ロボットアームの4関節手首機構†

吉川恒夫*・桐山茂生*

Four Joint Wrist Mechanism for Robot Manipulators

Tsunao YOSHIKAWA* and Shigeo KIRIYAMA*

1. 緒 言

ロボットの適用分野が広がり、手先効果器の姿勢に対しても高度な制御が要求されるようになるにつれてロボットアームの手首機構に関する研究の必要性も強くなってきている。花房ら¹⁾は通常のロボットアームの先端に取り付けることによって手先姿勢を、手先位置とは独立に動かせるようにした付加的手首機構を提案した。そしてこの手首機構は、手先方向がアーム先端の方向に一致する姿勢のときを除いては、任意方向に姿勢を操作できることを述べた。しかし、動作範囲のほぼ中央にあたるこの姿勢で操作能力が落ちることは望ましくない。Paul と Stevenson²⁾はアーム先端部の回転3自由度を姿勢制御用とみなした場合に、いかなる関節軸配置のものでも、ある関節角の組み合わせに対してヤコビ行列が退化するいわゆる特異状態が存在し、かつその近傍において姿勢操作能力が低下することを示した。

この姿勢操作能力の低い領域の存在に対処する一つの方法は、姿勢制御用自由度を4以上に増加させることである。本論文ではこのような考えのもとに、4自由度をもつ手首機構を提案する。以下ではまず提案する手首機構の基本構成を述べ、可操作度の概念^{3),4)}にもとづいてその操作能力を解析する。ついで擬似逆行列を用いた制御方式³⁾を適用することによって、良好な操作性を保ちながら手首姿勢制御が行えることをシミュレーションによって示す。

2. 4自由度手首機構の基本構成と可操作度

提案する4自由度手首機構の基本構成を Fig. 1 に

示す。(a)に示したように第2リンクの長さが0になっており、これは(b)のようにユニバーサル・ジョイントの両端に、リンクの長さ方向の回転関節を付けたものと解釈することがわかり良い。この構成の特徴は、手先の姿勢が与えられるとその位置が一意に定まること、そして手先の姿勢および位置をまったく変化させずに、ユニバーサル・ジョイント部を回転させることである。以下では手先姿勢の変化によって生じる手先位置の変化は、手首機構を取り付けてあるアーム部で補償を行うものとし、手首機構は姿勢のみを制御すればよいものとして話を進める。

この手首機構の姿勢に関する可操作度を調べよう。まずリンクに固定された座標系 Σ_i を Fig. 1(b) に示すように割り当てる。ついで、Denavit-Hartenberg の記法によって、これらの座標系間の変換行列を、図の状態を基準状態として表すと、

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & c_1 & -s_1 & 0 \\ 0 & s_1 & c_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \hat{l}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & c_2 & -s_2 & 0 \\ 0 & s_2 & c_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & c_3 & -s_3 & 0 \\ 0 & s_3 & c_3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \hat{l}_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。ただし $\theta_i (i=1, 2, 3, 4)$ は第 i 関節の関節角とし、 $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$ とする。また $\hat{l}_i$ は図に示したリンク長さである。(1)式より、Paul の方法⁵⁾によって、先座標系 Σ_4 の座標軸まわりの回転速度 $\dot{\phi} = [\dot{\phi}_x, \dot{\phi}_y, \dot{\phi}_z]^T$ (T は転置を表す) と、関節角速度 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4]^T$ の関係を求めると、

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

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} c_2 s_3 s_4 - s_2 c_4 & c_3 s_4 & c_4 & 0 \\ c_2 s_3 c_4 - s_2 s_4 & c_3 c_4 & -s_4 & 0 \\ c_2 c_3 & -s_3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。このヤコビ行列 $J(\theta)$ に対する可操作度 $w(\theta) = \sqrt{\det J(\theta) J^T(\theta)}$ は、状態 θ において $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ の条件のもとに実現しうるあらゆる $\dot{\phi}$ の集合の、3次元ユークリッド空間での体積に比例する。

† 第27回自動制御連合講演会で発表 (昭59・11)

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji
(Received June 19, 1984)

(Revised December 12, 1984)

Key Words: robotics, wrist mechanism, manipulability, redundant robot, singularity avoidance

Fig. 1 4 joint wrist mechanism

Photo. 1 Prototype joint wrist mechanism

クリッド空間内の体積を表し^{3),4)}, 姿勢操作能力の一つの目安となる。(3)式より

$$w(\theta) = \sqrt{2(1 + s_2^2 s_3^2)} \quad (4)$$

が得られる。

手先姿勢が与えられたときに, その姿勢を保つような種々の関節角 θ の値に対して, 可操作度がどの範囲で変わり得るかを調べよう。手先座標系 Σ_4 と基準座標系 Σ_0 の関係は, $T = A_1 A_2 A_3 A_4$ より計算でき, この T より z_4 軸の Σ_0 に対する方向余弦が $[c_1 s_2 c_3 + s_1 s_3, s_1 s_2 c_3 - c_1 s_3, c_2 c_3]^T$ で与えられる。したがって z_4 軸と z_0 軸のなす角度を β とすると,

$$\cos \beta = c_2 c_3 \quad (5)$$

となる。(4), (5)式より, 任意に与えられた β に対して可操作度 $w(\theta)$ は,

$$\sqrt{2} \geq w(\theta) \geq \sqrt{2[1 - (1 - |\cos \beta|)^2]} \quad (6)$$

を満足し, かつ $s_2 = 0$ または $s_3 = 0$ のとき最大値 $w_{\max} = \sqrt{2}$ をとり, $c_2^2 = c_3^2 = |\cos \beta|$ のとき最小値, $w_{\min} = \sqrt{2[1 - (1 - |\cos \beta|)^2]}$ をとる。この $w_{\max}, w_{\min}$ を β の関数として座標形式で Fig. 2 に示す, 図より $\beta = 90^\circ$ 付近で, 関節角によって可操作度が良くも悪

Fig. 2 Maximum and minimum values of manipulability measure

くもなり得ることがわかる。したがって, 提案した 4 自由度手首機構においては, 任意の姿勢に対して関節角を適切に選べば可操作度を最大値 $\sqrt{2}$ とすることができ, 3 自由度の手首では避けることのできなかった, 操作性の低下を防ぎ得る可能性を有する。

具体的な設計にあたっては, 以下の配慮を行うのが良いと思われる。

- 1) 姿勢の変化による手先位置の変化をなるべく小さくするために l_4 を短くする。
- 2) 作業領域 (取り得る姿勢の範囲) をなるべく大きくするため, θ_2 の許容動作度をプラス側に大きくとる。これは θ_2 をマイナス側に動かす必要がある場合には, θ_1 を 180° 回転させ θ_2 のプラス側への動きに変えればよいという考えにもとづく。

以上の考察にもとづいて試作した手首機構を,

Photo. 1 に示す。第 2, 3 関節には差動ギアを用いており, その駆動用 DC サーボモータは手先のじやまにならないよう $-\theta_2$ 側の根元近くに配置し, チェインベルトでトルクを伝達している注 1)。

3. 4 自由度手首機構の制御

前節で述べた手首機構で, 与えられた目標姿勢を実現しつつ, その冗長性を利用して, (a) 可操作度をなるべく大きく保ち, (b) θ_2 をプラス側にもってゆくことによって, 作業領域を広く保ち, そして (c) 各関節角を作動範囲内に保つように制御することを考える。

(注) この装置は実用化されているロボットの手首部に比較して相当大きい, アーム部との一体化などの工夫によって, かなり小型化できるものと考えられる。

Fig. 3 Comparison of control policies with and without manipulability consideration

Fig. 4 Simulation result of motion in the direction of minuss θ_x

このために擬逆行列を用いた速度制御方式を採用する。

$\dot{\phi}$ の目標値が与えられたとき、(2)式の一般解は

$$\dot{\theta} = J^+(\theta)\dot{\phi} + [I - J^+(\theta)J(\theta)]k \quad (7)$$

で与えられる。ここで $J^+(\theta)$ は $J(\theta)$ の擬逆行列、 k は任意の4次元ベクトルである。 $\dot{\phi}$ を実現した上で、あらかじめ与えられた評価関数 $q(\theta)$ をなるべく大きくするためには、この k を

$$k = \xi k_1, \quad \xi = dq(\theta)/d\theta \quad (8)$$

と定めればよいことが知られている³⁾。ここで k_1 は適当な定数である。

4 自由度手首機構の場合の評価関数は、上述の三つの目的を考えて以下のようになる。

$$q(\theta) = h_a w(\theta) + h_b \theta_2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 h_{ci} \left\{ \frac{1}{(\theta_i - \bar{\theta}_i)^2} + \frac{1}{(\theta_i - \underline{\theta}_i)^2} \right\} \quad (9)$$

ここで、 h_a , h_b , h_{ci} は適当な定数であり、 $\bar{\theta}_i$, $\underline{\theta}_i$ は θ_i に対する作動角の上、下限である。

(7), (8), (9)式による制御方策が有効かどうかを見るために、計算機シミュレーションを行った。その結果を以下に示す。簡単のため手首機構の動特性を無視し、算出された目標関節速度 $\dot{\theta}$ は完全に実現されるものとした。サンプリング時間は0.05秒とし、

$$\bar{\theta}_2 = 140^\circ, \quad \underline{\theta}_2 = -110^\circ$$

$$\bar{\theta}_3 = -\underline{\theta}_3 = \begin{cases} 180, & 90^\circ \leq \theta_2 \leq 140^\circ \\ \{3(\theta_2 - 90)/8 + 100\}, & -110^\circ \leq \theta_2 < 90^\circ \end{cases}$$

$$k_1 = 1, \quad h_a = 3, \quad h_b = 20, \quad h_{c2} = h_{c3} = 1, \quad h_{c1} = h_{c4} = 0$$

とした。手先姿勢の目標軌道は、基準座標系 Σ_0 におけるオイラー角 α , β , γ の角速度で与えた。Fig. 3 (a)の実線は Fig. 3 (b)の初期状態 $\theta = [0, 90, -45, 0]^T$ から $\dot{\alpha} = 30(\text{deg/sec})$ で z_0 軸まわりに回転させた場合の可操作度の変化を示す。図の破線は(7)式で $k=0$ とおいた制御方策を用いた場合であるが、これに比較して特異状態を避け、可操作度を良好に保っている様子がわかる。

Fig. 4は、(a)の初期状態 $\theta = [0, -10, 5, 0]^T$ から $\dot{\beta} = 15(\text{deg/sec})$ の指令が与えられた場合の結果である。指令は θ_2 のマイナス側に向かうものであるが、 θ_1 が約 180° 回転して θ_2 のプラス側に向きを変えている様子がわかる。

以上のシミュレーション結果から、満足のゆく制御が行えるという見通しを得た。現在 Photo. 1 の試作手首機構に上述の制御アルゴリズムを適用すべく準備を進めている。おわりに日頃ご指導いただく京都大学工学部花房秀郎教授、ならびに手首機構の試作に御協力いただいた新明和工業(株)に謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Hanafusa, T. Yoshikawa and Y. Nakamura: Design and Control of Additional Wrist Mechanism for Fine Motion Control of Manipulators, Prep. IFAC Sympo. Components and Instruments for Distributed Control Systems (1982)
- 2) R.P. Paul and C.N. Stevenson: Kinematics of Robot Wrists, International Journal of Robotics Research, 1-2, 31/38 (1983)
- 3) T. Yoshikawa: Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy, Prep. 1st International Sympo. of Robotics Research (1983)
- 4) 吉川：ロボットアームの可操作度，日本ロボット学会誌，2-1, 63/67 (1984)
- 5) R.P. Paul: Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, MIT Press, Massachusetts (1981) (吉川訳：ロボット・マニピュレータ，コロナ社)