

マイクロコンピュータを用いた計測補助システムの開発

渡部 雅俊*・桑川 政則**・三枝 孝晴**
寺本 秀明**・岸本 健***

Development of a Supporting System for Measuring Apparatus with Micro-computer

By Masatoshi Watanabe*, Masanori Kumekawa**, Takaharu Saegusa**
Hideaki Teramoto** and Ken Kishimoto***

Synopsis: Supporting system for spatial measuring apparatus with sensor which has four degrees of freedom was designed and manufactured. It is the point of design that this system has the sufficient accuracy and is controlled these degrees of freedom with open-loop control by micro-computer. In the materials, we report the process of manufacturing, the selection of machinery elements and electronic circuits of control devices.

要旨：4自由度を駆動する計測補助装置を設計し製作した。設計の観点は、この各自由度はマイクロコンピュータの開ループ制御で行ない、計測補助装置として必要な精度を保持することである。精度の点ではまだ不十分であるがここではマイクロコンピュータを用いた制御例を報告する。

1. はじめに

実験結果を、より正確なものとするために多量の測定点よりデータを採取する事が必要となる。ここでは比較的小規模の空間三次元での多量の測定を迅速かつ正確に行なえる測定補助装置を考案し製作した。従来これはスケールを読んで手で位置決めを行ない、その位置で得たデータはセンサ等を介してペンレコーダに記録し、そのグラフを人間の目でもって拾い以後のデータ処理を行なってきた。これではデータ処理するうえで時間がかかり、測定する人の個人誤差を含めかなりの誤差が生じてしまう。そこで測定補助装置にマイクロコンピュータを組み込み制御させることにより迅速かつ正確に駆動し、またデータの一次処理を行えるように考えた。また将来はグラフィック表示、簡単な時系列処理をも可能になるように考えた。本資料ではこの方法を紹介し、このよう

な測定補助装置の必要性を感じている研究者への参考としたい。

2. 設計・製作方針

測定補助装置としては基礎燃焼工学研究等で行なわれる開放炎、一部壁のある火炎についての実験を対象にし、ピトー管や熱線風速計等のプローブの移動を考えているため、前後(X)、左右(Y)、上下(Z)移動のほか上部回転(R)の4動作のできる方法を考案した。その装置を写真1に示し、諸元は表1に示す。また制御動作範囲としては広い方が良いが対象とした実験等を考え300mmスパンで十分として採用した。重量は安定性と移動性の境界となる50kgを目安にとり、一体構造として十分な剛性をもつように考慮してある。最小制御移動量としては、位置決めやゼロ点調整を正確に行なうために、より細かくする方が良いと考えられるが、移動の高速度や制御方法、移動のための駆動トルクを考え表1のようにしたが、製作完成後には、上下移動量はもう少し粗くてもモータトルク上さしつかえないという結果を得ている。実施、製作にあたっては、できるだけ仕様に合った半完成品の規格品を多く用い、しかも製作しやすい形状にす

* 工学部技術職員 (技手)
Technician, Mechanical Engineering Division

** 工学部機械工学科学生
Graduate, Mechanical Engineering Division

*** 工学部機械工学科助教授
Associate Prof., Mechanical Engineering Division

ることで簡易化を計った。規格品を多く用いる事により信頼性、耐久性の向上、製作時間の短縮ができるが経費の上での制約上、性能にさしつかえないところ及び、独自の設計方針で自作せざるを得ないところは自作とした。

2.1 駆動方式

駆動方式として、チェーン&スプロケット、ラック&ピニオン、ボールねじ等が考えられるが、位置決めの際の、起動・停止時におこる激しい負荷にはチェーン&スプロケットは不相当と考えられ、また正確な移動量が必要のためバックラッシュがおこるラック&ピニオンも不相当と考えられる。その点ボールねじを用いた場合一般のすべり接触のねじに比べおこる接触のため効率がよく、バックラッシュもダブルナットを応用した方式によりゼロにすることもでき、最小制御移動量も細かくできるし、他の方式に比べて小型・軽量のため X・Y・Z の各軸に採用している。駆動ガイドとしては X・Y 軸にはダブルナットを応用したボールスライドユニットを用い、Z 軸には単一ボールナットとスライドブッシュを用いた。R 軸においては回転運動を行なうため歯車を用いた。

ボールねじは、小型・軽量で作動範囲の大きいものとして、ねじ外径 14 mm のものとし、X, Y 軸はリード 5 mm, Z 軸はリード 4 mm のものを用いた。このボールねじに X 軸ではシャフト径 20 mm のもの、その上に乗る Y 軸ではシャフト径 16 mm のボールスライドユニットを用いた。Z 軸に用いる減速機としては、ねじと同様に十分な強度をもち、かつ駆動時の騒音を抑制するため、一部プラスチック製を採用し、小型・軽量になるように選んだ。

2.2 駆動力

機械の駆動力として、AC モータ、DC モータ、空気圧、油圧、ステッピングモータ等が用いられているが、測定補助装置の駆動力として要求される特性は、停止時の保持トルクがあり、加減速特性、位置決め精度が良く、制御方法が容易で、駆動による振動が他の機械系との共振を起こさないことである。AC モータや DC モータには停止時の保持トルクを作ることが難しく、位置決めのためにはロータリーエンコーダ等の角度検出が必要になり、トルク制御と速度制御の両者を最適化するのが比較的困難なことで不相当と考えられる。空気圧や油圧では、駆動力発生や制御方法に付加機器が多くなり不相当と考えられる。ステッピングモータでは、停止時の保持トルクも高く、加減速特性も良く、位置決めもパルス数でできるため位置検出の必要がなく、マイクロコンピ

ュータによる直接制御も容易で、機械系の振動に影響されにくいなどの駆動力として要求される特性を満足しているため採用した。

3. 仕様決定

測定補助装置の各軸の仕様は、表 2 に示す。

3.1 X・Y 軸作動装置

X・Y 軸の作動装置として、ステッピングモータ、ボールねじ、2つのボールスライドブロックで構成している。ステッピングモータの駆動にともなってボールねじが回転し、ダブルナットを応用した2つのボールスライドブロックが2本のガイドシャフト上を移動するようになっている。制御作動範囲を広くするためボールねじの全長を使用できるようにステッピングモータとの接続は考えてある。それにより制御作動範囲は 280 mm 確保された。最小制御移動量は 0.025 mm/pulse となった。

3.1 Z 軸作動装置

Z 軸の作動装置として、ステッピングモータ、減速機、ボールねじ、スライドブッシュで構成している。ステッピングモータの駆動にともなって、ウォームギアを用いた減速比 1/20 の減速機により、ボールねじを回転させてスライドブッシュと接続している軸が上下移動するようになっている。軸はボールねじの慣性で回らないように

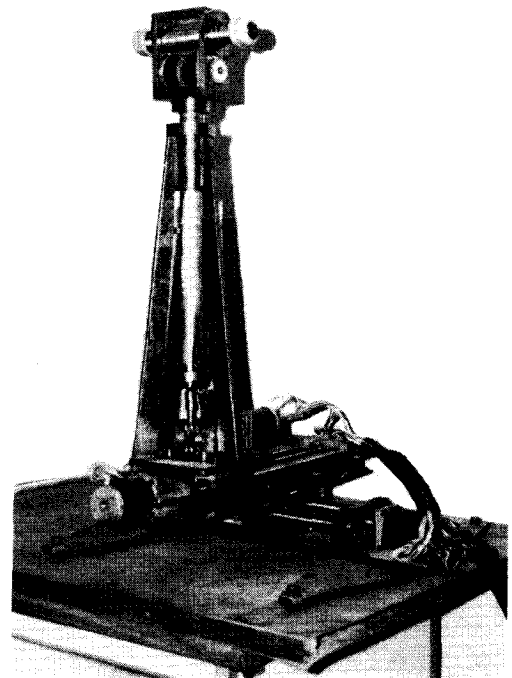


写真 1

キーを取り付け回転止めをしてある。制御作動範囲は 280 mm を確保し、最小制御移動量は減速比1/20、ボールねじのリード 4 mm より 0.001 mm/pulse となった。

3.3 R 軸作動装置

R 軸作動装置として、ステッピングモータ、歯車、測定装置固定部で構成している。R 軸は測定補助装置の一番上に乗るために、できるだけコンパクトにまとめた。ステッピングモータの駆動にもなって、平歯車 2 枚を用い 1/2 に減速された歯車列を用いて、測定装置固定部に接続し回転するようになっている。測定装置固定部はテーパ状の締めつけ輪を用い、キャップを締めつけることにより、ピトー管や熱線風速計等のプローブを固定し、回転しながらデータを測定できるようにしてある。なお固定できる最大径は φ18 mm となり、最小制御移動量は 0.9度/pulse となった。写真 1 に形状を示す。

4. 動作仕様の設計

前述のように各軸のステッピングモータを選定したがここでは動的な仕様の設計を行なった。

モータ軸換算軸負荷トルク T_0

$$T_0 = \frac{N_p}{N_w} \left(\frac{\mu g W}{2\pi\eta} \right) \cdot P_s \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (1)$$

負荷イナーシャのうち、ねじ上のワークのイナーシャは

$$J_w = \frac{W}{g} \left(\frac{P_s}{2\pi} \cdot \frac{N_p}{N_w} \right)^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2)$$

その他、ねじ軸のイナーシャは

$$J_s = \frac{1}{8} \frac{W_s D^2}{g} \left(\frac{N_p}{N_w} \right)^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3)$$

モータ回転子イナーシャ J_R を加えると全イナーシャは総和となる。

$$J = J_w + J_s + J_R = J_0 + J_R \quad (4)$$

ここで

- W : 重量 kg
- P_s : ボールねじのリード
- μ : ボールねじの送り摩擦係数
- η : ボールねじ効率
- $\frac{N_p}{N_w} = \frac{\delta_s}{P_s}$: 減速比
- δ : 最小移動制御量
- s : モータ 1 回転パルス数

またステッピングモータでは、最高回転数 (パルスレート) に至るまでパルス周波数をコントロールしてゆく必要や、減速に対しても同様の制御を必要とする。これは回転速度 ω に対して簡単に

$$T_0 = J \frac{d\omega}{dt} + T_p \quad (5)$$

という関係で求められる、必要速度と負荷自励パルスレート (ここでは 50 Hz と仮定) より求めた加減速時間は、

$$t_p = \frac{J(\omega_s - \omega_0)}{T_0 - T_p} \quad (6)$$

となる。

これらの式と表 1、表 2 およびモータのトルク-イナーシャ曲線 (図 1)、モータの仕様 (表 3) から算出したものを表 4 に示す。

表 4 に見られる諸値のうち必要速度が小さいのは、マサツ、工作精度などを考慮して本測定補助装置としての

表 1 測定補助装置諸元

	X 軸	Y 軸	Z 軸	R 軸
制御作動範囲 L	280 mm	280 mm	280 mm	正・反転
最小制御移動量 δ	0.025 mm/pulse	0.025 mm/pulse	0.001 mm/pulse	0.9 度/pulse
重量 W kg	27	15	4	2

表 2 各軸の仕様

		X 軸	Y 軸	Z 軸	R 軸
ボールねじ	軸径 D mm	14	14	14	—
	リード P_s mm	5	5	4	—
	摩擦係数 μ	0.05	0.05	0.05	—
減速機	種類	—	—	ウォームギア	平歯車 $m = 1$ $Z_p = 72, Z_w = 36$
	減速比 N_p/N_w	—	—	1/20	1/2

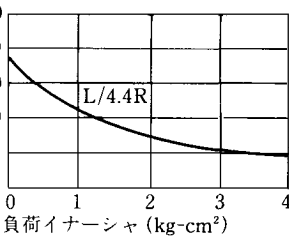
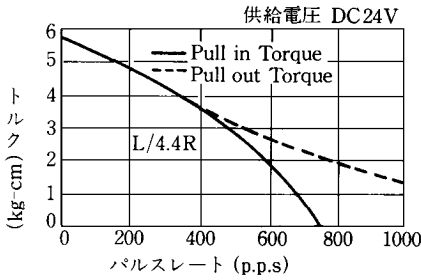


図1 モーターの動特性

最悪値を用いたものであるが、工作精度を向上させるるとこの値は4~7倍に見積ることができる。この最悪値を用いると加減速時間の数秒のオーダーとなることがわかる。このため、加減速度の決定はこの装置の電子制御部で配慮した。

5. 制御装置

マイクロコンピュータを用いた制御部は図2に示す形と構成をもっており、拡張したものとしては参考文献1に示してある。本報告では補助システムのアクチュエータ部の制御装置の設計のみを示す。

制御装置は大別して表示部、マニュアル操作部およびステッピングモータ制御部から構成されている。

ステッピングモータの駆動は前述のように加減速運転をする必要があり、加速・減速度は負荷によって定まる。ここでは負荷は定まっているためこの加減速度は固

表3 ステッピングモーター仕様

型 式	Type	式	値
電 圧	Voltage	DC. V	5.4
電 流	Current	A/Phase	1.5
巻線抵抗	Resistance Per Phase	Ω	3.6
相 数	Phase		4
励磁方式	Excitation	Phase	2
温度上昇	Temperature Rise	deg	80
絶縁種	Insulation Class		B
インダクタンス	Inductance	mH/Phase	10
ダイナミックトルク	Dynamic Torque	kg-cm (at 10 PPS)	5.5
ホーディングトルク	Holding Torque	kg-cm	6.0
応答周波数	Response Frequency	PPS	1000
1ステップ角度	Step Angle	°	1.8
回転子慣性モーメント	Rotor Inertia	g-cm²	230
回 転 方 向	Rotation		正逆 (Bi-Directional)
減 速 比	Gear Ratio		—

定することができ回路は容易となる。

この加減速のためパルスレートは台形波となるが本装置ではV.C.Oを用いたアナログ回路により作り出した。

台形波発生部での台形波発生の方法は図3に示す。TTLレベルのステップ入力があるとCR部の応答性が

表4 動作仕様

	X軸	Y軸	Z軸	R軸
軸負荷トルク $T_0 N \cdot m$	1.504×10^{-3}	0.836×10^{-2}	0.975×10^{-4}	4.59×10^{-3}
摩擦・軸受トルク ¹⁾ $T_p N \cdot m$	9.81×10^{-2}	9.81×10^{-3}	9.81×10^{-3}	4.91×10^{-2}
全トルク $T N \cdot m$	1.131×10^{-1}	1.065×10^{-1}	9.91×10^{-3}	5.37×10^{-2}
負荷イナーシャ $J_0 kg \cdot cm^2$	4.25×10^{-6}	3.47×10^{-6}	6.66×10^{-9}	1.498×10^{-5}
必要回転数 $N rpm$	180	180	360	22.5
必要速度 $v mm/sec$	15	15	1.2	67.5度/sec
加減速時間 $t_p sec$	1.898×10^{-1}	1.898×10^{-1}	3.80×10^{-1}	2.37×10^{-2}

1) 自作のため軸合せなどに必要精度を十分に満たせなかったため偏心や軸受での摩擦を考え推定で多めに加えておいた

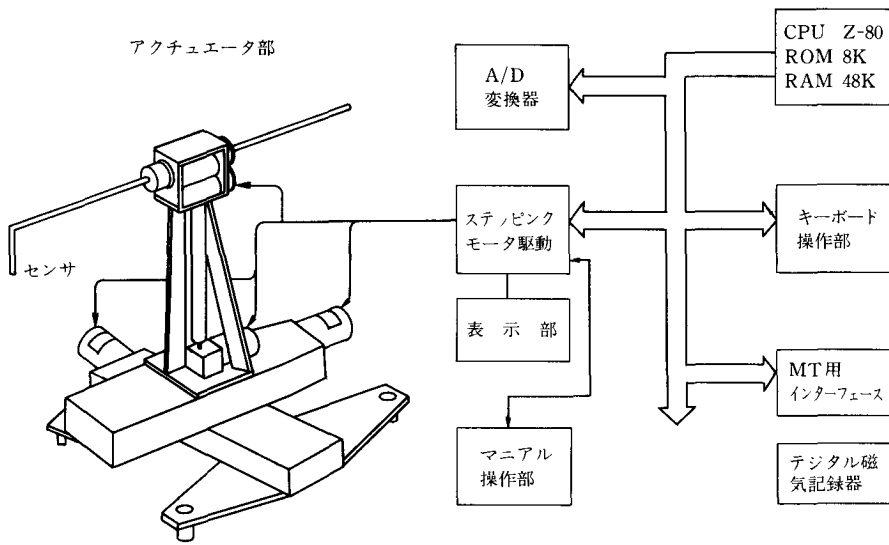


図2 計測補助システム

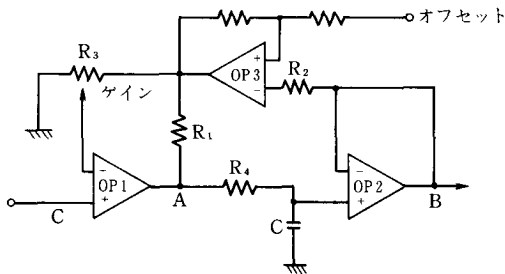
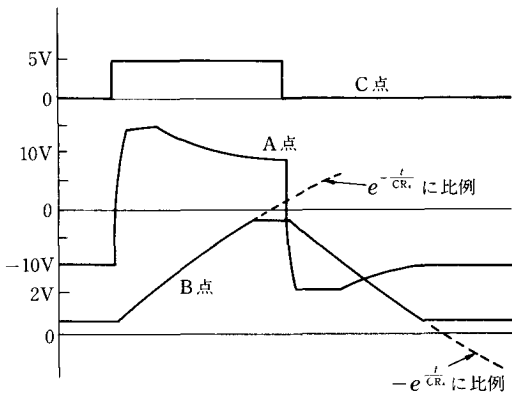


図3 台形波発生器

悪く R_1 が大きいため一時的に OP1 アンプの開特性に近い形でドライブされ④点は電源電圧まで振り切れ、この電圧で C にチャージされる。C のチャージがある電圧に

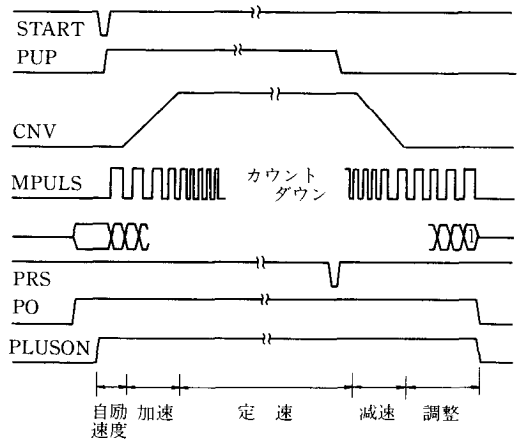


図4 加減速のタイミング図

達すると R_2 と OP3 を含んだ部分からの電圧が上昇してくるためゲインは R_3 で決まる閉特性となる。つまり、C.R が平衡に対するまでは電源電圧に等しいステップ入力となるため、CR で決まる時定数の約60%の直線で近似できる部分を作り出すことができる。こうして、ほぼ直線に近い肩部をもった台形波を作ることが可能となり、 R_1 と R_3 を調整することで、上昇速度と上下限值を決定することができる。このアナログ制御電圧で次段の V.C.O を制御するという方法でステッピングモータの加減速を行っている。このようにパルスレートの加減速は図3の台形波発生部の CR によるオーバードライブ型のものを採用して決定しており、設定は可変抵抗器で

調整した。この台形波発生部から出た制御電圧は電圧制御発振器 (V.C.O.) に入りパルス列を出力する。この制御のタイミング図は図 4 に示されたものになる。マイクロコンピュータから16ビットカウンタにデータがセットされるか手動でスタートボタンがおされると、上昇信号 PUP が ON し、制御電圧は加速状態となる。その後ある時間たつて定速運転され、カウンタ内容が減速に必要なパルス数以下になるかストップボタンがおされると上昇信号が OFF し減速状態となる。そして最小速度でパルス数を0までもってゆく調整区間を経て、カウンタ内容が1→0となるとP0が出力し、PLUSON 信号を OFF してパルス発生を止める。こうしてマイクロコンピュータでセットされた量移動することになる。このパルスはステッピングモータ4つのうち指示されたモータのみを駆動する。そして、0.1 mm に対して1カウントに相当するように分周された後6 digit, 4チャンネルの表示部へ送られる。図 5 に全体図を示す。

マニュアル部とマイクロコンピュータではマニュアル部に優先権をもたせ、マニュアル操作部のボタンのどれかがおされるとマニュアルコントロールとなれるようにし、暴走時の事故防止対策をしている。

運動精度は各部分のフルスケールを往復させて同一点にもどるかどうかで判断すると、7~8回のうちで1回は1パルスに相当するだけの誤差を生じる。しかし移動距離は設定パルス量通りである。この精度は測定補助システムとしてはまだ不十分である。この誤差を生む原因は図 5 の MPLUS と PLUSON の間の相同期と16 bitカウンタのエッジ検出がずれるため数回に1回検出ずれをおこすことだと思われる。また、補助システムが移動中に剛性不足で揺れを生じるなどの欠点が見うけられた。

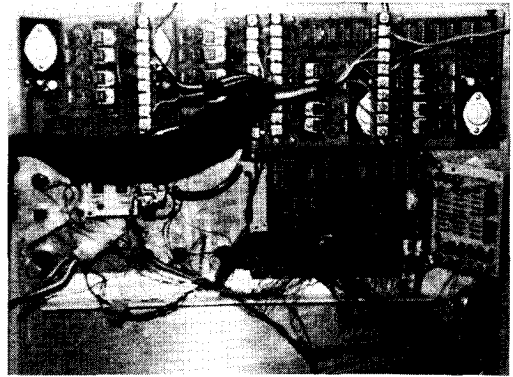


写真 2

現在はその欠点の改良を行なっている。

6. 具体的応用の若干案

本装置のような移動装置は、2次元の移動自由度をもったものが市販されているが3次元の移動性をもつものはない。本装置の本来の目的は火災の空間分布を計測するための一種のマジックハンドであるが、空間分布の測定では多くの適用方法が考えられる。

燃焼においては、回転軸に数本のセンサを取り付け同一空間点での火災温度、流速、火災中のガス組成、火災の輻射率などの測定が、熱電対、水冷ピトー管、吸引プローブなどの測定センサをいちいち取りかえることなく測定が万能となる。また回転軸上に方向性をもった情報、例えばピトー管や熱線流速計をとりつければ方向と大きさの測定が可能となり、最大方向とその値を見つけることも容易となる。

接触センサを用いれば3次元物体の外形測定もできる。

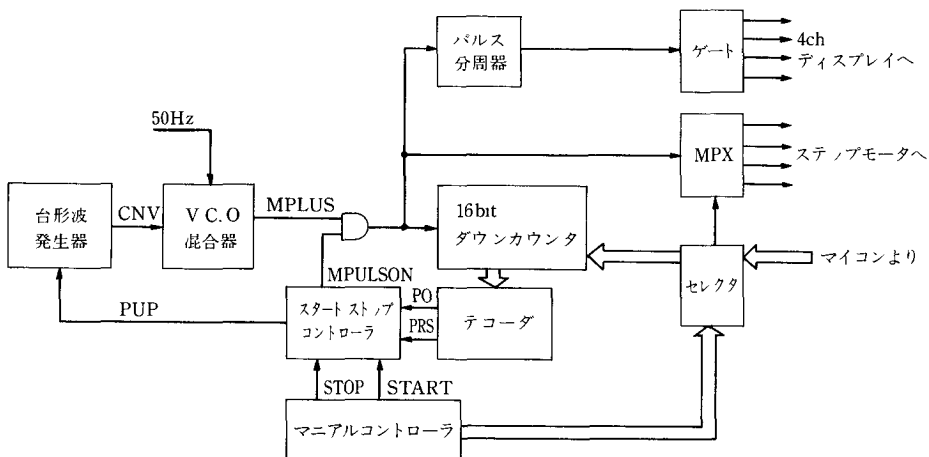


図 5 駆動部構成図

このように3次元測定を自動化する上では大変有用性の高い装置となり、センサを介したフィードバックループを形成することも可能となり応用性も広い。

本報告資料では、補助システムの中の移動装置部分の紹介をしたが、現在テストした中では、測定をある点で行ない、次の点に移動し計測した値が安定したのを判断して測定値を表示して次へ移動するという単純作業では設定した加減速度、移動速度は設計点以上の値を探ることができるが、振動のために位置決めが遅れた、という欠点があるが応用性を議論する上では大きな問題とはならない。

7. おわりに

本資料では、ハードウェアに大半依存した形のステッピングモータを用いた可制御機械の設計例をもとにしてその設計プロセスと考え方を発表することになった。要約すると、最終制御は人間という人間-機械系において、どの部分をマイクロコンピュータに依存させ、肩代りをさせるかという判断が各種機械要素を設計・組立てゆく上で重要であり、それによって出来る機械が全く異なったものになる可能性をもつという事である。

(原稿受付 昭和56年10月5日)