



制御系解析・設計のシステム化を目指して

——古田研究室～制御工学科——

今回、我々は制御工学科の古田研究室を訪れた。「制御工学」とは、「ある環境の中におけるシステムに対して目的に合うように所定の操作を加えるにはどうしたらうまくいく

かを研究する分野」である。現在、この分野において古田研究室は「制御系解析および設計のシステム化」をメインテーマに研究をすすめている。



現代制御理論の発展と古田研究室

古田研究室の歴史は古い。すでに研究室が出来てから20年も経っているのである。当然、先生は数多くの研究をされてきたわけで、ここに全てを挙げ、それについて説明していかうとするのは非常に困難である。そこで、今回は取材の内容をもとに研究の大きな流れに沿って概略だけを順をおって見ていきたいと思う。

〈モデルを作るには………?〉

いま、外からの刺激に対してさまざまな反応を見せる謎のシステムがあったとする。それを思い通りに操作して、ある目的を達成したいと考えたとしよう。あなたならどうするであろうか。まず、対象となるシステムを理解したいと思うであろう。そのためには、そのシステムと同一視でき、かつ人間が理解しやすく理論的アプローチがしやすいものを作るという作業が必要になる。つまり「モデルを作る（モデリング）」という作業が必要になるのである。

(→図1)

では、モデルを作るにはどうしたらいいであろうか。それには対象に対していくつものテストシグナルを入れてそのレスポンスを記録していき、テストシグナルとレスポンスの

対応関係を分析するのである。例として、謎の人物Mr. Xさん（システムに当たる）を考えよう。彼は今、とある会社に入るために面接にきているとする。ここで、面接室での一連のプロセスに注目していただきたい。このプロセスを簡単にまとめると次のようになる。

- (1) 人事部長が Mr. Xさんに質問をする
- (2) Mr. Xさんが質問に答える
- (3) 人事部長がその答えをもとに書類を作成する
- (4) 必要なだけ(1)～(3)を繰り返す

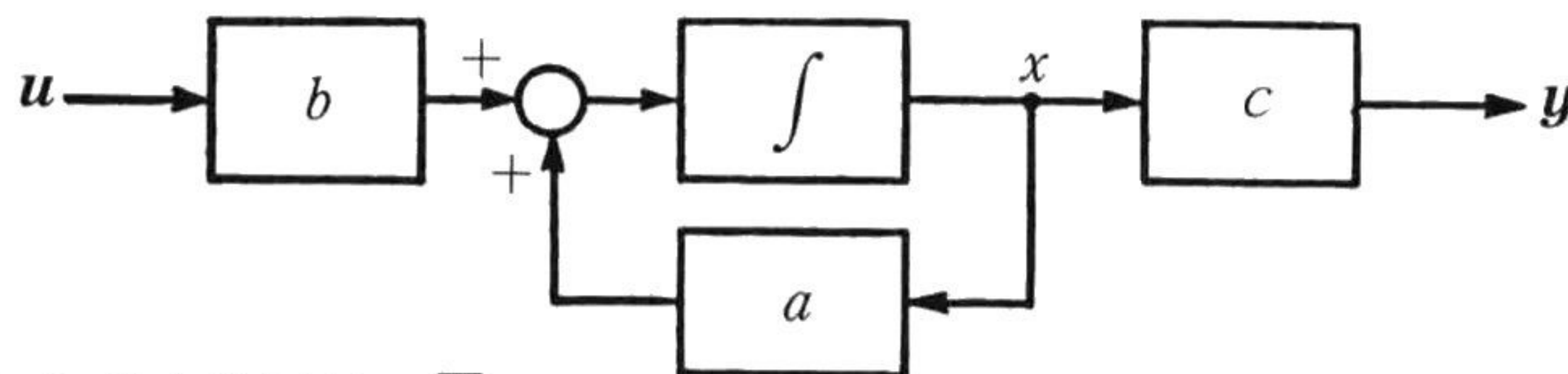


古田 勝久 教授

(1) 微分方程式およびその他の数式的表示

$$y(t) = ce^{at}x(0) + \int_0^t ce^{a(t-\tau)}bu(\tau)d\tau$$

(2) ブロック線図



(3) シグナルフロー図

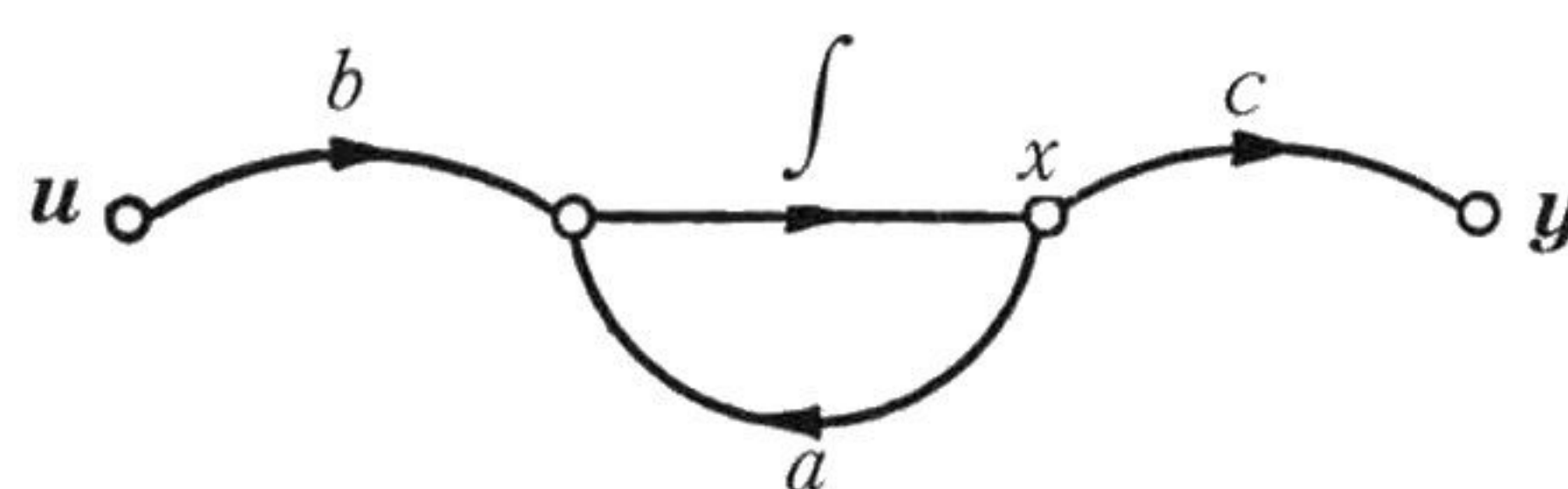


図1 モデルの例

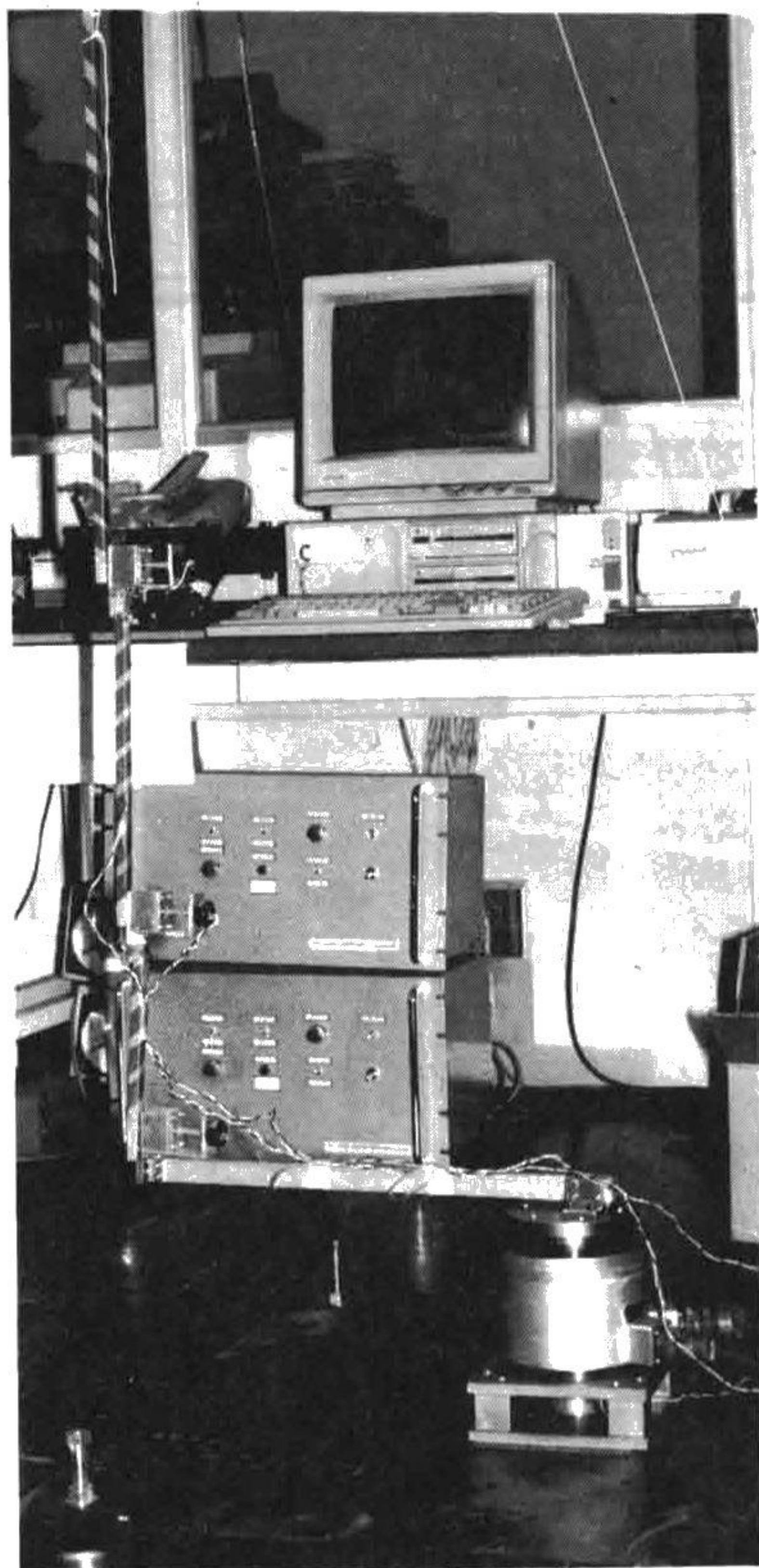


写真1 倒立振子

関節のついた棒を下で左右にバランスをとることにより倒立させている。現在は3本の棒をつないだ三重倒立振子が試作されている。

(1)がテストシグナルの入力に当たり、(2)がレスポンスの出力に当たる。そして、(3)がテストシグナルとレスポンスの記録、さらにその対応関係の分析に当たるわけである。以上のことは一見簡単な作業のように見えるが、じつはそうでもないのである。なぜなら、まず第一にどのようなテストシグナルを入れたら意味のある、つまり、良いレスポンスが得られるかが分からないからである。さらには、出てくるレスポンスが一般に複雑で分かりにくいことが多いからである。しかし、完全な数学的モデルを作ることとをあきらめ、単純化した近似的モデルを作ることとは可能であろう。つまり、ある拘束条件、たとえば、それが線形なシステムであるなどという条件のもとでモデルを作ってしまうというのである。

〈そしてシステムの構造へ〉

上のようにして苦勞して一つのモデルが出来上がったとしよう。が、次にそのモデルが本当に意味を持つモデルなのかが問題となってくる。例えば、そのモデルをいろいろな条件下においてその挙動を調べたとき実際のシステムの挙動と食い違ってしまったりは意味をなさない。また、すぐに暴走してしまう不安定なモデルも意味がない。もし不幸にもそのようなモデルを作ってしまった場合には、先に述べたモデリングの作業

を繰り返すことになるわけである。このようにして意味のあるモデルを作っていくのであるが、以上のような“あてずっぽう的”なアプローチではどうしても無駄が多くなる。そこで、理論的なアプローチを試みることになる。そうすることによってシステムの本質が見えてくるのだ。具体的には、システムのある部分が制御できるのかできないのか（可制御性、不可制御性）、また、観測できるのかできないのか（可観測性、不可観測性）が分かってくるのである。こうして、研究テーマはその後古田研究室のメインテーマの一つとなる「システムの構造の解析」へと移っていったのである。（→図2）

〈だれも認めてくれない！〉

これまでに書いてきた研究の内容はどちらかといえば地味であり、いまいち具体性に欠け理解しにくい。というわけで、予想されるとおり、まわりの反応もかなり冷やかなものであった。なかなか研究の内容の価値を認めてくれなかったのである。そこで、古田先生はこれまで研究してきた新しい制御理論を理解し使ってもらうために、それがいかに応用できるかを考えるようになられたのである。そして、先生は、理論的にはすでに解決されていた「倒立振子の振り上げ制御」、「二重倒立振子の安定化」（→写真1）などをテーマに挙げ、世界に先駆けて実現されたのである。こうして新しい制御理論は徐々に一般に認められるようになっていったのである。

〈制御系の解析から設計へ〉

理論を応用して実際に制御系を設計していくとまた新たな問題にぶつかる。それは「あらゆる場合において安定、かつ可制御、かつ可観測な制御系を設計することがいかに難しいか」という問題である。そして古田研究室のもう一つのメインテーマ

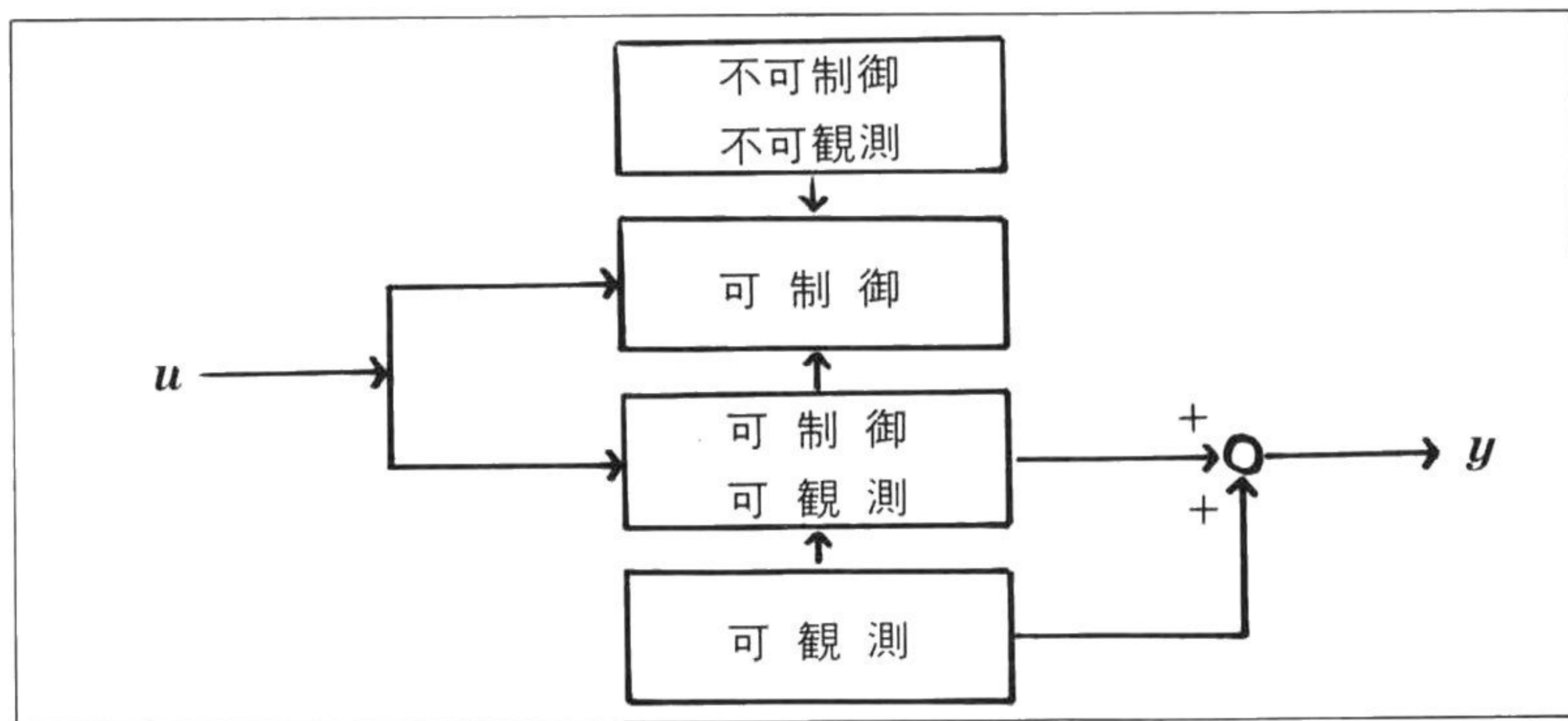


図2 一般的なシステムの構造

である「制御系設計のシステム化」の研究がされるようになったのである。具体的には、C A D (Computer Aided Design) の開発などがあげられる。

〈そして現在に至る〉

最近、古田研究室はロボットを研究テーマとして本格的に取り上げるようになった。そして、現在に至るわけである。



ポスト現代制御を目指して…

古田研究室では、これまで「制御系解析および設計のシステム化」をメインテーマとして研究が続けられてきた。そして、このテーマに対するアプローチとして、「安定性」、「可制御性」、「可観測性」といった要素を重要視し厳密なモデルを作るといった立場をとってきた。それについては現在もなんら変わるころはない。が、最近、新しい要素が付け加わった。それは、「ロバスト性」である。つまり環境の変化に強いモデルを作ろうというのだ。ここで従来の制御系を考えてみよう。これまで制御対象となってきたものは実は全て終始一貫して状態の変わらないものであった。例えば、先ほど出てきた二重倒立振子では、長さや質量はあらかじめ分かっている、そ

以上がこれまで古田研究室が行ってきた研究の概略である。最初にも述べたようにこれで全てを語ったわけではない。古田先生はこの20年間で非常に多くのことを研究されてきたのである。が、研究のメインテーマは「制御系解析および設計のシステム化」にあることを、我々は忘れてはならないのである。

れをもとにモデルを作っていたのである。そのため条件が変わるととたんに駄目になってしまったのであった。これはかなり致命的な欠点となる。そこで「ロバスト性」ということが重要になってきたのである。

このような流れの中で、現在は大きく分けて次のようなことが研究されている。

- (1)理論
- (2)ロボット
- (3)デジタル制御（今回は紙面の都合上、取り上げることができない。）

以下それぞれについて具体的に見ていきたいと思う。（今回紹介する研究内容は、古田研究室が行っている研究のほんの一部である。）

ロバスト性とは…

システムの変動や、システムの不確定性に耐え得る性質がロバスト性 (robustness) であり、頑健性という意味で使われている。具体的には次の意味をもつと考えられる。

- (1)システムが安定である場合、どの程度安定であるかをしるす尺度としての概念
- (2)制御系が、モデルの不確定性にいかに影響されにくいかの程度をしるすもの

(1)理論～インテリジェント・コントロール～

インテリジェント・コントロールとはなんだろうか。それを知るには、まず機械系における「インテリジェント」つまり「知能」の意味を知らなければならない。我々は、普段この言葉をなにげなく使っているため、いざ正確な定義を述べよといわれてもなかなか答えることができない。そこで辞書をひいてみると、知能は「環境適応能力」と定義してある。これによれば、インテリジェ

ント・コントロールは次のように考えることができる。すなわち、「不確定で変化する環境の中で、決定したり、戦略を立てたり、練習によって新しい機能を学習する人間の能力や、オペレータの許されない環境で知的能力を代替するもの」と考えることができるわけである。では、具体的に先生のおられる研究を見ていくことにしよう。それには、従来の制御システムとその欠点を知ら

なければならない。図3(a)を見てほしい。従来の制御システムでは、この図のように、時々刻々と出力を入力側に戻して目標値と比べ、その差分を再度入力信号にのせているのである。そのため、急激な目標値変化に対してどうしても応答が遅れるという欠点がある。これをまともに補おうとすれば、さらに高速な演算装置が必要となりコストが高くなってしまい、また、限界もある。そこで先生が考え出されたのが図3(b)のような制御系である。これは制御系に知能を持たせることによって出力側から戻されてくるであろう信号を

環境に応じて予測し、それと目標値との差分をあらかじめ入力信号にのせてしまおうというのである。つまり、目標値そのものを変えてしまうのである。先生は、この目標値のことを「仮想目標値」とよんでおられる。当然、出力側からの信号は戻されているのであるが、これを直接入力側の補正に使っていないところに注目してほしい。出力からの信号は、知識として蓄積され学習に使われるのである。このため、非常にレスポンスがよく、多少パフォーマンスの悪いシステムでもかなりのことができるそうである。

(2)ロボット～マニピュレータシステム～

現在、古田研究室では、「双腕のマス・スレイブ・マニピュレータシステム」というものが研究されている。これは、読んだとおりの意味のもので、「人間が命令した通りに動く二本の腕」である。世にいうマニピュレータシステムを思い浮かべてほしい。それらはすべて腕が一本しかなかったことに気づくであろう。これは大きな欠点となる。なぜならこのことによってロボットに出来る作業が、かなり制限されてしまうからである。片方の腕を骨折してしま

った自分の姿を思い浮かべてもらえればそのことは明らかであろう。それなら単純にマニピュレータを二台並べて作業させればいいじゃないかという人もいるかもしれない。が、そうは簡単には解決しないのである。たしかに物理的には腕が二本になりはしたが、ただそれだけで、二本の腕はそれぞれが自分しか存在しないものと仮定して好き勝手に動いてしまうからである。例えば右の台にあるバレーボールを左の台に移動させたい時を考えよう。マニピュレータ

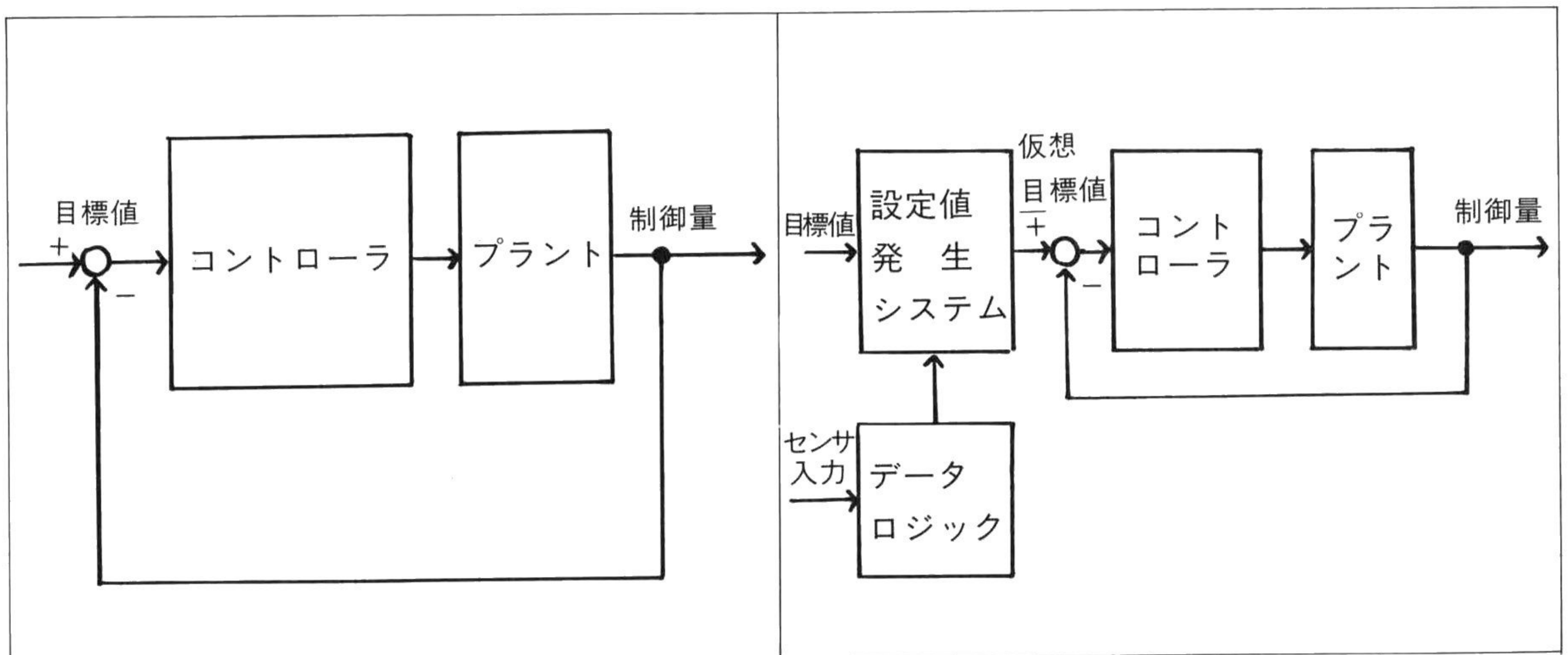


図3(a)

図3(b)

を制御しているコンピュータに与える命令は、移動前のボールの位置と移動先のボールの位置である。もし二本のそれぞれの腕が相手の腕のことを考えずに動いたとするとボールを掴むことも出来ないであろう。なぜなら、腕は同じ座標を目指して動いていきその点で腕がぶつかってしまうからである。では、どうしたら

よいだろうか。古田研究室では、現在、二本の腕の間で通信させることによってこの問題を解決しようとしているのである。ちなみに研究の進行状況であるが、目下のところ、バレーボールを両手で掴んで自由に動かすところまでは成功しているそうである。(→写真2)



今後10年間の展開、そして夢…

最後に、今後10年間に古田研究室が研究テーマをどのように展開していくのか、それから先生の夢について聞いてみた。

- まず前者の問に対してだが、
- ◎制御系をよりインテリジェント化するためにはどうしたらよいか？
- ◎まだ実用化されていない制御理論を実用になるものまでにしたい。
- ◎現存する制御理論とコンピュータを使用してどの程度のことでできるのかを確かめてみたい。

などをあげられた。

次に、先生の夢についてだが、みなさんはCCV (Control Configured Vehicle) という言葉を聞いたことがあるだろうか。言葉の意味は、「制

御するのにもっとも適した形をした乗物」で、具体的には、アメリカのジェット戦闘機に関する研究があげられる。先生は、この概念を拡張されて、CCX (Control Configured X) を夢としてあげられた。すなわち全ての制御系においての「コントロールというアспектから見た場合最も適した形は何だろうか」という問に対して一般的なモデルを出そうというのである。さらには、これを実際に適用して、目標さえ与えれば制御系の設計から始めて最終的にはその与えられた目標を達成してくれるようなシステムを作りたいのだそうである。

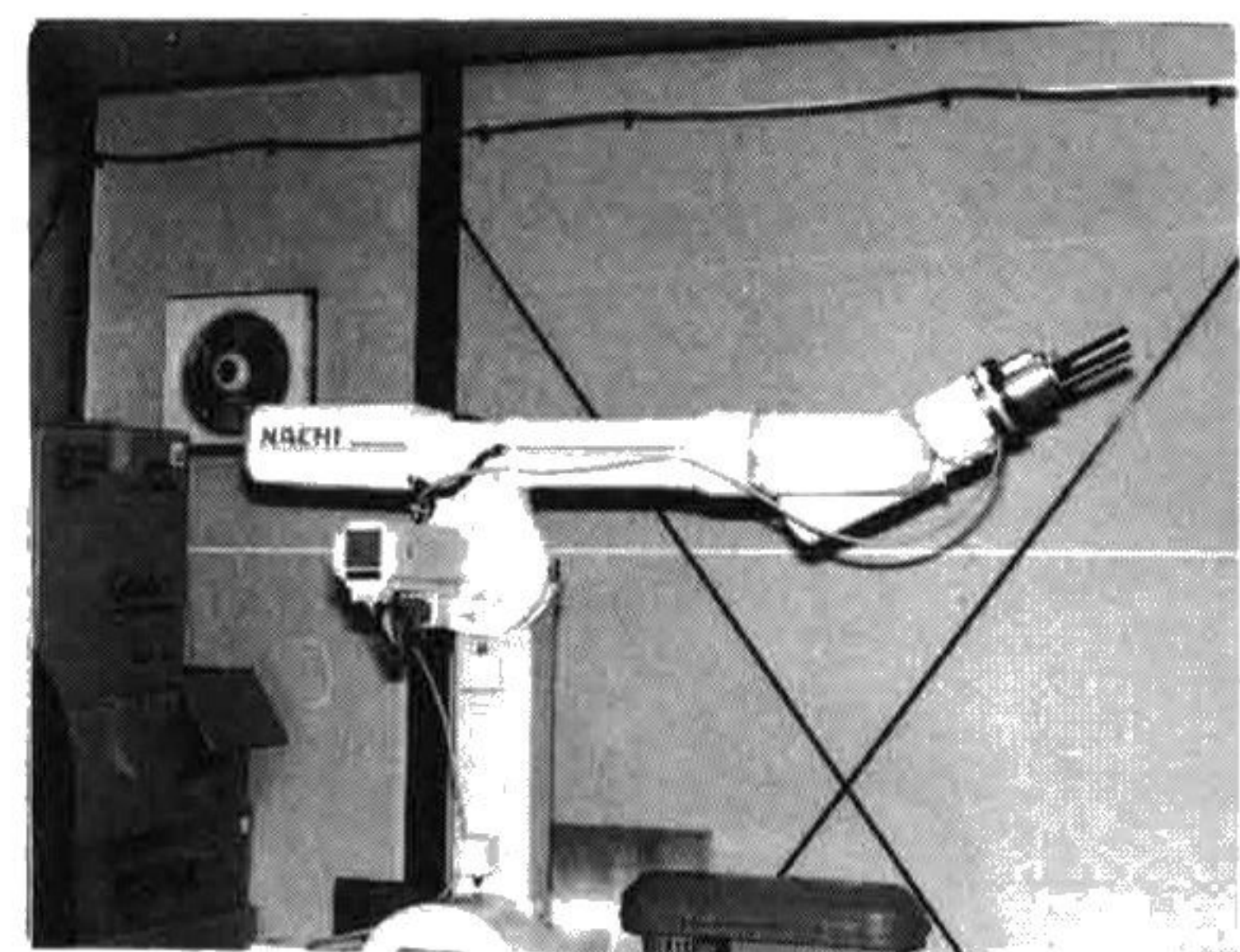
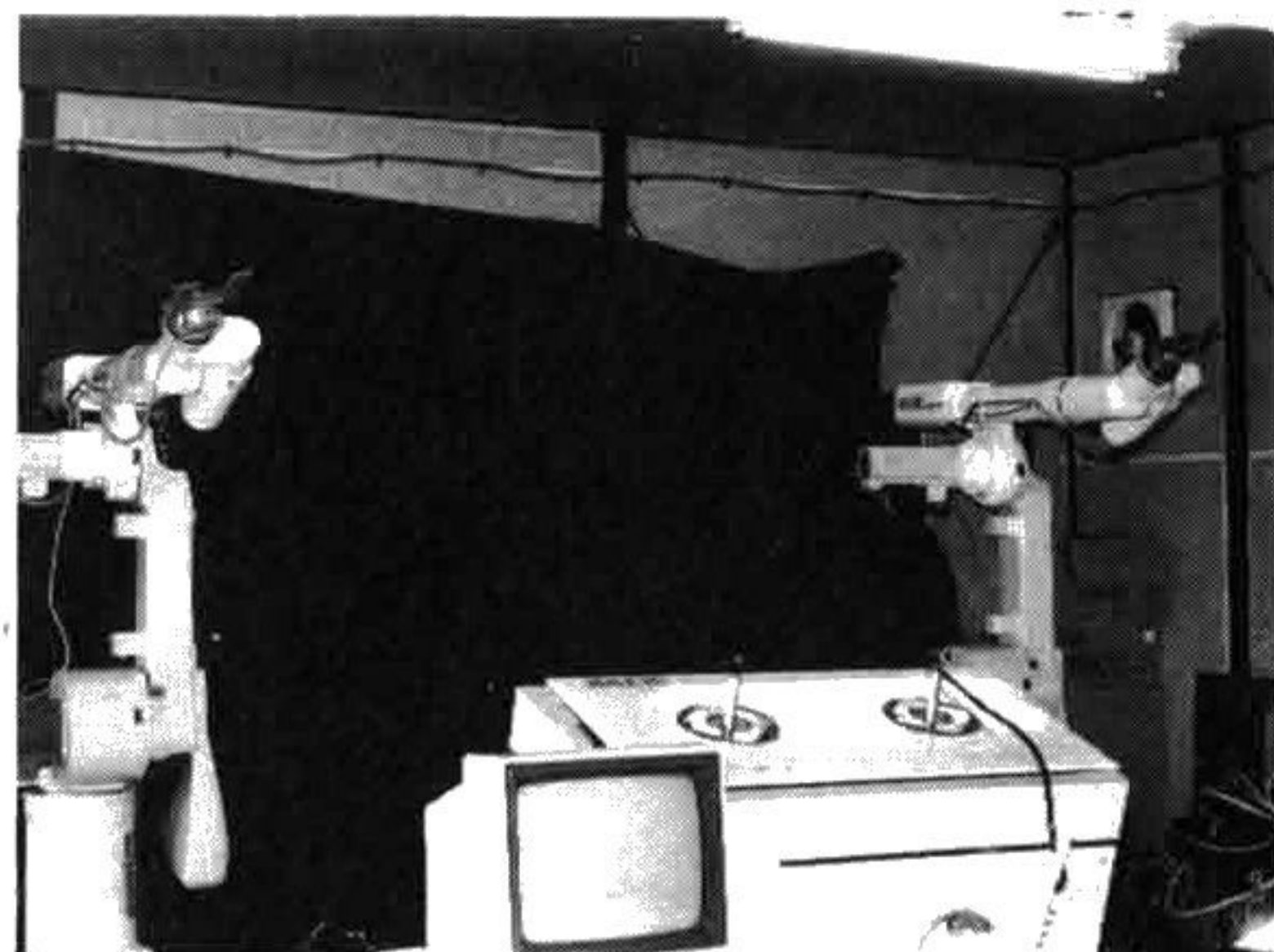


写真2 マスタ・スレイブ
マニピュレータシステム

先生は「制御」について次のようなことをおっしゃっていました。

「コントロールは最初の動的なエンジニアリングであり、20世紀の最重要なファクターとなりつつある。そして、これからはキーのテクノロジーとなるであろう。」

この言葉は、非常に強く印象に残りました。

最後になりましたが、お忙しい中、この取材に協力してくださった古田勝久先生、そして研究室の森本さんに感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございました。今後の古田研究室の一層のご発展とご活躍を祈りつつ筆をおきたいと思います。

(小野)