-3612, 2004.
- [9] T.F. Chan and R.V. Dubey: "A Weighted Least-Norm Solution Based Scheme for Avoiding Joint Limits for Redundant Joint Manipulators," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.11, no.2, pp.286-292, 1995.
- [10] Z.L. Zhou and C.C. Nguyen: "Joint Configuration Conservation and Joint Limit Avoidance of Redundant Manipulators," Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2421–2426, 1997.
- [11] K. Kazerounian and Z. Wang: "Global versus Local Optimization in Redundancy Resolution of Robotic Manipulators," Int. J. Robotics Research, vol.7, no.5, pp.3-12, 1988.
- [12] J. Nakanishi, R. Cory, M. Mistry, J. Peters and S. Schaal: "Comparative Experiments on Task Space Control with Redundancy Resolution," Proc. 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1575-1582, 2005.
- [13] S. Lee and A.K. Bejczy: "Redundant Arm Kinematic Control Based on Parameterization," Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.458-465, 1991.
- [14] H. Seraji, M.K. Long and T.S. Lee: "Motion Control of 7-DOF Arms: The Configuration Control Approach," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.9, no.2, pp.125-139, 1993.
- [15] T. Asfour and R. Dillmann: "Human-like Motion of a Humanoid Robot Arm Based on a Closed-Form Solution of the Inverse Kinematics Problem," Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1407-1412, 2003.
- [16] C.L. Lück and S. Lee: "Self-Motion Topology for Redundant Manipulators with Joint Limits," Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.626-631, 1993.
- [17] K. Kreutz-Delgado, M. Long and H. Seraji: "Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators," Int. J. Robotics Research, vol.11, no.5, pp.469-481, 1992.
- [18] Y. Taki and K. Sugimoto: "Classification of Singular Configurations for 7-DOF Manipulators with Kinematic Redundancy," Proc. 6th Japan-France and 4th Asia-Europe Mechatronics Congress, pp.438-443, 2003.
- [19] H. Asada and J.J.E. Slotine: Robot Analysis and Control. John Wiley & Sons, 1986.
- [20] J.W. Burdick: "On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators: Characterization of the Self-Motion Manifolds," Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.264–270, 1989.
- [21] N.S. Bedrossian: "Classification of Singular Configurations for Redundant Manipulators," Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.818–823, 1990.
- [22] J.M. McCarthy: An Introduction to Theoretical Kinematics. MIT Press, 1990.



清水昌幸(Masayuki Shimizu)

1977 年 11 月 2 日生、2005 年 3 月東北大学大学院工学研究科博士課程修了、博士(工学)、2004 年 4 月より 2006 年 3 月まで日本学術振興会特別研究員、2006 年 4 月産業技術総合研究所特別研究員、現在に至る、物体の組み付け技能、マニピュレータ制御の研究に従事、2004 年ファナック FA ロボット財

団論文賞受賞. IEEE の会員. (日本ロボット学会正会員)



尹 祐根 (Woo-Keun Yoon)

1972 年 1 月 13 日生. 1996 年九州大学工学部動力機械工学科卒業,1998 年同大学大学院工学研究科修士課程修了,同年東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程編入学,1999 年同課程中途退学,同研究科航空宇宙工学専攻助手,2001年(独)産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員,

現在に至る. 2003 年東北大学博士 (工学). スキルトランスファー, 遠隔操作, ハプティックインターフェースの研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)



小菅一弘(Kazuhiro Kosuge)

1955 年 10 月 2 日生. 1978 年 3 月東京工業大学工学部制御工学科卒業. 1980 年 3 月東京工業大学理工学研究科制御工学専攻修士課程修了. 同年 4 月日本電装株式会社(現:(株)デンソー)入社. 1982年 10 月東京工業大学工学部制御工学科助手. 1990年 9 月名古屋大学工学部助教授. 1995 年 3 月東北

大学工学部機械知能工学科教授. 1997 年 4 月より東北大学大学院工学研究科教授(大学院重点化による配置換え),現在に至る. 博士(工学). ロボット,メカトロニクス,マン・マシンシステム,知能機械などの研究に従事. 2002 年および 2005 年日本機械学会賞(論文),2005 年日本ロボット学会論文賞,2004 年,2006 年ファナック FA財団論文賞,IEEE,日本機械学会,計測自動制御学会,システム情報制御学会等の会員. IEEE フェロー,日本機械学会フェロー,計測自動制御学会フェロー.



角谷 啓 (Hiromu Kakuya)

1976年7月28日生.2000年東北大学工学部機械 知能工学科卒業,同年同大学大学院工学研究科博 士前期課程入学,2002年同課程修了,同年株式会 社日立製作所入社,現在に至る.在学中は双腕型移 動ロボットを用いた人との協調作業に関する研究に 従事.



北垣高成(Kosei Kitagaki)

1961年5月27日生. 1984年東北大学工学部精密工学科卒業. 1989年同大学大学院工学研究科博士課程修了. 工学博士. 同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所に入所. 2001年独立行政法人産業技術総合研究所に改組. 知能システム研究部門主任研究員, 現在に至る. 知能ロボット, 力覚センシ

ング、ロボットシステムなどの研究に従事、日本ロボット学会論文賞 (1997) など受賞、日本機械学会、IEEE などの会員、

(日本ロボット学会正会員)