

# 装着型動力装具の開発

磯村 恒, 井久保 照康  
東京大学 工学部 精密機械工学科

はじめに.

装具とは、交通事故、スポーツによる不慮の事故、労働災害、疾病等により、片麻痺、対麻痺、脳性麻痺、筋ジストロフィー症その他の各種の未梢性、中枢性の麻痺が生じた人に対し、麻痺部位（上肢、下肢、沓幹等）の支持、運動矯正、補助等を行うものである。本研究で対象とする装具は、上肢を支持し、運動補助する為の動力装具である。これまで世界各国において、この失われた機能を補う為の装具に関する研究が行われ、種々の装具が開発されてきたが、未だ、沓幹に装着し、その失われた機能を代行し得る実用的装具は実現されていない。特に、多くの自由度を持ち、レガロ、動力を備えたいわゆる動力装具に関しては、装具自体の構造、指令及び駆動制御法、腕への装着法、システム全体の安全性等数多くの問題が未解決のまま山積されている。これら問題を解決し、実用的な動力装具の実現を目的として、マイクロコンピュータ技術を導入した動力装具を開発した。ここに、その研究概要を述べる。

## 1. システム概要

動力装具システムは、Fig.1に示す如く、指令装置（キーボード、ボイス）、マイコンローラ、DSP (Digital Servo Processor)、増巾回路、動力装具本体より構成されている。

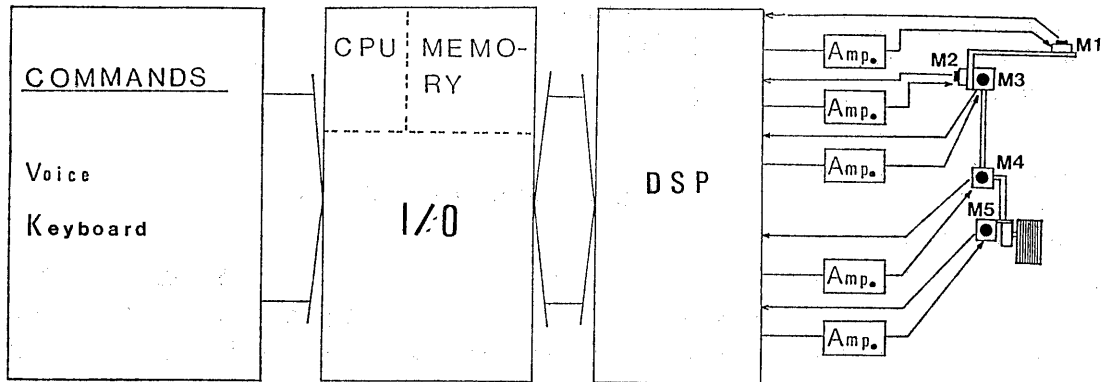


Fig. 1 Block Diagram of Entire System

### (1) 動力装具

本旨の装具設計製作にあたり、使用目的に伴う種々の制約により、その設計仕様もさることながら基本思想も、一般産業用ロボットとは異なる。本装具の機能である麻痺部位支持、運動矯正、運動補助を可能ならしめる動力装具の設計においては、ヒトの生理機能、障害者個々の特徴を十分に検討する必要がある。

ここでは、出来る限り広範な適用を目標として以下の手順で設計を実施した。

- ① 動力装置の機構設計に必要な条件。
  - i. 自由度の決定
  - ii. 軽量化
  - iii. 種々の麻痺症状に適用し得る機構
  - iv. 制御に適した機構
  - v. アクチュエータの選定
  - vi. 腕の運動を拘束せず、負荷の少ない装着法
  - vii. 安全対策

② 自由度の決定

自由度を決定する要因は幾つもの考え方がある。ここでは、生理学的運動機能と工学的見地の整合性の中で決定することとした。即ち、麻痺部位の支持、補助を基礎に、工学的意味の運動を可能ならしめる必要最小限の制御変数を有する機構とすることである。これは、①のii, ivの条件に適合している。ここでは、手・指部の支持補助は独立して簡易な固定装置を使用することとして、肩、肘、前腕回転、内外への計ら自由度構成とした。これは、自由度の増加、機構、制御の複雑化への配慮が必要ならず、麻痺者の腕の拘束部位を増やし、負担軽減への制約条件が複雑化するこへの配慮である。自由度の配置に関しては、肩の運動機能より手通りの考え方があがるが、腕の装着を重視しFig2の如く決定した。

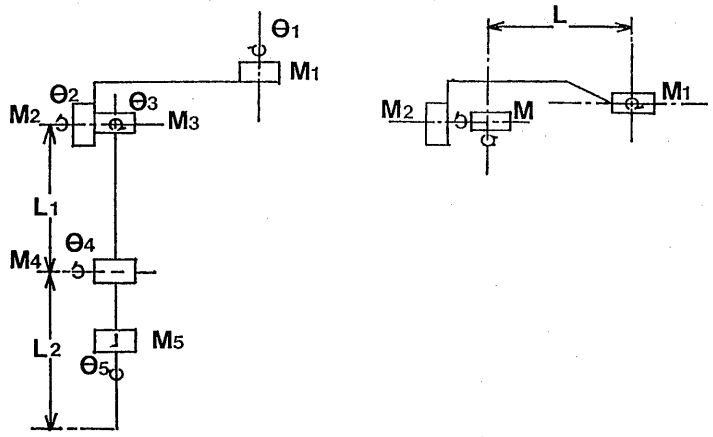


Fig. 2 Construction of Orthosis

③ 軽量化

軽量化の最大因子としては、アクチュエータ、動力伝達機構の選定である。既存のアクチュエータを使用する限りにおいては、大幅な軽減は困難である。勿論、後述する様に出来る限りトルク/重量の高い、小型のもの採用は絶対条件となる。ここでは、この点に加え、構造部材として、Al合金を使用し、より一層の軽減をかけた。

④ 種々の麻痺症状に適用し得る機構

本件に関して、機構的に柔軟性を持たせる試みは、腕装着という条件下では①のii, ivに対し、反すると共にviiの安全対策上でも多大な問題を生ずる因子となる。そこで、本装置システムにおいては、制御によりその対応をばかるとした。機構的には、Fig2のL1, L2が変えられる様になり、可変性を付けた。

⑤ 制御に適した機構

本件は、①のi, vに密接に係っている。ここでは、各自由度に対して1つのアクチュエータ(DCサーボモータ)を採用し、全てのアクチュエータには回転位置検出として光型エンコーダを装備した。又、それぞれのアクチュエータの配置は、直交座標系が適用し得る様にした。

⑥ アクチュエータの選定

前述の如く、本システムの制御にマイクロコンピュータを使用すること、メンテナンス、制御性等総合的に鑑み、現存する動力源としてのモータの使用は必須のこととなる。その選定にあたっては

- i. 出力/体積比が大きく、小型化、軽量化が可能。
- ii. 立ち上がり特性が良く、高速時におけるユリオリの力が小さい。
- iii. ゴッキングが零である。
- iv. 回転ムラが小さい。
- v. 電氣的安定性が小さい。
- vi. 整流作用が良く、寿命が長い。

等機械的、電氣的特徴を検討する必要がある。ここでは、兼i項と最重視し、DCサーボモータの採用を決定した。

⑦ 腕の運動を拘束せず負荷の少ない装着法

実用上極めて重要な問題となる。ここでは、バビー・ショルダ型(Baby-Shoulder)の器具固定体幹装着ソケットを試作した。

⑧ 安全対策

最も重要な問題である。ハード的には、リミットスイッチを取り付け、ソフト的には、可動領域の安全回避を基本理念として、各種動作の設定を行ない、その対応とした。

(Z) 制御装置

制御装置はメインコントローラ、DSP、増幅回路等より構成されている。Fig.3に制御装置のシステムブロック図を示す。

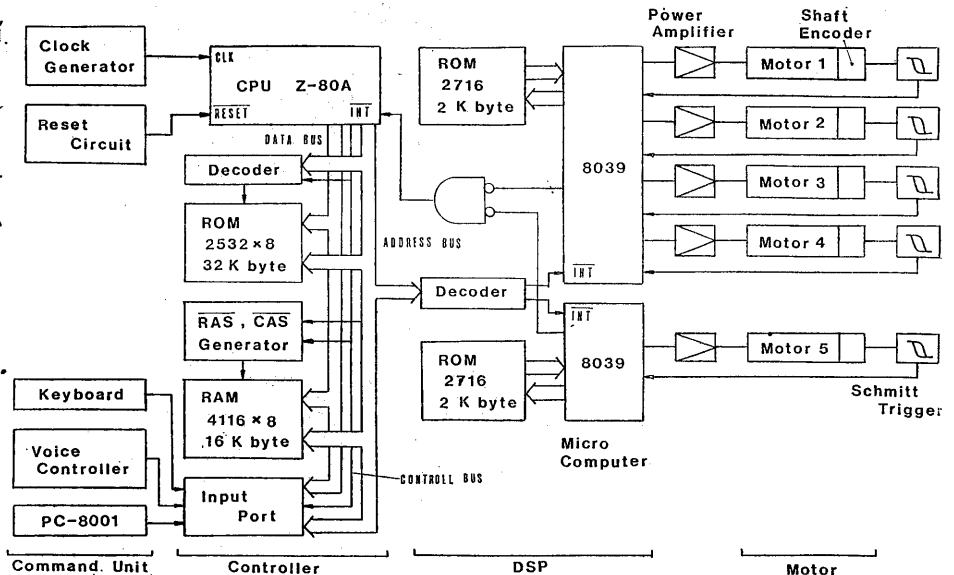


Fig. 3 Block Diagram of Control System

### ① メインコントローラ

構成は、Z80A マイクロプロセッサ (クロック 7.4 MHz, 8ビット並列処理方式) を中心に、ROM 32Kバイト, RAM 16Kバイト, I/O に PPI (8255) が2個, フロッピー回路, デコード部から成っている。写真1にそのメインコントローラを、Fig.4にその配置図を示す。

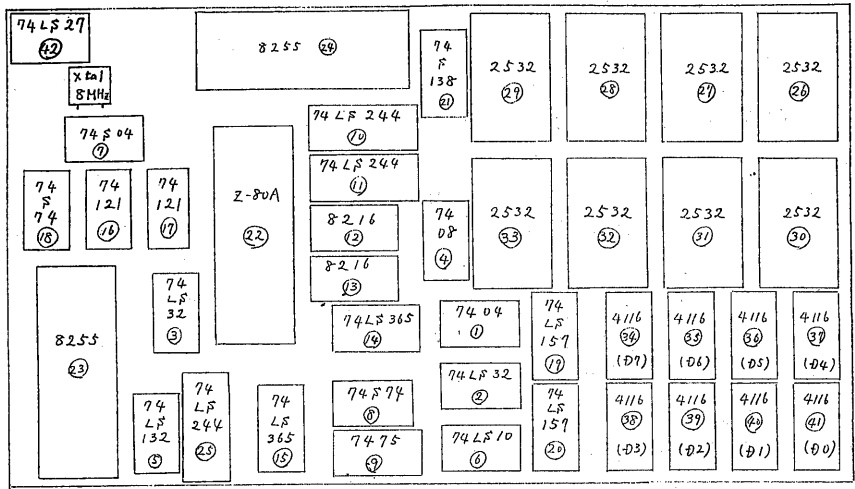


Fig. 4 Disposition of Main Controller

### ② DSP

DSP (Digital Servo Processor) は、メインコントローラからの指令により、モータソフトウェアで制御する回路である。その構成は、シングルチップマイクログルコンピュータ 8039 (クロック 11 MHz) を中心に、ROM 2Kバイト, デコード部, モータへの出力部, シフトエンコーダからのフィードバック信号入力部から成っている。写真2にDSPを、Fig.5にその配置図を示す。尚、このDSP回路において、

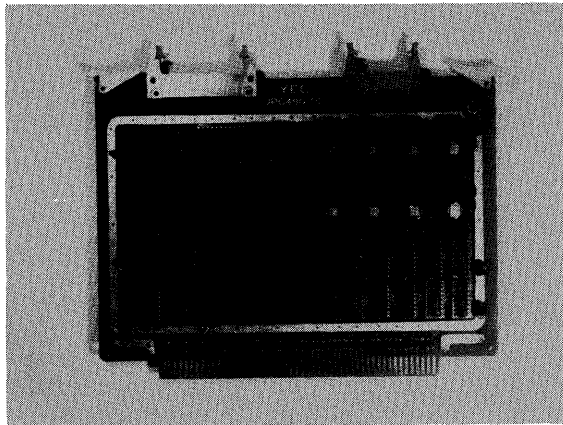


写真1.  
メインコントローラ

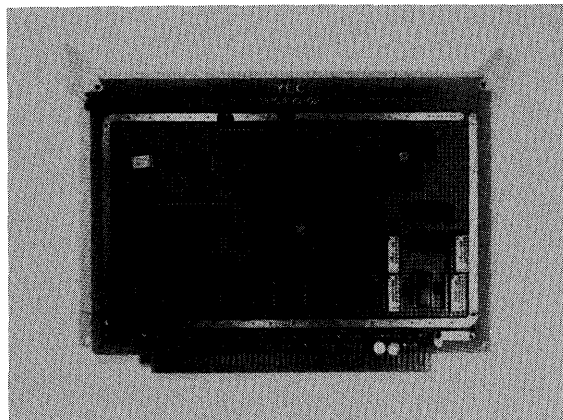


写真2  
DSP

8039, 1個  
で最大4個  
のモータが  
制御できる  
様にしてあ  
る。

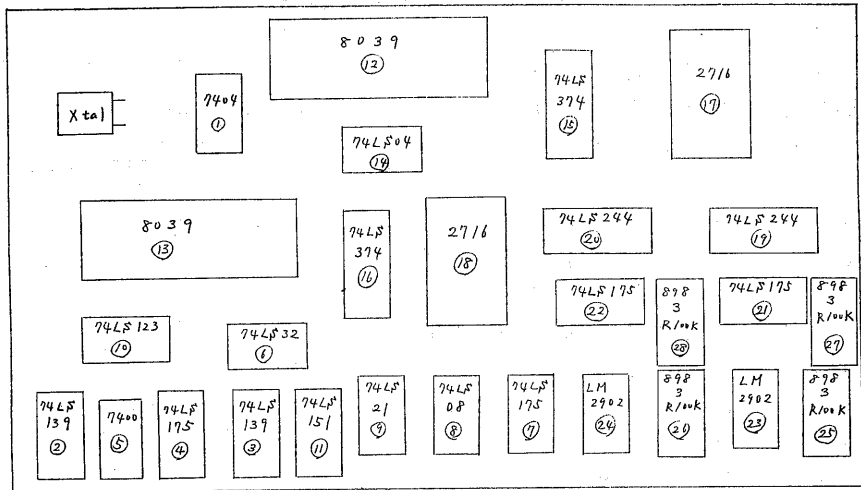


Fig. 5 Disposition of DSP

③ パワーアンプ  
DSPからモ  
ータへの出力は、差  
動増幅器によりエ  
ミタの形で出力さ  
れる。そこで、こ  
のパワーアンプ部  
によってモータの  
仕様に合  
せて電力増  
幅を行なう  
。この回路  
は、電圧増  
幅する一投  
目と電流増  
幅する二投  
目で構成さ  
れている。  
写真3にパ  
ワーアンプ  
を、Fig.6に  
その配置図  
を示す。

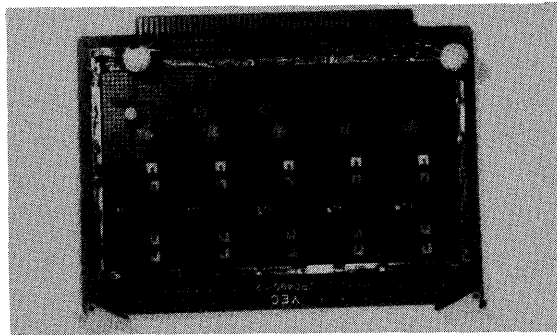


写真3  
パワーアンプ

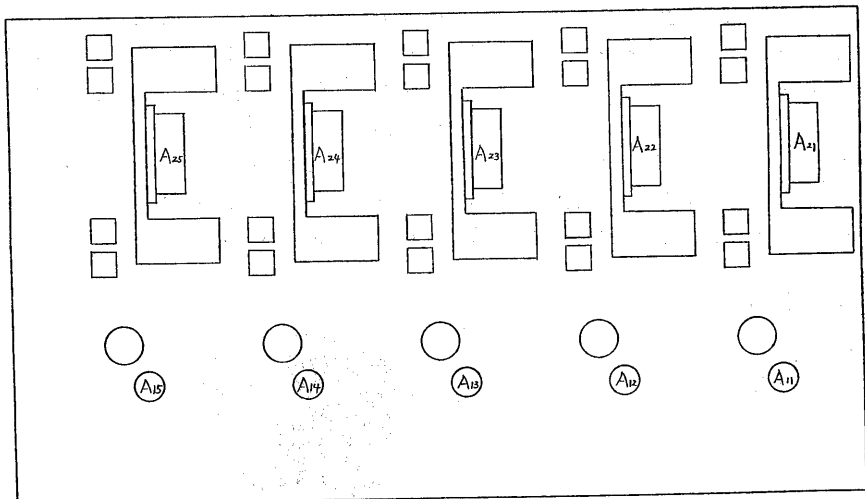


Fig. 6 Disposition of Power Amplifier

④ メインコントローラ・DSP間の制御信号，データの入出力，及び，モータへの入出力

DSPの8039へのモータの制御信号及びデータの入出力はメインコントローラの $\Sigma 80A$ で行なわれ，その制御信号とデータは，全て $\Sigma 80A$ のアドレス，データ，制御信号を利用してゐる。アドレス信号はチャンネルの指定，E/Oのチップセレクト，リセット，モータの正転・逆転，モータの異常検出等を担っている。 $\Sigma 80A$ から8039への制御信号及びデータ転送のタイミングチャートをFig.7に示す。PORT ADDRESSはクロックの立上

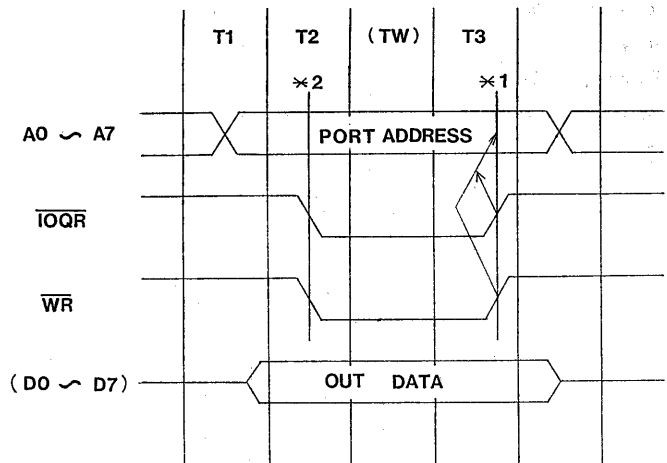


Fig. 7 Timing Chart

りから出力が始まり，OUT DATAが確定した後には $\overline{IOQR}$ ， $\overline{WR}$ がイアクティブになる。  
 (\*2)。 $\overline{IOQR}$ ， $\overline{WR}$ がイアクティブになった後にも，PORT ADDRESSはしばらく保持される。従って， $\overline{IOQR}$ ， $\overline{WR}$ の立上り(\*1)にPORT ADDRESSをラッチすれば，その時のADDRESSはいつでもデータとして使用できることになる。実際に\*1のタイミングでラッチするアドレスバスのデータはA0~A4である。A6，A7は\*2のタイミングでデコードされ，2個の8039のチップセレクト信号に使用され，セレクトされた8039の $\overline{INT}$ 端子の割り込み要求の信号となる。8039が割り込み要求信号をサンプリングし，割り込み処理ルーチンの実行を開始すると，約10 $\mu$ s遅れて割り込み要求を解除する信号を出力する。8039がモータの異常を検出すると $\Sigma 80A$ の $\overline{INT}$ に割り込み要求信号を出力し，データバスにその情報を出力する。 $\Sigma 80A$ は割り込み要求信号を受付けると1ch~5chをスキップして，異常チャンネルを検出し，適切な処置を施す。8039からDCモータへのパルス出力は，ポートから差動増幅とパワーアンプを通して出力される。このDSP回路では，モータの回転角検出器である光電形シャフトエンコーダの出力信号を波形成形するとともに，8039のデータバスから入力し， $\frac{1}{4}$ 周期以内毎に4ch分のモータの回転計測を行なっている。

(3) 指令装置

本動力装置システムに付ける指令装置としてはキーボード(25キー)と音声指令装置の2種類を用易してある。ここで音声指令装置を開発し用いた理由は，本システムに付ける使用対象者は上

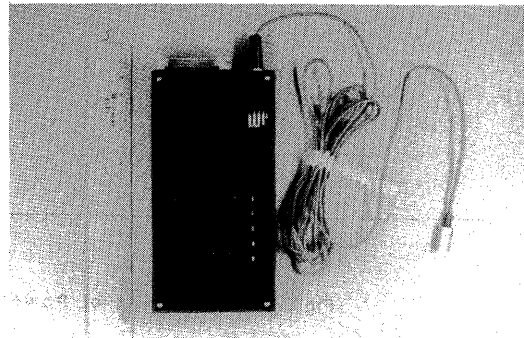


写真4 音声指令装置

故障寄着  
であり、  
その残存  
機能、負  
担の無い  
簡易操作  
の指令方  
法等を考  
慮する上  
、音声の  
利用が有  
効であり、  
実用約と  
あると考  
えられた。  
この指令  
方法は、超  
小型のエ

レクトレットコンデン  
サマイクロフォンを喉  
の管外壁に取付け、  
声帯振動(ピッチ)を  
抽出する。指令信号と  
しては、このピッチ情  
報、即ち、音の高さ、  
音節数、音の持続時間  
等をパラメータとして  
その組合せをコード  
化し、腕の動作と対応  
付けたものである。Fig  
8にシステムブロック  
図、写真4に本体を示  
す。ブロック図に示  
す如く、本音声指令装  
置は、マイクロフォンで  
拾った音声を増幅し、  
フィルタを通し、波形  
放形し、声帯振動情報  
としてCPUへ割り込  
み信号を発生する前処  
理回路部と、この割り  
込み信号により、音声

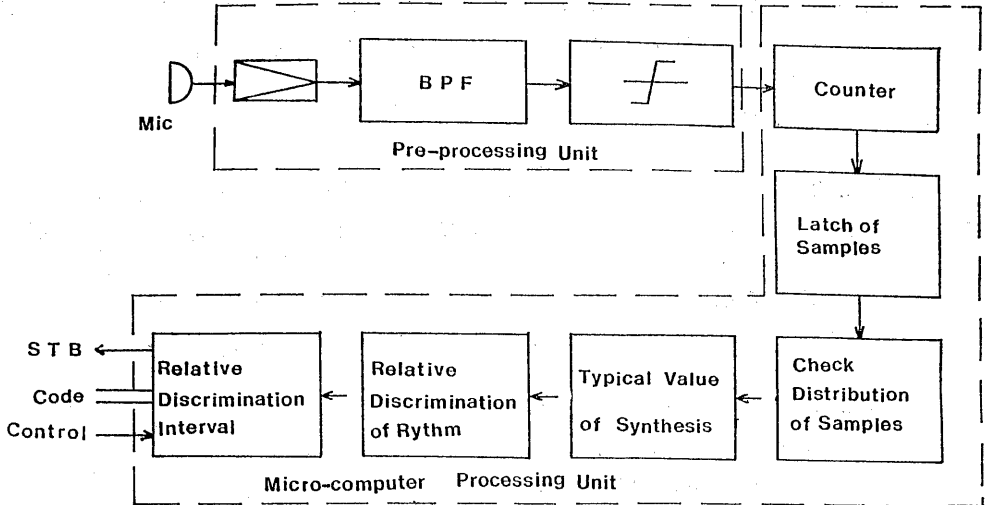


Fig. 8 Block Diagram  
of Voice Controller

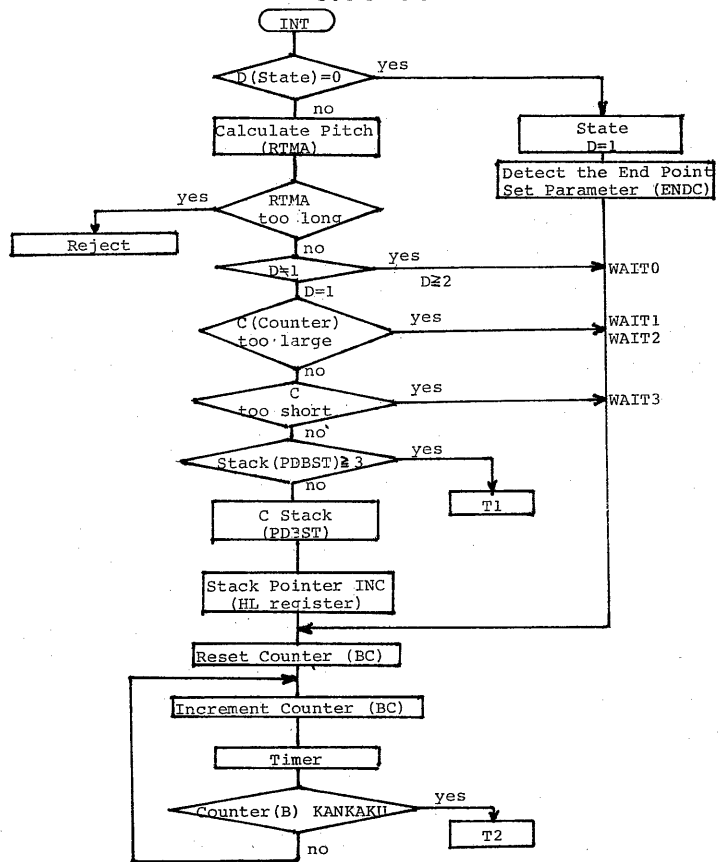


Fig. 9 Flowchart of the Voice Recognition

符号を判別し、装置駆動制御コントローラへ動作データを出力するコンピュータ部より成っている。ピッチ抽出のクロキヤートはFig9に示す。

2. 動力装置制御法

本動力装置の制御は、DDA方式による位置制御を行なった。本装置は、手首部を含め全体で自由度を有し、その実際の駆動において、ヒトの腕の動きに近いことが要求されている。即ち、この自由度の協調動作をさせる必要がある。以下、この様な協調動作による位置制御を行なうシステムプログラム、及び、そのシステムプログラムに必要な座標系等について述べる。

(1) 位置決めのための座標系

本装置は位置制御を用いているので、その位置決めの際に何れか座標系を定める必要がある。本研究においてはFig10に示す様に装置装着者の前額面に三次元直交座標系を設定する。この座標系における原点およびX, Y, Z各軸は以下の様に定める。

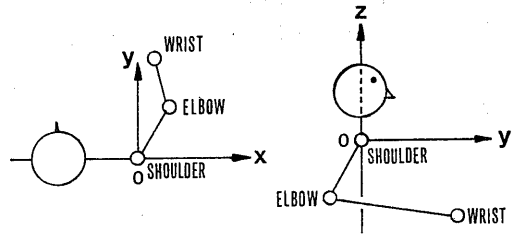


Fig.10 Spatial Coordinates

- ・原点 装着者の肩
- ・X軸 原点を通り右方水平へ向かう直線
- ・Y軸 原点を通り前方水平へ向かう直線
- ・Z軸 原点を通り鉛直上方へ向かう直線

この様に設定した座標系内の1点に手首部が何れか様に装置の各自由度のうち  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  (各自由度構成は、Fig2参照) を調節して位置制御を行なうのであるが、ヒトの腕は、手首の位置を決め、肩と手首を結ぶ直線を軸として肘が回転する為、手首の位置だけでは腕の形が一義的に決まらない。そこで、この問題を解決する一手段として、ヒトの腕の状態を決定する上で有効な肘のほり角  $\theta_0$  を用いることにする。 $\theta_0$  は肩、肘、手首の3点を含む平面  $\pi$  と、肩と手首を結ぶ直線を含む鉛直面とのなる角度である。従って、肘のほり角と手首の位置が分かれば平面  $\pi$  が決まり装置の状態が決定される。このほり角  $\theta_0$  は、実験より次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Z_w > 0 \quad \theta_0 &= -0.1828 X_w + 0.0929 Y_w + 0.486 Z_w + 65.0 \\ Z_w < 0 \quad \theta_0 &= 0.1052 X_w + 1.199 Y_w - 0.62 Z_w + 65.0 \end{aligned} \right\} \text{式1}$$

この様に求めたほり角  $\theta_0$  と、空間座標系によって設定した手首の位置を  $\theta_1$  として各関節の回転角  $\theta_1 \sim \theta_4$  を求め、その値により装置の位置制御を行なう。

手首の座標  $(X_w, Y_w, Z_w)$  と式1より求めた  $\theta_0$  により肘座標  $(X_e, Y_e, Z_e)$  を幾何学的に求めると、以下に示す式の様になる。

$$\left. \begin{aligned} X_e &= l_1 \cos \psi \cos (\tau - \epsilon) \\ Y_e &= l_1 \cos \psi \sin (\tau - \epsilon) \\ Z_e &= l_1 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \cos \psi + l_1 \cos \theta_0 \sin \psi \end{aligned} \right\} \text{式2}$$

ただし、



$$L = \sqrt{X_W^2 + Y_W^2 + Z_W^2}, \quad \cos \theta = \frac{L^2 + l_1^2 - l_2^2}{2Ll_1}, \quad \cos \phi = \frac{\sqrt{X_W^2 + Z_W^2}}{L}, \quad \sin \phi = \frac{Y_W}{L}$$

$$\tan \tau = \frac{Y_W}{X_W}, \quad \cos \varepsilon = \frac{(l_1 \cos \phi)^2 + (l_1 \cos \theta \cos \phi)^2 - \delta^2}{2l_1 \cos \theta \cos \phi \cos \phi_1}, \quad \delta = l_1 \sin \theta \sqrt{1 - (\cos \theta \cos \phi)^2}$$

又、器具の状態を表わす  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  の角度と手首、及び肘の座標の関係を幾何学的に求めるに以下の様になる。

$$\theta_4 = \cos^{-1} \frac{L^2 - l_1^2 - l_2^2}{2Ll_2} \quad (L^2 = X_W^2 + Y_W^2 + Z_W^2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{X_E Y_W - Y_E X_W}{l_1 l_2 \sin \theta_4}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{Z_E}{l_1 \cos \theta_2}$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{l_1 (X_E \sin \theta_2 \cos \theta_3 + Y_E \sin \theta_3)}{X_E^2 + Y_E^2}$$

(2) DDA

器具の手首部(器具装着者の手首部)を空間格子中の任意の一点に位置させる為には、全自由度のうち、肩の3自由度( $\theta_1 \sim \theta_3$ )、肘部の1自由度( $\theta_4$ )を制御する。器具装着者の前額面に設定した格子空間において、各軸10cm以下の区分された小領域では、各自由度変数の変化は線型であると見なせる故、器具の動作は次の方程式で表わされる

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + B \quad \text{式3}$$

ここで、 $a_{11} \sim a_{43}$ は各関節の軸方向に対する傾斜係数であり、 $B$ は初期状態での器具の位置ベクトルを表わす。

時間 $\Delta t$ ごとの各自由度の角度変化 $\Delta \theta_1 \sim \Delta \theta_4$ は、

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad \text{式4}$$

で表わされる。X軸方向にのみ注目するとこの方程式は、

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \end{pmatrix} \Delta X \quad \text{式5}$$

と表わされる。Y、Z軸方向にのみ同様に取り扱いはできる。方程式はいわゆるオイラーの数値積分方程式と呼ばれるもので、その解は次式で与えることができる。

$$\theta_i(t) = \int_0^{t_i} \dot{\theta}_i dt + \theta_i(0) \quad \text{式6}$$

ここで、 $i = 1 \sim 4$ 、 $\theta_i(0)$ は初期値を表わす。

この方程式は、DDA(デジタル微分解析器)を用いて解法することができる。DDAは2つのレジスタと1つの加算器より構成される。その動作を以下に示

す。

① Rレジスタを初期クリアした後、Eレジスタに被積分値 ( $\theta_1 \sim \theta_4$ ) をセットする。

② 加算器は  $\Delta t$  の時間間隔毎にEレジスタの内容をRレジスタに加え、Rレジスタが加算の結果として、オーバーフローを生ずるごとに  $\Delta Z$  の出力パルスを得る。

③ 加算回数  $n$  はRレジスタの大きさ (= Eレジスタの大きさ) の関数として決定され、その回数分加算を終了すると  $\Delta Z$  に被積分値と同数の出力を得る。

④ 従って、 $\theta_1 \sim \theta_4$  の4自由度に対して、同一の時間間隔でDDA動作による演算を実行すれば、4自由度の協調動作が可能となる。

DDA動作を  $\theta_1 \sim \theta_4$  に1つずつおいていくと、時間経過を  $t_1 \dots t_n$  に従って各自由度は次の様に変化する

$$\theta_1(0), \theta_2(0), \theta_3(0), \theta_4(0)$$

$$\theta_1(n), \theta_2(n), \theta_3(n), \theta_4(n)$$

又、各自由度のオーバーフローに角度増加分は次の様になる。

$$\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}$$

$$\theta_{12}, \theta_{22}, \theta_{32}, \theta_{42}$$

$$\theta_{1n}, \theta_{2n}, \theta_{3n}, \theta_{4n}$$

式 (7) の終点時刻を  $\Delta t$  とすれば、

$$\theta_1(1) = \theta_1(0) + \theta_{11}$$

$$\theta_2(1) = \theta_2(0) + \theta_{21}$$

$$\theta_3(1) = \theta_3(0) + \theta_{31}$$

$$\theta_4(1) = \theta_4(0) + \theta_{41}$$

$$\theta_1(n) = \theta_1(n-1) + \theta_{1n}$$

$$\theta_2(n) = \theta_2(n-1) + \theta_{2n}$$

$$\theta_3(n) = \theta_3(n-1) + \theta_{3n}$$

$$\theta_4(n) = \theta_4(n-1) + \theta_{4n}$$

式 7

このDDAによるパルス分配方式は、マイクロコンピュータにより、2つのレジスタをプログラムで設定し、加算を規定回数だけ繰返すことにより容易に実行できる。又、各自由度の変位に相当する被積分値は、予め計算を行ない、固定メモリ中に格納しておくことで、必要に応じて空間格子中の任意の位置をすおやがに叩き出すことができる。

まとめ

本研究の目的は、マイクロコンピュータ制御による携帯型動力装置システムを開発することであった。携帯型という点に注目すると、現段階では、制御装置、電源等外見約には未だ大きく、実生活中で実際に携帯して使用出来る迄には至っていないが、本体構造、制御手法等その有効性が検証され、将来予想される各部件の小型・高密度化に伴いその実用性を確保出来る。今回の試作では、機能面を重視した為に、コマンド数が多くなり、全体に長いものとなった。今後、フィールドテストを通し、実用は何ヶハード、ソフトの改良と計画予定である。