

冗長度と力感覚を有する人間腕形マニピュレータの機構と制御

機械技術研究所

中野栄二

II. 緒言

人間の手と現在のロボットの手を比較したとき、作業性能や汎用性という点から見て、その優劣は誰の目にも明らかである。現在のロボットの手が人間の手に劣る原因として、(1) 知能が足りない、(2) 触・圧覚等の感覚の機能がある、また視覚の援助が不十分か全くない、(3) 筋肉、神経、骨、その他構成要素のすべてがある、(4) 腕の構造が悪い、(5) 制御方法がある、等が考えられる。

これらのうち、(1) の知能に関しては、現在のところコンピュータを使う以外に、(3) の各構成要素に関しても、材料等の進歩にまつ要素が多い。というわけで、ロボット研究者の努力は大部分、(2) の感覚、(5) の制御方法に集中されてきた感がある。もっとも、(4) の腕の構造に関しても、いかに自由度を配置したら作業あるいは制御がやりやすくなるかという点に関して様々の試みかなされてきてはいたが、その場合、考慮の対象としての自由度は、6以下であることが殆んどであった。

一般に、空間上の手先が届く範囲内の任意の位置に機

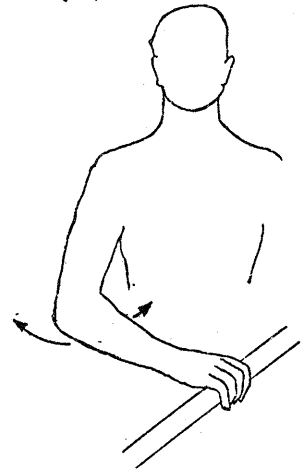


図1 人間の肘の動き

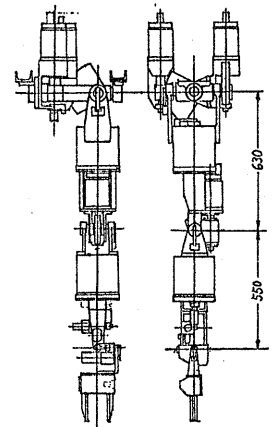


図2 メラームの設計図

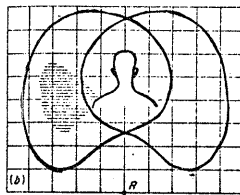
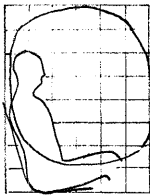
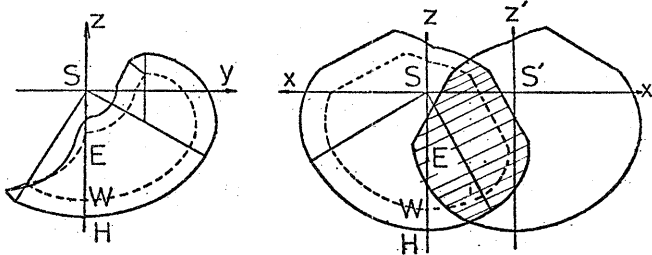


図4 メラームと人間の手の動作範囲の比較

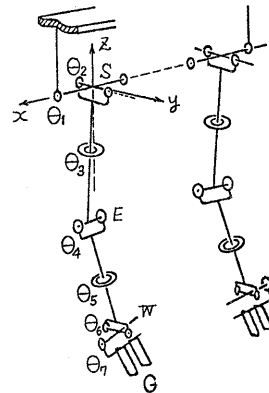


図3 メラームの関節構造

構が許す範囲内の任意の方向で手先をセットするには6自由度で構成されていることが必要十分条件である。換言すれば、手先の位置と方向を定めたとき、腕の姿勢は一義的に決定することになる。一方、人間の腕構造を観察すると、肩関節部で3、肘関節部で1、前腕部で1、手首部で2の計7自由度で構成されていることがわかる。すなわち、手先の位置と方向を決定するに必要な6自由度に加うるに1つの冗長度が存在する。具体的には、前方の固定した棒をがっちり握っても、なおかつ肘がある軌跡上の任意の位置を取れることになる(図1)。

後述するが、人間の腕の多機能性は、一つにはこの冗長度に起因すると考えられる。もちろん、人間の手がそうだからといって、そのままロボットの手を人間のそれと同様の関節構造にした方がよいとは決して言えず、機械部品で構成された人工の手にはそれに通じた構造があるはずで、これに関しては今後の研究にまたねばならない。また、制御の観点から見ても、冗長度が一つ増したことは、手先の位置と方向を決めたとき、腕の姿勢を決定するにはある規範を設ける必要のあることを意味し、飛躍的に制御の困難さが増大する。しかし、この規範の決め方により、冗長度を有する人間腕形マニピュレータの作業性が大きく左右されるとも言える。

筆者らは、昭和48年に、人間腕の構造を模した、冗長度を有する一対の人間腕形マニピュレータ“MELARM(メラーム)”を開発した¹⁾²⁾³⁾。その全体図と関節構造を図2、図3に、概略仕様を表1に示す。このマニピュレータの特徴は、主に、(1)関節構造が7自由度の人間腕形に構成されている、(2)二本腕である、(3)力感覚を有する、のろ臭であり、さらに、(4)マスタマニピュレータによる人間操縦が可能である、(5)手首ジョイントタイプ、手先ジョイントタイプによっても操縦される、という臭い特徴としてあげられる。

ここでは、冗長度と力感覚を有する人間腕形多関節マニピュレータの機構と制御方式に焦点をあてて述べる。

2. 冗長度を有する人間腕形マニピュレータの得失

前述のごとく、冗長度があるということは、手先の位置と方向を決定したとき、腕の姿勢が一義的に決定しないことを意味する。そして、このことはまた、6自由度の多関節形マニピュレータに比し、手先の届く作業範囲が相当増大するとともに、作業対象物への手先のアプローチの仕方が増すことをも意味する。具体的には、(1)図5(b)のご

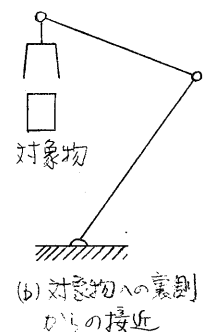
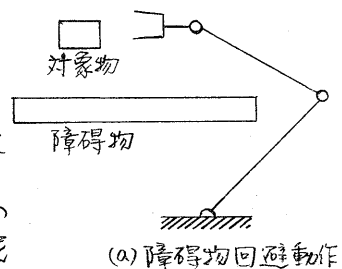


図5 冗長度の有利性

	重量	長さ	自由度	軸	動作範囲	移動速度	制御方法
上腕	81kg	630mm	肩	前後振り θ_1	$+60^\circ \sim -30^\circ$	13 %/sec	電気油圧サーボ
				横振り θ_2	$+30^\circ \sim -60^\circ$	10	"
				回転 θ_3	$+60^\circ \sim -60^\circ$	75	"
			肘	曲げ θ_4	$+60^\circ \sim -60^\circ$	20	"
前腕	18	550	手首	回転 θ_5	$+150^\circ \sim -150^\circ$	31	電気サーボ
				アオリ θ_6	$+90^\circ \sim -45^\circ$	33	"
				振り θ_7	$+45^\circ \sim -45^\circ$	7.5	"
手先	3	300	手先	ハサミ F	$0 \sim 650mm$		電気 ON/OFF

表1. メラームの概略仕様

とく、対象物の前方からのみならず、裏側からもアプローチできる可能性が増す。(ii) 対象物と手の間に障害物がある場合、同図 (a) のごとく、この障害物を回避して対象物にアプローチできる可能性が増す。(iii) 両手先共通領域の拡大、などがあげられる。図4は本マニピュレータの手先の到達範囲と人間腕のそれとを比較したものであるが、両者の形状が大略近似していることがわかる。ここで斜線部は両方の手先が共通に到達できる領域であり、この両手先共通領域の広さは、二本腕を使用しての作業性能に大きく影響すると考えられる。過去製作されたことのある6自由度の腕二本を有するロボットに比し、このXラームの共通領域は明らかに広い。

3. カ感質

ロボットに作業を行わせるに際してのカ感質の必要性はあらためてここで論ずるまでもあるまい。これまで、コンピュータで制御されるマニピュレータにカ感質をつけて種々の作業を行わせることに成功した例として、井上⁴⁾によるものがある。これは、直流位置サーボ系の偏差を読み取り、遂に手先にかかる負荷を知る方式で、この方式によりロボットの“知的”な面が大きく前進したといえる。しかしこの方式では、マニピュレータは軽量で摩擦の少ないことが要求され、むしろ力も弱い。このため、比較的重い対象物を取り扱うようなロボットにこの方式をそのまま適用することは困難であるため、実用性に乏しいと言わざるを得ない。なお、同様の原理を油圧サーボ系に適用し、負荷を推定しようとする研究が始まり⁵⁾、今後の研究の進展と実用化が期待される。

以上の理由で、本マニピュレータでは、実用性の見地から、ひずみ棒とひずみゲージを利用したカフィードバック形の力検出方式を採用することにした。この方式は原理的には簡単であるが制御方法や信頼性に関して未知であったため、実際に本格的な多関節形マニピュレータに通用された例は殆んどない。

このひずみ棒を用いたカ感質の実際の機構は次節以降で述べている。

4. 人間腕形マニピュレータの機構

人間の肩部は球軸受構造に近く、これにより、腕の前後振り、左右振り、上腕の回転の3自由度の動きが可能

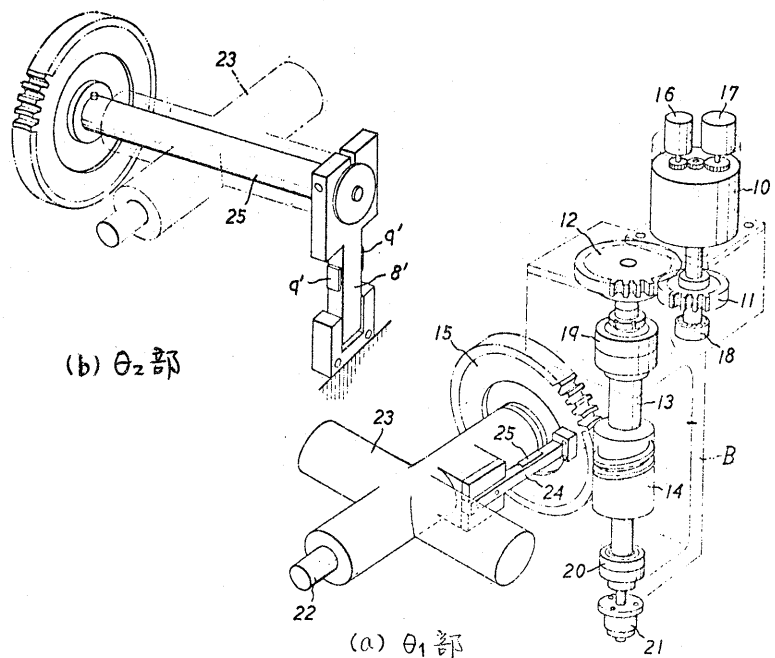


図6. Xラームの肩部関節機構

となっている。これは機構的には、図3のごとく、 θ_1 , θ_2 の2自由度によるユニバーサル・ジョイント機構プラス上腕の回転 θ_3 と等価である。図6に肩部関節機構のうちの θ_1 軸機構部を示す。ここで、10は油圧モータ、14, 15はウォーム、ウォームホイール、23はユニバーサル・ジョイントの十字機構部である。22と15は一体で、22と23の間はフリーとなっており、23と15の間を24のひずみ棒で連結して両者間の力の伝達はこのみで行われている。25はひずみゲージである。肘関節部 (θ_4) はピンジョイントよりなり、さらに、回転機構による前腕回転部 θ_5 、手首の振りとおよりの θ_6 、 θ_7 部と続き、その先に簡単な平行はさみ機構によるにぎり部がある。

従来の多関節形マニピュレータでは、各駆動軸間にはある間隔があった。本マニピュレータでは、肩部の θ_1 , θ_2 軸、手首部の θ_6 , θ_7 軸の各2駆動軸を一翼に集中した構造となっているため、外観の人間腕類似性のみならず、制御を容易にするのにも非常に役立っている。

5. 肘・手首・手先位置計算アルゴリズム

後節に移る準備として、本人間腕形マニピュレータの肘・手首・手先位置を計算により求めておく。

まず、図9に示したように、肩部に固定された x, y, z 直交座標系 0X_0 を考え、腕の初期状態を z 軸上にドラムと真下に下げた状態としたとき、この 0X_0 から各節への位置ベクトルを求めるために、以下に定義するような座標変換行列を求めておく。

$$C_x(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_i & -s_i \\ 0 & s_i & c_i \end{bmatrix}, \quad C_y(\theta_i) = \begin{bmatrix} c_i & 0 & s_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_i & 0 & c_i \end{bmatrix}, \quad C_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 \\ s_i & c_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$

ここで、 $C_x(\theta_i)$ は、 θ_i 関節軸部に固定された座標系 iX_i を x 軸まわりに回転したときの座標変換行列を表す。

肩 (S) と肘 (E)、肘と手首 (W)、手首と手先 (H) の間の座標変換行列をそれぞれ C_e, C_w, C_h とすると、S 点を原点とする肘、手首、手先位置の位置ベクトル P_e, P_w, P_h はそれぞれ次式のごとくなる (図8参照)。

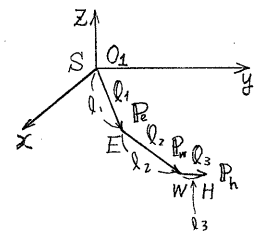
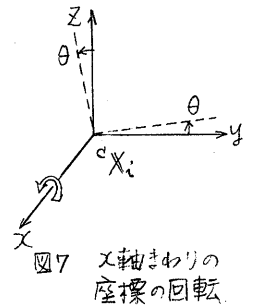
$$P_e = Q_1, \quad P_w = Q_1 + Q_2 = P_e + Q_2, \quad P_h = Q_1 + Q_2 + Q_3 = P_w + Q_3 \quad (2)$$

$$Q_1 = C_e [0 \ 0 \ -l_1]^T, \quad Q_2 = C_w [0 \ 0 \ -l_2]^T, \quad Q_3 = C_h [0 \ 0 \ -l_3]^T \quad (3)$$

$$C_e = C_x(\theta_1) \cdot C_y(\theta_2) = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 \\ s_1 s_2 & c_1 & -s_1 c_2 \\ -c_1 s_2 & s_1 & c_1 c_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \\ e_4 & e_5 & e_6 \\ e_7 & e_8 & e_9 \end{bmatrix} \quad (4) \quad \text{図8. 記号}$$

$$C_w = C_e \cdot C_z(\theta_3) \cdot C_x(\theta_4) = \begin{bmatrix} c_2 c_3 & -c_2 s_3 c_4 & c_2 s_3 s_4 + s_2 c_4 \\ c_1 s_2 c_3 + c_1 s_3 & -s_1 s_2 s_3 s_4 + c_1 c_3 c_4 - s_1 c_2 c_4 & s_1 s_2 s_3 s_4 - c_1 c_3 s_4 - s_1 c_2 c_4 \\ -c_1 s_2 c_3 + s_1 s_3 & c_1 s_2 s_3 c_4 + s_1 c_3 c_4 + c_1 c_2 s_4 & -c_1 s_2 s_3 s_4 - s_1 c_3 s_4 + c_1 c_2 c_4 \end{bmatrix}$$

$$C_h = C_w \cdot C_z(\theta_5) \cdot C_y(\theta_6) \cdot C_x(\theta_7) \equiv \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (b) \quad \equiv \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} \quad (5)$$



7. 冗長度のある腕の姿勢を決定するアルゴリズム

冗長度のある腕の姿勢を決定する方式として次のようなものが考えられる。

- (i) 手先方向とは無関係に、或る姿勢たとえは肘を最も低い位置に下ろした、腕の静的な位置エネルギーがミニマムとなる姿勢をとる(図10)。
- (ii) 手先の方向と何らかの関連のある姿勢をとる。
- (iii) 対象とする作業に応じて姿勢を決定する。
- (iv) マニピュレータの機構構造上最も高い精度が得られる姿勢をとる。

以上のうち、(i)の方法は最も簡単であるが、冗長度を有するという利点を殆んど失かしていないし、作業領域や手先の到達範囲が非常に狭くなる。(ii)の方法に関してはここには触れないが、演算式はかなり複雑になる。(iii)の方法は最も理想的な姿勢決定法であり、ロボットに作業させるという観点から見てメリットの多い方法であると考えられるが、従来、この方面の研究は殆んどなされていなかった。そこで著者は、(iv)にあげた精度の良をも考慮に入れた、上腕回転部(θ_3)半固定方式を得、この方式を用いることにより作業に応じた姿勢の決定を容易にするための一助とする予定である。

7.1 θ_3 を固定したときの $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ の決定と肘移動角 $\Delta\epsilon$ の求め方

本人間腕形マニピュレータにおける機構上の最弱点は上腕回転部(θ_3)と前腕回転部(θ_5)である。すなわち、この两部分では、機構構成上、アクチュエータを上腕ないし前腕内部に内蔵せざるを得ず、このため、 θ_1 部、 θ_2 部、あるいは θ_4 部等に用いたウオームとウオームホイールの組み合わせという有効な減速手段を使用することは機構的に困難であり、本マニピュレータの上腕ならびに前腕回転部のような遊星歯車的な減速機構を採用せざるを得なかった。このため、この部分の減速比はウオームギヤ使用部分の約 $1/60$ に対して $1/8$ にしかり取り得ず、したがって駆動トルクがかなり小さくなっている。また、ギヤ製作ならびに組付けの困難さから、バックラッシュが甚じやすい。このため、この两部分は位置精度も比較的良くなく、特に静止状態からどくわずかに移動させるときのインテグレーション精度が悪い。このインテグレーション精度の悪いことは、マニピュレータに細かい作業を行わせるに際し致命的な欠陥となる。特に上腕回転機構部(θ_3)の精度は、前腕回転部に比べてこの部分から手先までの距離が長いため、手先の位置決め精度に大きく影響する。ちなみに、手先を真直ぐ伸ばしたまま肘を直角に曲げたときの θ_3 部の 1° の誤差は、本マニピュレータの手先先端では14.8mmにもなる。

そこで、作業を行う大抵の腕姿勢まで適当な方法で移動させた後、いよいよ精度を要する細かい作業を行うという時長でこの θ_3 部分だけをロックして固定してしまうことが考えられる。さらに、 θ_3 を固定したときの腕の姿勢は比較的容易に求められるため、この θ_3 固定による移動式を積極的に本マニピュレータの制御に使用することが考えられる。

また、作業時における人間の腕を観察すると、肘を適当に上げ下げすることにより大まかな手先の方向決めを行っている場合が多いことに気づく。すなわち、図11において、手首位置を固定したときの肘の軌跡円Cを含む平面と手首を結ぶ線との交点Poまわりの肘移動による角度 ϵ がこの種の腕の制御に重要であることがわかる。また、この角度 ϵ は人間にとって直観的にわかりやすい角度でもある。そこで、腕の姿勢の決定に際し、現在の腕の姿勢より少し肘を上げたいと

いうとき、この \$\epsilon\$ の変化分 \$\Delta \epsilon\$ を定め、これに対応する \$\theta_1 \sim \theta_3\$ を計算により求めればよいことになる。すなわち、\$\theta_3\$ given のとき、図11より、

$$\theta_4 = \cos^{-1} \frac{l_1^2 + l_2^2 - R^2}{2l_1 l_2}, \quad R^2 = x_w^2 + y_w^2 + z_w^2 \quad (16)$$

したがって (7) 式より、

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{z_w}{\sqrt{(C_3 S_4 l_2)^2 + \{(S_2 S_3 S_4 - C_2 C_4) l_2 - C_2 l_1\}^2}} - \alpha \quad (17)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{-x_w}{\sqrt{(l_1 + C_4 l_2)^2 + (S_3 S_4 l_2)^2}} - \beta \quad (18)$$

ここに、

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{(S_2 S_3 S_4 - C_2 C_4) l_2 - C_2 l_1}{C_3 S_4 l_2} \right\}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{S_3 S_4 l_2}{l_1 + C_4 l_2} \right\}.$$

また

$$P_{oe} = k P_w, \quad k = \frac{1}{2} + \frac{l_1^2 - l_2^2}{2R^2}, \quad (19)$$

$$r = P_e - P_{oe} = P_e - k P_w = \begin{bmatrix} x_e - k x_w \\ y_e - k y_w \\ z_e - k z_w \end{bmatrix} \quad (20)$$

次に、\$r\$ が \$\Delta \epsilon\$ だけ回転したとき \$r_1\$ となったとするは、

$$r_1 - r = P_{e1} - P_e = 2r \sin \frac{\Delta \epsilon}{2}, \quad r = |r| \quad (21)$$

(20), (21) 式より、このときの \$\theta_1 \sim \theta_3\$ が求められる。

7.2 \$\theta_3\$ 半固定方式による簡易制御方式

上に述べた方法は複雑な計算を伴うため、リアルタイムの制御にはかなりの重荷となる。そこで、(21)式より得られる \$\Delta \epsilon = 2 \sin^{-1} (|P_{e1} - P_e| / 2r)\$ (22) の式において、\$\theta_3\$ をすしずつ増加したときの \$\Delta \epsilon\$ を求めると、表2のごとく、\$\Delta \epsilon \approx \Delta \theta_3\$ となる。すなわち、図11において、現在の肘位置から \$\Delta \epsilon\$ だけ肘を移動したいとき、現在の \$\theta_3\$ に \$\Delta \theta_3\$ を加えた角度を \$\theta_3\$ として (17), (18) 式より \$\theta_1, \theta_2\$ を求めればよいこととほぼ等価になる。この \$\theta_3\$ 半固定方式を採用することにより演算時間は大幅に短縮された。

8. 結言

冗長度と力感覚を有する人間腕形マニピュレータの機構と特徴を述べ、冗長度のある腕構造を容易に制御するために、\$\theta_3\$ 半固定方式を提案した。なお、紙数の関係で、腕姿勢により刻々に変化する自重を差し引くことにより、手先に加わる外力の大きさや方向を力感覚に発生するトルクより推定するアルゴリズムに関しては省略する。

- 1) Nakano, "Cooperational Control of a Pair of Anthropomorphic Manipulators 'MELARM'", 4th Intern. Conf. Industrial Robots, 1974, Tokyo
- 2), 3) 中野, 石田 他 「一對の人間腕形マニピュレータの外力認識機能をもつ2本の手の協調制御」第13回SICE講演会'74
- 4) 井上, 「人工の手の計算機制御」日本機械学会誌, 1970-7
- 5) 谷江 他, 「油圧位置サーボ系の定常偏差を用いたマニピュレータの負荷推定方式」, 昭和50年第3回油空圧講演会前刷

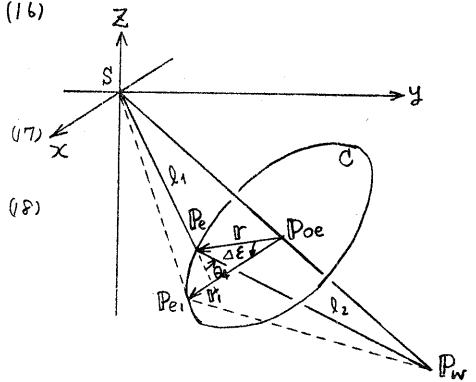


図11 肘の移動

(x_w, y_w, z_w)	θ_3	$\Delta \theta_3$	$\Delta \epsilon$
(0.0, -1000)	0°	10°	11.48°
	10°	10°	11.26°
	20°	10°	10.88°
	30°	10°	10.40°
	40°	10°	9.90°
	50°	10°	9.34°
	60°	10°	9.34°

表2 \$\Delta \theta_3\$ と \$\Delta \epsilon\$ の比較