2 台のロボットの一本化による全方向からアクセスする 必要のある作業の実現法

岡田 徳次* 山崎 充弘* 三村 宣治*

Realization of Tasks Requiring Accessibility from Overall Directions by Making a Chain of Two Simple Manipulators

Tokuji Okada*, Mitsuhiro Yamazaki* and Nobuharu Mimura*

This paper proposes a method to combine two simple manipulators so that they make a redundant chain for performing a task requiring accessibility from overall directions. For tracing a welding seam on a small-sized object, a tool like a torch or nozzle is needed to access the object widely from any direction in a limited area. However, a single manipulator is difficult to bring about the accessibility. Therefore, the combination of the two manipulators is important. Control variables of rotational and prismatic joints expressed with link parameters of the chained manipulators are discussed for solving. Actually, the task of tracing a curve on a bulb with a certain angle is treated for simulating a welding of a golf head which is roughly welded with three curved pieces. Also, the calculation of the control variables are shown to be valid by the results of the simulation and the observation of experimental demonstration.

Key Words: Link Parameters, Accessibility from Overall Direction, Chain of Two Manipulators, Redundant Manipulator, Jacobian Matrix

1. はじめに

一般に、空間で任意の手先位置、姿勢をとるためには 6 DOF (動作自由度) を必要とする。しかし、6 DOF ロボットでもワークの裏側に回り込む動作は構造的に困難である。とくに、ワークに手先を全方向からアクセスさせる必要性は、塗装や溶接作業において高く、ノズルや溶接トーチ等のツールの位置と姿勢を限られた空間内で多様に、しかも連続的に変えることは必ずしも容易でない。このような問題の解決にはいくつかの方法が考えられている。

その 1 つは、冗長自由度の有効利用である。適切な拘束を与えれば空間に障害物がある場合でもそれを利用して障害物を避け、また、ワークの裏側に回り込むこともできる [1]。しかし、1 本の冗長ロボットである場合、アクチュエータ数の増加による構造的複雑さ、ロボット本体重量の増加、さらにはコスト的な問題が発生し、操作能力には限度がある。

その 2 は、従来の溶接ロボットにおけるワークとツールの立場を逆転させる方法である [2]。これは、ツールを固定し、ワ

ークの位置と姿勢を制御する。果物の皮剥き作業で言うならば、刃物を固定して果物を手で回す方法である。

その 3 は、ワークを操る 2 台のロボットの双方を協調させて制御することである。とくに、重量物の研磨作業では一度把持したワークを持ち変えることなく、その位置や姿勢を連続的に制御する必要があり、2 台のロボットは、ワークを介した 1 つの閉じた紐 (チェーン) と見なすことができ、紐の形を制御することが協調制御の内容となる。この場合、1 台当たりのロボットの構造は簡単になる。特異点や関節力配分は文献 [3] に報告されている。

本稿は、第 3 の方法を応用して冗長ロボットを構成し、自由な空間内で目的とする作業を実現するための方法、とくに、ゴルフヘッドの溶接作業のように小さなワークの中心に全方向からアクセスする必要がある作業の実現法について提案する。これまで、複数台のロボットを協調的に制御して作業性能を拡大する例が報告されている [4][5]。例えば、あるワークを掴むロボットと、そのワークに対してツールを介して何らかの働きかけを行うロボットとによる協調作業である。この場合、2 台のロボットは、別々に制御されることが多い。しかし、合計動作自由度数が 7 以上になると、制御量を一意に求めることは困難になる。このため、2 台のロボットの結合が重要となる。

原稿受付 1996 年 1 月 26 日 (旧原稿受付日 1995 年 7 月 24 日)

*新潟大学工学部

*Faculty of Engineering, Niigata University

また、そうすることによって運動学を統一的に扱い、簡便に記述できる効果が生まれる。

そこで、仮想リンクという概念を導入して2台のロボットを1台のロボットに一本化して制御する[6]。このときの運動学を統一的に記述する方法と、冗長性を利用する制御量の計算法について提案する。また、計算機シミュレーションにより制御量を算出し、実際のロボットを制御してその動作を確認し、計算法の有効性を示す。

2. Denavit-Hartenberg 記法

運動学を考える上でリンクの長さ、関節の構成等、ロボットの構造を明確にする必要がある。ここでは、Denavit-Hartenberg 記法（以下DH 記法と書く）に基づき、多関節リンク機構に対し統一的に座標系を設定する[7]。そして、リンクパラメータと呼ばれる4つの変数で各座標系間の変換行列を表現する。

2.1 リンクパラメータ

ロボットを構成するリンクに対して Fig. 1 のように、台座（図では Base）に固定されるリンクを0番として、台座側からハンド側に向かって、1, 2, 3, ... と番号を付ける。関節に対しても同様に、台座に近い側から先端に向かって、1, 2, 3, ... と番号を付ける。関節軸（回転軸または並進軸）方向をZ軸とし、この軸上に各関節の座標原点をとる。また、Fig. 2 のように、リンク*i*のリンク*i-1*からの変位角を θ_i とし、リンク間距離を d_i と定義する。

さらに、 a_i を Z_{i-1} 軸と Z_i 軸間の最短距離とし、 α_i を関節軸のねじれとする。ただし、図中(a)の回転関節では d_i が固定

Fig. 1 Link coordinate system

Fig. 2 Link parameters of the joint *i* which is rotational and prismatic in (a) and (b), respectively

で θ_i が変数である。また、(b)の並進関節では d_i が変数で θ_i は固定される。いずれにおいても直線状のリンクにおいて a_i はリンクの長さに相当する。以上の θ_i , d_i , a_i , α_i をリンクパラメータと呼ぶ。

2.2 リンク座標系

Fig. 1 のように関節*i+1*の回転軸を Z_i 軸とし、この軸上に原点をもつ座標系を Σ_i とする。なお、 Z_i 軸の正方向は並進関節では Fig. 2(b)に示されるように手先に向かう方向である。また、Fig. 2(a)のような回転関節では Z_{i-1} 軸に近い方向とする。 X_i 軸は、 Z_{i-1} 軸と Z_i 軸の共通垂線とし、関節*i-1*から関節*i*を見る方向を正にとる。 Y_i 軸は Z_i 軸と X_i 軸に直交し、右手系をなす。このとき、 Σ_{i-1} から Σ_i への同次変換行列は4つのリンクパラメータに関する基本変換の積として次式で表される。

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(x, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 簡易ロボットの一本化

2台のロボットを一本化する場合のリンクや座標系の統一的表現法について以下に明らかにする。

3.1 記号

一方のロボットの手先に作業に必要なツールを装着し、他方のロボットの手先にワークを把持し、ある種の作業（例えば溶接）を行う場合を考える。本稿では、これら2台のロボットを区別する場合、Fig. 3 のようにそれぞれ、Robot-A, Robot-B と呼ぶ。また、ロボットの動作自由度数、リンクや座標系の表現を容易にするため以下を定義する。

- m : Robot-A の動作自由度数
- n : Robot-B の動作自由度数
- $N(=m+n)$: 一本化する場合の合計動作自由度数
- $q_{Ai}(i=1, \dots, m)$: Robot-A の関節変数
- $q_{Bj}(j=1, \dots, n)$: Robot-B の関節変数
- Σ : 直角座標系
- Σ_w : ワールド座標系
- Σ_{obj} : ワークに固有な座標系
- Σ_0 : Robot-B の手先に固有な座標系
- Σ_e : Robot-A の手先に固有な座標系
- $*T_*$: Σ_* から Σ_* への同次変換行列

Fig. 3 A chain combining two simple manipulators

- * R_* : $*T_*$ の左上 3×3 小行列
- * p_* : Σ_* から見る Σ_* の原点の位置ベクトル
- * $D_{*,\%}$: Σ_* において Σ_* の原点から $\Sigma_{\%}$ の原点を見る方向ベクトル
- * $\dot{p}_*$: Σ_* から見る Σ_* の原点の速度ベクトル
- * ω_* : Σ_* から見る Σ_* の角速度ベクトル

3.2 仮想リンク

2 台のロボットに固有な座標系 Σ_A と Σ_B を Fig. 3 のように定めると、これらはワールド座標系 Σ_w のなかで固定される。作業経路は物体座標系 Σ_{obj} に対して与えられるので、 Σ_{obj} に対するツールの位置や姿勢は同次変換行列を用いて次のように表される。

$${}^{obj}T_T = {}^{obj}T_G {}^G T_B {}^B T_O {}^O T_A {}^A T_H {}^H T_T \quad (2)$$

ただし、 ${}^B T_G$, ${}^A T_H$ は要素内に関節変数を含み、また、 ${}^G T_{obj}$, ${}^O T_B$, ${}^O T_A$, ${}^H T_T$ は定数行列である。1 台のロボットの手先を表す同次変換行列は通常、リンク間の同次変換行列の積で表されるので

$$\begin{aligned} {}^G T_H &= {}^G T_B {}^B T_O {}^O T_A {}^A T_H \\ &= {}^G T_B {}^B T_A {}^A T_H \end{aligned} \quad (3)$$

ここで原点 O_B — O_A 間を一つのリンクと考え、これを仮想リンクと呼ぶ (Fig. 3 参照)。また、この仮想リンクを通常のリンクと考え、Robot-A と Robot-B を動作自由度数 $N=m+n$ を持つ 1 台の多関節ロボットとみなして紐 (Chain) を作る。すなわち、式 (3) を考慮して式 (2) を

$${}^{obj}T_T = {}^{obj}T_G {}^G T_H {}^H T_T \quad (4)$$

と表し、 Σ_{obj} における作業がツールを持つ 1 台のロボットによって操作される状況を想定する。

3.3 一本化されたリンク番号とリンク座標系

Robot-A と Robot-B の 2 台のロボットには一般に、Fig. 1 のようにそれぞれ根元側から個別的リンク番号 $i=0, \dots, m$ と $j=0, \dots, n$ が付けられる。しかし、両者を一本化する場合、Fig. 4 のようにワークを持つ Robot-B の手先側からツールを持つ Robot-A の手先側に向かって通し番号 $0, \dots, n, n+1, \dots, N(N=m+n)$ を付ける。この場合、Robot-A の 0 番リンク、Robot-B の 0 番リンク、及び互いに接続される Base の部分は仮想リンクとなり、 n 番リンクとなる。

リンク座標系に関してもリンクと同様に Robot-B の手先側から Robot-A の手先側に向かって通し番号 $1, \dots, n, n+1, \dots, N(=m+n)$ を付け、 Z_i 軸を関節 i とする。このとき得られる関節変数ベクトルは一本化され、これを q とおくと、

Fig. 4 Combined manipulator with an imaginary link n

$$\begin{aligned} q &= [q_B, q_A]^t \\ q &= [q_{Bn}, \dots, q_{B1}, q_{A1}, \dots, q_{Am}]^t \\ &= [q_1, \dots, q_N]^t \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、 t は行列の転置を意味する。

また、リンク座標系とその運動を直接作り出す関節は次の関係になる。

$$\begin{aligned} \text{リンク座標 } \Sigma_0 &\leftarrow \text{指定} \\ \text{リンク座標 } \Sigma_1 &\leftarrow \text{関節 1} \\ &\vdots \\ \text{リンク座標 } \Sigma_n &\leftarrow \text{関節 } n \\ \text{リンク座標 } \Sigma_{n+1} &\leftarrow \text{関節 } n \\ \text{リンク座標 } \Sigma_{n+2} &\leftarrow \text{関節 } n+1 \\ &\vdots \\ \text{リンク座標 } \Sigma_N &\leftarrow \text{関節 } N-1 \\ \text{リンク座標 } \Sigma_e &\leftarrow \text{関節 } N \end{aligned}$$

ここで、関節 n は Σ_n と Σ_{n+1} の両方の運動を引き起こすことに注意されたい。

4. 協調制御のための逆運動学

リンクパラメータを用いた冗長ロボットの逆運動学について考察する。

4.1 逆運動学

ロボットの手先を与えられた位置、姿勢に一致させるための関節変数の求め方の一つとしてヤコビ行列を用いる方法がある。一般に、ヤコビ行列を J 、手先の位置と姿勢に関する制御ベクトルを p とすると、

$$\dot{p} = J\dot{q} \quad (6)$$

関節変数ベクトル q を求める逆運動学は、

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{p} \quad (7)$$

ただし、 J が正則でない場合、解が存在しないか存在しても一意に定まるとは限らない。冗長ロボットでは J は長方形列であり正則でない。そこで $\|J\dot{q} - \dot{p}\|$ を最小にする問題を考える。その一般解は、次式で与えられる [1]。

$$\dot{q} = J^+ \dot{p} + (I - J^+ J)k \quad (8)$$

ここで J^+ は J の疑似逆行列、 k は任意ベクトルである。式 (8) は第 1 項目で $J\dot{q} = \dot{p}$ 、すなわち式 (6) の位置と姿勢を満たす解を与え、第 2 項目で $J\dot{q} = 0$ を満たす解を与える。つまり J が正則でない場合、 $\dot{p} = 0$ (このときロボット手先の位置、姿勢は不動である) を満たす解 $\dot{q}$ ($\dot{q} \neq 0$) を見つけ、かつ、第 2 項目の任意ベクトル k をある方針のもとで指定する。例えば、指定された障害物を回避するように定める方法 [6] がある。このほか、手先の重力方向変化や各関節の変位和等を最小にする方法が考えられる。

そこで、望ましい動作を行うために、関節角で表されるある種の量 (例えば、各関節値の単純和の逆数) を定める関数を仮定し、その大きさを評価する関数を $V(q)$ とすれば、任意ベクトル k は

$$k = k_p \frac{\partial V(q)}{\partial q} \quad (9)$$

ただし、この場合、 $V(q)$ の値は大きいものほど望ましく、 k_p は任意の正のスカラー定数である。式 (8) は各時刻において上

記評価関数を大きく保つような解 $\mathbf{q}$ を与える。冗長自由度を利用しない場合、すなわち $\mathbf{k}=0$ のとき式(8)は解自身のノルム $\|\dot{\mathbf{q}}\|$ を最小にする解を与える。以上の式は5.3節の計算に効かされる。

4.2 ヤコビ行列の計算法

4.2.1 リンク座標系間の相対速度

各座標系間の相対速度について考える。 Σ_{obj} に対する Σ_0 の角速度 ${}^{obj}\omega_0$ と並進速度 ${}^{obj}\dot{\mathbf{p}}_0$ は、 Σ_0 が Σ_{obj} に固定されることから、

$${}^{obj}\omega_0 = 0 \quad (10a)$$

$${}^{obj}\dot{\mathbf{p}}_0 = 0 \quad (10b)$$

ロボットのリンク座標系間の相対速度について、 I を一本化されるロボットのリンク番号とすると、 Σ_0 に対する Σ_I の角速度 ${}^0\omega_I$ と並進速度 ${}^0\dot{\mathbf{p}}_I$ は、次のように書ける。

$${}^0\omega_I = {}^0\omega_{I-1} + {}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\omega_I \quad (11a)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_I = {}^0\dot{\mathbf{p}}_{I-1} + {}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I + {}^0\omega_{I-1} \times ({}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\mathbf{p}_I) \quad (11b)$$

ただし、 ${}^0\mathbf{R}_{I-1}$ は、 Σ_0 に対する Σ_{I-1} の姿勢の回転行列である。

ここで ${}^{I-1}\omega_I$ 、 ${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I$ は、 Σ_I が Robot-A のリンク座標系であるか、Robot-B のリンク座標系であるか、あるいは仮想リンクのリンク座標系であるかによって変わる。これは3.3節で示したように $I=n+1$ を境として関節とリンク座標系の関係がずれること、 Σ_n と Σ_{n+1} の間に相対的变化がないこと、Robot-B 側のリンク番号は単体の場合と逆に手先方向から付けられることによる。

以下に、(I) $1 \leq I \leq n$ 、(II) $I=n+1$ 、(III) $n+2 \leq I \leq N$ 、(IV) $I=N+1 (=e)$ の各場合についてリンク座標系間の相対速度について検討する。

(I) $1 \leq I \leq n$ の場合

この場合に Σ_{I-1} から Σ_I を見る方向は、Robot-B の手先から台座に向かう方向である。すなわち変換行列 ${}^{I-1}T_I$ は、式(1)の逆行列で与えられる。リンクパラメータを用いると、

$${}^{I-1}T_I = \text{Rot}(x, -a_I) \text{Trans}(-a_I, 0, -d_I) \text{Rot}(z, -\theta_I) \quad (12)$$

と表される。 Σ_I の運動は関節 I によって引き起こされ (Fig. 4 参照)、式(12)を基にして式(2)中の ${}^{obj}T_c$ 、 cT_b 、 bT_0 が定まる。以下、これらが回転関節と並進関節の場合について具体的に検討する (Fig. 5 参照)。

(i) 関節 I が回転関節の場合

関節が回転関節の場合、リンクパラメータ θ_I が関節変数 $\mathbf{q}_I$ となり、 ${}^{I-1}\mathbf{p}_I$ は定数ベクトルとなる。また、 Σ_{I-1} から見る Σ_I の角速度 ${}^{I-1}\omega_I$ は Z_{I-1} の逆方向で大きさ $\dot{\mathbf{q}}_I$ のベクトルであることが式(12)から分かり

$${}^{I-1}\omega_I = -{}^{I-1}\mathbf{R}_I u_z \dot{\mathbf{q}}_I \quad (13a)$$

$${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I = 0 \quad (13b)$$

ただし、 u_z は Z 軸方向を表す列ベクトルを示し、 $u_z = [0, 0, 1]^T$ である。したがって、式(11a)、(11b)より

$${}^0\omega_I = {}^0\omega_{I-1} + {}^0\mathbf{R}_{I-1} u_z \dot{\mathbf{q}}_I \quad (14a)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_I = {}^0\dot{\mathbf{p}}_{I-1} + {}^0\omega_{I-1} \times ({}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\mathbf{p}_I) \quad (14b)$$

(ii) 関節 I が並進関節の場合

この場合にはリンクパラメータ d_I が関節変数 $\mathbf{q}_I$ となる。

Fig. 5 Velocity of the end-effector when the joint I is rotational and prismatic in (a) and (b), respectively

Σ_{I-1} から見る Σ_I の並進速度 ${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I$ は、 Z_I の逆方向で大きさ $\dot{\mathbf{q}}_I$ のベクトルとなることが式(12)から分かり

$${}^{I-1}\omega_I = 0 \quad (15a)$$

$${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I = -{}^{I-1}\mathbf{R}_I u_z \dot{\mathbf{q}}_I \quad (15b)$$

式(15a)、(15b)を式(11a)、(11b)に代入して

$${}^0\omega_I = {}^0\omega_{I-1} \quad (16a)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_I = {}^0\dot{\mathbf{p}}_{I-1} - {}^0\mathbf{R}_{I-1} u_z \dot{\mathbf{q}}_I + {}^0\omega_{I-1} \times ({}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\mathbf{p}_I) \quad (16b)$$

(II) $I=n+1$ の場合

Σ_n と Σ_{n+1} は両者とも仮想リンク n に固定されており、一定の関係にあることから、 ${}^n\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = 0$ となる。したがって、

$${}^0\omega_{n+1} = {}^0\omega_n \quad (17a)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = {}^0\dot{\mathbf{p}}_n + {}^0\omega_n \times ({}^0\mathbf{R}_n {}^n\mathbf{p}_{n+1}) \quad (17b)$$

ただし、仮想リンクが並進関節の場合、 ${}^n\dot{\mathbf{p}}_{n+1} \neq 0$ となり、次式が有効となる。

$${}^0\omega_{n+1} = {}^0\omega_n \quad (17c)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = {}^0\dot{\mathbf{p}}_n + {}^0\mathbf{R}_n {}^n\dot{\mathbf{p}}_{n+1} + {}^0\omega_n \times ({}^0\mathbf{R}_n {}^n\mathbf{p}_{n+1}) \quad (17d)$$

(III) $n+2 \leq I \leq N$ の場合

Σ_I の運動は関節 $I-1$ によって引き起こされる。この場合の変換行列は、(I)と同様、回転関節と並進関節とに分けて考えられる (Fig. 5 参照)。

(i) 関節 $I-1$ が回転関節の場合

Σ_{I-1} から見る Σ_I の角速度 ${}^{I-1}\omega_I$ は、 Z_{I-1} 方向の大きさ $\dot{\mathbf{q}}_I$ のベクトルであり、また、 ${}^{I-1}\mathbf{p}_I$ は角速度 ${}^{I-1}\omega_I$ で Z_{I-1} 軸周りに回転するので、

$${}^{I-1}\omega_I = u_z \dot{\mathbf{q}}_{I-1} \quad (18a)$$

$${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I = {}^{I-1}\omega_I \times {}^{I-1}\mathbf{p}_I \quad (18b)$$

したがって、式(11a)、(11b)より

$${}^0\omega_I = {}^0\omega_{I-1} + {}^0\mathbf{R}_{I-1} u_z \dot{\mathbf{q}}_{I-1} \quad (19a)$$

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_I = {}^0\dot{\mathbf{p}}_{I-1} + {}^0\omega_{I-1} \times ({}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\mathbf{p}_I) \quad (19b)$$

(ii) 関節 $I-1$ が並進関節の場合

Σ_{I-1} から見る Σ_I の並進速度 ${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I$ は Z_{I-1} 方向の大きさ $\dot{\mathbf{q}}_I$

のベクトルであるので

$${}^{I-1}\omega_I = 0 \quad (20 \text{ a})$$

$${}^{I-1}\dot{\mathbf{p}}_I = {}^u \mathbf{z}_I \dot{\mathbf{q}}_I \quad (20 \text{ b})$$

式(11 a), (11 b)より

$${}^0\omega_I = {}^0\omega_{I-1} \quad (21 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} {}^0\dot{\mathbf{p}}_I &= {}^0\dot{\mathbf{p}}_{I-1} + {}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^u \mathbf{z}_I \dot{\mathbf{q}}_I \\ &\quad + {}^0\omega_{I-1} \times ({}^0\mathbf{R}_{I-1} {}^{I-1}\mathbf{p}_I) \end{aligned} \quad (21 \text{ b})$$

(IV) $I=e$ の場合

Σ_e の運動は関節 N によって引き起こされ、 Σ_e の Σ_N に対する相対速度は上記(III)と同様の考え方によって導かれる。

(i) 関節 N が回転関節の場合

Σ_N から見る Σ_e の角速度 ${}^N\omega_e$ は Z_N 軸方向の大きさ $\dot{\mathbf{q}}_N$ のベクトルで、 ${}^N\mathbf{p}_e$ は角速度 ${}^N\omega_e$ で Z_N 軸周りに回転するので、

$${}^N\omega_e = e_z \dot{\mathbf{q}}_N \quad (22 \text{ a})$$

$${}^N\dot{\mathbf{p}}_e = {}^N\omega_e \times {}^N\mathbf{p}_e \quad (22 \text{ b})$$

(ii) 関節 N が並進関節の場合

Σ_N から見る Σ_e の並進速度 ${}^N\dot{\mathbf{p}}_e$ は Z_N 方向の大きさ $\dot{\mathbf{q}}_N$ のベクトルであるので

$${}^N\omega_e = 0 \quad (23 \text{ a})$$

$${}^N\dot{\mathbf{p}}_e = {}^u \mathbf{z}_N \dot{\mathbf{q}}_N \quad (23 \text{ b})$$

4.2.2 ヤコビ行列の一般的な表現

前項(4.2.1)の考察結果を用いて、ヤコビ行列の一般的表現を求める。 Σ_{obj} から見る手先座標系 Σ_e の速度は、式(10)、(23)を考慮して次のように計算される (Fig. 4, 5 参照)。

$$\begin{aligned} {}^{\text{obj}}\omega_e &= {}^{\text{obj}}\omega_0 + {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 {}^0\omega_N + {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_N {}^N\omega_e \\ &= {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 {}^0\omega_N \end{aligned} \quad (24 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} {}^{\text{obj}}\dot{\mathbf{p}}_e &= d/dt({}^{\text{obj}}\mathbf{p}_0 + {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{p}_N + {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_N {}^N\mathbf{p}_e) \\ &= {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 ({}^0\dot{\mathbf{p}}_N + {}^0\omega_N \times {}^N\mathbf{p}_e) \end{aligned} \quad (24 \text{ b})$$

例えば、 N 個の関節全てが回転関節の場合には、式(14)、(17)、(19)より式(24 a)、(24 b)は、

$$\begin{aligned} {}^{\text{obj}}\omega_e &= {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 \sum_{i=1}^N s(i) {}^0\mathbf{R}_i {}^u \mathbf{z}_i \dot{\mathbf{q}}_i \\ &= \sum_{i=1}^N s(i) {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_i {}^u \mathbf{z}_i \dot{\mathbf{q}}_i \end{aligned} \quad (25 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} {}^{\text{obj}}\dot{\mathbf{p}}_e &= {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_0 \sum_{i=1}^N \left[s(i) ({}^0\mathbf{R}_i {}^u \mathbf{z}_i \dot{\mathbf{q}}_i) \times \left(\sum_{j=1}^N {}^0\mathbf{R}_j {}^j\mathbf{p}_{j+1} \right) \right] \\ &= \sum_{i=1}^N \left[s(i) ({}^{\text{obj}}\mathbf{R}_i {}^u \mathbf{z}_i \dot{\mathbf{q}}_i) \times \left(\sum_{j=1}^N {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_j {}^j\mathbf{p}_{j+1} \right) \right] \end{aligned} \quad (25 \text{ b})$$

ただし、 ${}^N\mathbf{p}_{N+1} = {}^N\mathbf{p}_e$ とし、 $s(i)$ は次の値をとる 2 値関数である。

$$s(i) = \begin{cases} -1, & 1 \leq i \leq n \\ 1, & n+1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (26 \text{ a})$$

$$(26 \text{ b})$$

ゆえに

$${}^{\text{obj}}\mathbf{z}_I \equiv {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_I {}^u \mathbf{z}_I \quad (27)$$

$$\begin{aligned} {}^{\text{obj}}\dot{\mathbf{D}}_{I,e} &\equiv {}^{\text{obj}}\dot{\mathbf{p}}_e - {}^{\text{obj}}\mathbf{p}_I \\ &= \sum_{j=1}^N {}^{\text{obj}}\mathbf{R}_j {}^j\mathbf{p}_{j+1} \end{aligned} \quad (28)$$

とおくと、ヤコビ行列の I 列目 J_I が次のように求まる。

$$J_I = s(I) \begin{bmatrix} {}^{\text{obj}}\mathbf{z}_I \\ {}^{\text{obj}}\dot{\mathbf{D}}_{I,e} \end{bmatrix} \quad (29)$$

さらに、回転関節と並進関節が混在する一般の場合についても同様にして考えると

Fig. 6 Exterior sketch of the combined manipulation system

$$J_I = \begin{cases} s(I) \begin{bmatrix} {}^{\text{obj}}\mathbf{z}_I \times {}^{\text{obj}}\mathbf{D}_{I,e} \\ {}^{\text{obj}}\mathbf{z}_I \end{bmatrix} \text{Rotational } J. \\ s(I) \begin{bmatrix} {}^{\text{obj}}\mathbf{z}_I \\ 0 \end{bmatrix} \text{Prismatic } J. \end{cases} \quad (30 \text{ a})$$

$$(30 \text{ b})$$

したがって、

$${}^{\text{obj}}T_I = \begin{bmatrix} {}^{\text{obj}}x_I & {}^{\text{obj}}y_I & {}^{\text{obj}}z_I & | & {}^{\text{obj}}\mathbf{D}_{I,e} \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

また、 J_I は、 ${}^{\text{obj}}T_I$ ($I=1, 2, \dots, N$) から算出できる。Robot-A がツールを持つ場合には Σ_e をツールに固有な座標系 Σ_T に設定すれば対応できる (Fig. 6 参照)。

5. シミュレーションによる制御量計算の妥当性の検証

制御量を具体的に求めるための計算機シミュレーションについて述べる。

5.1 システムモデル

Robot-A として、三菱ムーブマスター EX; RV-M1 をモデルにした。このロボットは、それぞれウェスト、ショルダ、エルボ、リストピッチ、リストロールの 5 軸周りに回転できる。よって手先を作業範囲内で任意の位置に動かす場合、姿勢の自由度は 2 であり、ピッチ角とロール角しか動かせない。

一方、Robot-B は、Robot-A の姿勢制御能力の低さを補完するための互いに直交する 2 つの回転軸からなる 2 DOF ロボットである。1 本化した Robot-A と Robot-B の外観モデルは、Fig. 6 に示される。

5.2 リンクパラメータと座標系

取り上げる 2 台のロボットのリンク構造は Fig. 7 に示され、それぞれ Table 1, Table 2 で表される固有のパラメータを有する。

Fig. 7 において Robot-A は、手先にツールを持ち、2 台のロボットは水平面上に設置される。このとき、 Σ_0 から Σ_T をみる変換行列は式(2)で表されるが、次のようにも表される。

$${}^{\text{obj}}T_T = [{}^G T_{\text{obj}}]^{-1} {}^G T_B [{}^0 T_B]^{-1} {}^0 T_A {}^A T_H {}^H T_T \quad (32)$$

ただし、 ${}^0 T_A$, ${}^0 T_B$, ${}^H T_T$, ${}^G T_{\text{obj}}$, ${}^N T_{n+1}$ の同次変換行列は付録を参照されたい。

5.3 計算機シミュレーション

関節変数 $\mathbf{q}$ を計算するにあたり、式(8)の微分形を次の差分形にして扱う。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{q} &= \mathbf{J}^+ \Delta \mathbf{p} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \mathbf{k} \\ &= \Delta \mathbf{q}_1 + \Delta \mathbf{q}_2 \end{aligned} \quad (33)$$

Table 1 Link parameters of the Robot-A

link	variable	θ [rad]	d [mm]	a [mm]	α [rad]
1	θ_{A1}	$\theta_{A1} + \pi/2$	300	0	$\pi/2$
2	θ_{A2}	θ_{A2}	0	250	0
3	θ_{A3}	θ_{A3}	0	160	0
4	θ_{A4}	$\theta_{A4} + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
5	θ_{A5}	θ_{A5}	72	0	0

Table 2 Link parameters of the Robot-B

link	variable	θ [rad]	d [mm]	a [mm]	α [rad]
1	θ_{B1}	θ_{B1}	198	0	$-\pi/2$
2	θ_{B2}	θ_{B2}	-45	0	0

Fig. 7 Control variables of the combined manipulator **Fig. 8** Flow chart for calculating the control variables

ただし,

$$\Delta q_1 = J^+ \Delta p \quad (34a)$$

$$\Delta q_2 = (I - J^+ J) k \quad (34b)$$

冗長自由度を利用する際の望ましい解を得るため、**Fig. 8**の手順を踏む。まず、 q の初期値 q^0 と、 k の値を決める式(9)の評価関数 $V(q)$ を定める。そして、第一段階として、 Δq_2 を定める。また、第二段階として、 Σ_0 と無関係な Σ_{obj} 上のワークに与えられる軌道から Δp を計算し、手先を目標の位置姿勢に一致させる。そして、 Δq_1 を計算し、 $\Delta q (= \Delta q_1 + \Delta q_2)$ を算出する。さらに、 q の値を $q + \Delta q$ に更新する。 q の更新手続きは評価関数 $V(q)$ が十分大きくなるまで続けられる。実際には第一、第二段階の計算手続きを繰り返し続ける[2]。なお、

Fig. 9 A curve located on a bulb in the simulation **Fig. 10** Direction of the tool in the welding task

Fig. 8 中のしきい値 ϵ は大きいほど良いが、実験的に定めるものとする。

全方向からアクセスする必要のある作業のシミュレーションにおいて、作業経路を**Fig. 9**の半楕円体の表面上を通る螺旋形と定めた。ツールの姿勢は**Fig. 10**に示すように、 Σ_T のX軸を軌道の接線ベクトル方向に、また、Z軸を接線ベクトルに対して $\pi/4$ [rad]の角度を保つようにした。これは、ゴルフヘッドの溶接作業を想定したことによる。さらに、ロボットの関節変数の初期値[rad]として $q^0 = [0.147, 0.028, 0.081, 0.727, -1.533, -0.032, -0.033]$ を採用する。

冗長自由度を利用しない場合と利用する場合の制御動作のシミュレーションを比較するにあたり、式(8)において $k=0$ とする場合を冗長自由度の利用なしと見なす。まず、次式によって可操作度を大きくするように冗長自由度を利用する場合を上げる。

$$V(q) = \sqrt{\det(J(q)J^T(q))} \quad (35)$$

前者と後者のアームの動きの結果は、それぞれ**Fig. 11**と**Fig. 12**に示される。ただし、図中の(a)～(f)は一連の動作中からピックアップした6つの姿勢を3次元的に表す。両者の間に大きな違いのあることが分かる。可操作度の変化の様子は、**Fig. 13**に示される。**Fig. 13**から冗長性を利用する場合、上側グラフとなり、可操作度が大きくなることが分かる。

さらに、ワールド座標系から見る2台のロボットの手先位置変動を小さくするように冗長自由度を利用する場合、個々のロボットの動作に着目し、別々の制御方式を採る。そして、Robot-A, Robot-Bに別々の評価関数 $V_A(q_A)$ と $V_B(q_B)$ を指定する。このとき、式(34b)の任意ベクトル k は次で表される。

$$k = \begin{bmatrix} k_B \frac{\partial V_B(q_B)}{\partial q_B} \\ k_A \frac{\partial V_A(q_A)}{\partial q_A} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Fig. 11 Results of the task under $k=0$ in the simulation

Fig. 12 Results of the task utilizing redundancy in the simulation

ただし, k_A , k_B は正の任意の定数である.

実際に式(36)を用いて, ワールド座標系に対して Robot-A, Robot-B の手先位置変動を小さく制御する場合, 評価関数 V_A と V_B を次式で定める.

$$V_A(\mathbf{q}) = \sqrt{({}^0x_A - {}^0x_{A0})^2 + ({}^0y_A - {}^0y_{A0})^2 + ({}^0z_A - {}^0z_{A0})^2} \quad (37 \text{ a})$$

Fig. 13 Manipulability of the combined manipulator

Fig. 14 Results of the task utilizing the functions $V_A(\mathbf{q})$ in Eq.(37 a), and $V_B(\mathbf{q})$ in Eq.(37 b)

$$V_B(\mathbf{q}) = \sqrt{({}^0x_B - {}^0x_{B0})^2 + ({}^0y_B - {}^0y_{B0})^2 + ({}^0z_B - {}^0z_{B0})^2} \quad (37 \text{ b})$$

ただし, ワールド座標系 Σ_o で見る Robot-A の手先の初期位置と現在位置, Robot-B の手先の初期位置と現在位置, をそれぞれ $({}^0x_{A0}, {}^0y_{A0}, {}^0z_{A0})$, $({}^0x_A, {}^0y_A, {}^0z_A)$, $({}^0x_{B0}, {}^0y_{B0}, {}^0z_{B0})$, $({}^0x_B, {}^0y_B, {}^0z_B)$ とする. このときのシミュレーション結果を Fig. 14 に示す. 図中の (a) ~ (f) は, Fig. 11, 12 と同様, 一連のアーム動作中から 6 つの制御結果を取り出したものである. A と B のロボットとも手先位置の変動が小さくなるのが分かる.

このほか, 運動部を特定の関節に集中させない制御法も考えられる. この方法は, ロボットの各関節回転動作速度に差がない場合, 手先の微小変化毎の関節の最大制御角の和を最小にするように制御量を決定することによって, 作業時間の短縮化に役立つ. このことは, シミュレーションでも確認され, Fig. 11, 12, 14 と異なる結果となった. ただし, 詳細な運動軌跡については省略する.

Fig. 15 Overview of the combined manipulators performing the tracing task

6. 動作確認の実験

三菱ムーブマスター EX; RV-M1 の 5 DOF ムーブマスターを Robot-A とし、また、2 個のパルスモーターで駆動される直交回転装置を Robot-B として動作確認の実験をした。Fig. 15 は、実験中のロボットの外観である。Robot-A は RS-232 C インターフェイスを介して、また、Robot-B は GP-IB インターフェイスを介して 1 台のパソコン (PC-9801) で制御される。制御プログラムの概略は、初期設定、コマンド送信、動作終了の確認の 3 つに大別される。コマンド送信部はさらに、Robot-A に関する部分、Robot-B の回転台に関する部分に分けられる。ロボットを連続的に動かす場合、コマンド送信と動作終了確認とが繰り返し行われる。

細かな作業動作の例として 3 枚の曲板で仮付けされたゴルフヘッドの溶接作業への応用を念頭に、Fig. 9 に示される局面上の線に沿ってトーチを倣わせる作業を取上げた。ただし、溶接線は次式で与えられるものである。

$$x = b \cos(\alpha/4) \sin(c\alpha) \quad (38a)$$

$$y = a \sin(\alpha/4) \quad (38b)$$

$$z = b \cos(\alpha/4) \cos(c\alpha) \quad (38c)$$

式中、 $a = 4.68[\text{cm}]$ 、 $b = 4.63[\text{cm}]$ 、 $c = 4$ 、 $0 < \alpha < 2\pi[\text{rad}]$ を採用した。

実験の結果は、シミュレーションで得た結果とほぼ同じ動作となることを確認した。上記溶接線を倣う時間は、約 2 分であった。この時間は、試作した Robot-B の関節記号 θ_{B1} の回転速度 $\pi/6[\text{rad/s}]$ が他と比べて遅いことに原因したと考えられる。

7. ま と め

2 台の簡易ロボットを結合する台座の一部を仮想リンクとみなして 2 台のロボットを一本化し、得られる冗長性を利用して全方向からアクセスする必要のある作業の実現法を示した。そ

の結果、少ない自由度のロボットでも 2 台を協調させることによってスペースをとらない細かな作業を実現できることを示した。さらにリンクパラメータを用いた統一の手順でヤコビ行列を計算する方法を示し、また、協調的に制御するための冗長性の利用法として、

- 1) 可操作度を最大にする、
 - 2) 2 つ手先位置変動量を小さくする、
 - 3) 運動部を特定の関節に集中させない、
- を取上げ、それぞれ効果のあることを確認した。

ワークとツール間の幾何学的拘束条件は、作業内容によって指定され、作業中においてはワークを支持するロボット B とツールを保持するロボット A のうちのいずれか一方が主動性を持ち、他方は固定、あるいは半固定的に動かされる場合が多い。この場合に発生するワークへの全方向からのアクセス能力の低下を解消する方法として、ロボット作業の初期状態を与えた後、A と B のロボットを区別せずに協調制御を実現する方法を明らかにした。これにより、ゴルフヘッドの溶接作業のように全方向からアクセスする必要のある作業を自動化できる見通しを得た。ただし、作業動作に高速性が要求される場合には動的協調制御が必要となり、加速度を考慮した制御量の計算を検討することが今後必要である。

本論文ではロボットの根元はワールド座標系に固定されているものとしたが、仮想リンクが関節付きリンクとなる場合でもロボットを一本化する考えは応用できる。例えば 2 台のロボットの根元がある線上を移動する場合、仮想リンクは並進関節によって接続されている、と考えられる。したがって、2 つのロボットの台座自体が移動する場合、広くは仮想リンクが並進と回転の複合関節となる場合の検討が今後の課題となる。

さらに、ロボットの初期姿勢は以後の制御量の計算に大きく影響するので、適切な初期制御量の与え方も今後の課題として挙げられる。

参 考 文 献

- [1] 吉川恒夫：ロボット制御基礎論。コロナ社、1988。
- [2] 桧野、石見、真鍋：“冗長性を利用したロボットの協調制御の一手法”，第 7 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 659-660，1989。
- [3] V. Kumar and J. F. Gardner：“Kinematics of Redundant Actuated Closed Chains,” IEEE Trans. on RA, vol. 6, no. 2, pp. 269-274, 1990。
- [4] 山本、黒田、毛利：“複数台ロボットによる協調作業経路計画”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 2, pp. 217-226, 1993。
- [5] 笠上、石松、藤田：“協調動作を行うティーチング・プレイバックロボットの制御方式”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 1, pp. 165-170, 1993。
- [6] 岡田、山崎：“自由度補完による 2 つのマニピュレータの協調制御”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '94 講演論文集，pp. 1266-1269, 1994。
- [7] 内山：“ロボットアームの機構とその解析”，計測と制御，vol. 25, no. 1, pp. 7-14, 1986。

<付 録>

同次変換行列 0T_A , 0T_B , ${}^H T_T$, ${}^G T_{\text{obj}}$, ${}^n T_{n+1}$ は、Table 1, 2 のデータを使って DH 記法により次のように表される。

$${}^oT_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 350 \\ 0 & 1 & 0 & 400 \\ 0 & 0 & 1 & 48 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$${}^oT_B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 350 \\ 1 & 0 & 0 & 730 \\ 0 & 0 & 1 & 21 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A2)$$

$${}^HT_T = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & -102 \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 102 \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A3)$$

$${}^cT_{\text{obj}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 89 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A4)$$

$${}^nT_{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A5)$$

ただし, $\beta = 47\pi/180[\text{rad}]$ である.

岡田徳次 (Tokuji Okada)

1947年3月5日生。1969年新潟大学工学部電気工学科卒業。同年現電子技術総合研究所に入所。知能ロボットシステムの研究に従事。1987年7月新潟大学工学部に出向。現在情報工学科教授。工学博士。ロボティクス、インテリジェントセンサ等の研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、電子情報通信学会、IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)

三村宣治 (Nobuharu Mimura)

1955年5月16日生。1980年大阪大学大学院博士前期課程修了。同年(株)豊田中央研究所入社。1992年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。1995年より新潟大学助教授。現在に至る。工学博士。多自由度ロボットハンドおよびパラレルマニピュレータの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

山崎充弘 (Mitsuhiro Yamazaki)

1971年2月15日生。1993年新潟大学工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院修士課程情報工学専攻修了。同年(株)不二越入社。現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)