

Fig. 5 Whole view of the mechanism

その可動範囲は8面体型のものよりかなり広い。また減速比が1:9と小さいため運動の可逆性も十分にある。1組のパンタグラフは2個のDCサーボモータで駆動され、6個のモータの回転角と、3組のパンタグラフの $B_j B_k$ 軸まわりの回転角がシャフトエンコーダで計測できる。後述するようにパラレルマニピュレータではジョイント角から頭部三角形の位置姿勢を求めることが困難であるがパンタグラフの回転角を計測することによりその変換が容易になる。

3. 幾何学的な解析

3.1 ジョイント角の算出

頭部三角形の位置姿勢から6つのジョイント角を求める方法について述べる。まず基準座標系における、頭部三角形を支える3つの球面継手の中心の座標を求めその値から必要なジョイント角を計算する。

Fig. 6 に示す様に、各座標系、点、角度等を定める。座標系は太文字で、点は大文字で、点ベクトルは点に対応する太小文字で、角度はギリシア文字であらわす。左肩添字は、点または座標系の基準となる座標系をあらわし省略時は後述の O を基準とする。頭部三角形に固定した座標系を T 、底部三角形 $B_0 B_1 B_2$ の中心に固定した座標系を O とし、3つの球面継手の中心点を $H_0 H_1 H_2$ とする。 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i=0)$ の角を Fig. 6 に示すように定義すると $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ が求めるジョイント角である。また、パンタグラフリンクの一辺の長さを l_r 、 H_i を含むパンタグラフリンクの動く平面と、 $B_j B_k$ 軸との距離を l_d 、 $B_j B_k$ の中点と O の原点との距離を l_m 、 T から見た H_i 点を表すベクトルを ${}^T h_i$ とする。これら $l_r, l_d, l_m, {}^T h_i$ は定数である。

今、マニピュレータの位置姿勢が O から T への変換行列 ${}^O T$ で与えられるとすると、 O から見た H_i 点の位置ベクトル ${}^O h_i$ は、次式により求められる。

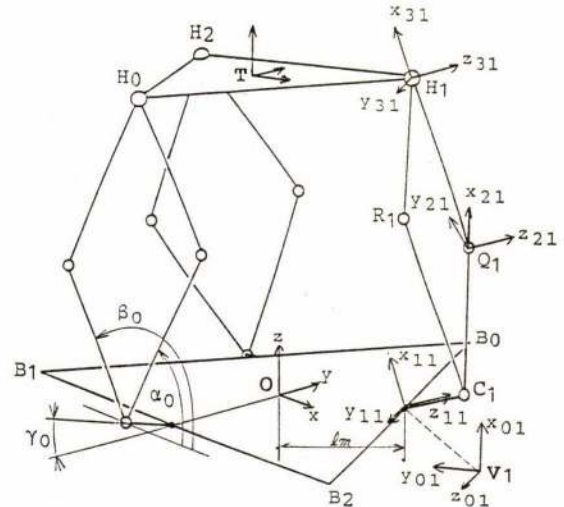


Fig. 6 Coordinate system and joint variables

$${}^O h_i = {}^O T {}^T h_i (i=0, 1, 2) \quad (1)$$

各 ${}^O h_i$ からジョイント変数 α_i, β_i は、従来のマニピュレータと同様に求めることができる。この計算は3つのパンタグラフリンク毎に独立に計算できるためその1つについて示し、以降添字 i は適宜省略する。

底部三角形に固定され $B_j B_k$ の中点にある原点がある座標系 ${}^O V_i$ と、パンタグラフリンク内の各リンクに固定した座標系とを Fig. 6 に示すように定義すると ${}^O V_i (i=0, 1, 2)$ は次式で表わされる。

$${}^O V_i = \begin{bmatrix} 0 & -S_0 & -C_0 & l_m S_0 \\ 0 & C_0 & -S_0 & -l_m C_0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで C_0 と S_0 は、添字 i 毎に異なり、その値を Table 1 に示す。各リンクの座標系間の関係を表すために、Denavit と Hartenberg の A 行列⁹⁾を用いると、 A_n は次式の通り定義される。

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \varphi_n & \sin \theta_n \sin \varphi_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \varphi_n & -\cos \theta_n \sin \varphi_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \varphi_n & \cos \varphi_n & d_n \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

各リンクに O に近い方からその番号を 1, 2, 3 とすると、 A 行列を定めるリンクパラメータは Table 2 に示す通りである。ここでジョイント角 α, β, γ はジョイント変数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ より

Table 1. Constants of V

suffix	C_0	S_0
$i=0$	1	0
$i=1$	-1/2	$\sqrt{3}/2$
$i=2$	-1/2	$-\sqrt{3}/2$

ントからジョイントトルクを求めるための計算量が多い。しかし6自由度をコンパクトに実現することができ、小さな減速比にもかかわらず特にZ軸方向には自重を上回る大きな力を出すことができた。

我々のパラレルマニピュレータの設計はリアアクチュエータを用いることなくリンク機構で実現したため、小形のサーボモータで駆動することができ、広い可動範囲と良好な運動の可逆性を得ることができた。数学的取扱いはリアアクチュエータを用いた場合に比べてそれほど複雑にはならない。T行列からジョイント角の計算は式(1)(10)(11)(12)に基づき乗算36回、除算3回、加減算49回、他に関数の呼出し9回を行う。固定小数点を用いて計算し、平方根は繰返し計算で求め逆余弦表を引く、合計の計算時間はMC 68000クロック8MHzを用いて900 μ sに満たない。そのためサーボサイクル毎にエンドエフェクタの位置姿勢を位置制御の目標値として与えることのできるシステムが実現されている。

応用としては6自由度プラットフォームの他に、小形軽量の特徴をいかして、従来のマニピュレータの先に取り付けて手首機構とすることが考えられる。今後の課題にはコンプライアンス制御が可能な制御システムの構築、冗長アクチュエータを用いた場合の解析、等がある。

〔謝辞〕パラレルマニピュレータの製作に関し、第1号プロトタイプ機の製作を担当してもらった東京大学工

学部機械工学科藤田裕二技官、および、改良した第2号機の製作に御協力いただいた住友電気工業(株)研究開発本部システムエレクトロニクスの諸氏に深謝する。なお本研究は科学研究費補助金57,8年度一般研究C(57550143)および50,60年度一般研究B(59460094)のサポートのもとに行われた。

参 考 文 献

- 1) Minsky, M., "Manipulator Design Vignettes", A Memo No.267, MIT AI Laboratory, 1972
- 2) McCallion, H. and Truong, P.D., "The Analysis of a Six-Degree-of Freedom Work station for Mechanised Assembly", Proc. 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, pp.611-616, 1979
- 3) McCallion, H., Johnson, G.R. and Pham, D.T., "A Compliant Device for Inserting a Peg in a Hole", The Industrial Robot, pp.81-87, June 1979
- 4) Paul, R.P., "Robot Manipulators: mathematics, Programming and Control", The MIT Press
- 5) Denavit, J. and Hartenberg, R.S., "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, pp.215-221, 1955
- 6) 井上博允, "コンプライアンス制御機能有するパラレル・マニピュレータの研究", 昭和59年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書(59460094), 1986



津坂祐司 (Yuji TSUSAKA)

昭和35年1月15日生れ。58年東京大学工学部機械工学科卒業、60年同大学院修士課程修了、現在同博士課程在学中。



井上博允 (Hirochika INOUE)

昭和17年7月5日生れ。40年東京大学工学部産業機械工学科卒業。45年同大学博士課程修了、工学博士。45年電子技術総合研究所入所。53年4月より同大学助教授工学部機械工学科。現在、同教授。知能ロボット総合システムの研究中。日本機械学会、情報処理学会、電子通信学会、計測自動制御学会、IEEE、ACMの会員。(日本ロボット学会正会員)



福泉武史 (Takeshi FUKUIZUMI)

昭和36年6月19日生れ。59年東京大学工学部機械工学科卒業、61年同大学院機械工学専門課程修士課程修了。同年日本電気(株)入社。生産技術開発センターにおいて、生産情報システムの開発に従事。

