

教育用低価格高安全ロボットシステムの開発

藤 岡 与 周*

Development of a Low-Cost and Highly-Safe Robot System for Educational Use

Yoshichika FUJIOKA

Abstract

For effective education of the application of micro computer systems, a manipulator control system is one of the most useful tool. In this paper, the development method of a low-cost and highly-safe manipulator control system is presented. Based on the high cost-performance, high safeness and simpleness of the toy type robot arm, a master-slave manipulator system for educational use is developed. Because the cost of the developed robot control system is about a hundred times as low as the industrial robot control system, every student can experiment on the software, hardware and robotics using the robot control system in parallel.

キーワード：ロボットシステム (robot system), マスタスレーブマニピュレータ (master-slave manipulator), マイクロコンピュータ (micro computer), 遅れ時間 (delay time), バックラッシュ (backrush)

1. ま え が き

マイクロコンピュータを用いたシステム構築手法の教育に有用な教材の一つとして、ロボットシステムが挙げられる。ロボットシステムは単にコンピュータハードウェアやソフトウェアの基礎的技術のみならず、制御理論やリアルタイム処理および並列処理などの高度な概念まで幅広い教材として利用可能である。

また、ハードウェアの試作やシステム全体のプログラミングなどの実験を通じて各学生がイメージを具体的なものにすることにより、基礎的および高度な概念の効率的な理解を容易なものにできると考えられる。特に、限られたスタッフと実験スケジュールの中で効率よく各学生が実験を行うためには、二人で1台など学生数に相応の個数の教材を用意し、各段階のテーマ毎に全員が同時に実験を行うことが望ましい。

しかし、高価な教材を多数用意することは困難であるため、低価格でありかつ教育効果の高い教材の開発が重要となる。そこで本研究では、玩具用マニピュレータの有する低価格性、安全性、単純性に着目し、学生実験用教材として多数利用するための低価格で安全性の高いロボットシステムを開発している。

まず、玩具として市販されている低価格な4自由度マニピュレータ [1] の各関節と指に位置検出用のポテンシオメータを取り付けるとともに、マニピュレータ関節動作指令値生成用としてマニピュレータと同じ関節機構の操作レバーを試作している。

また、マニピュレータと操作レバーの各関節からアナログ電圧として得られる関節位置情報をマイクロコンピュータに入力するために、学生実験用マイクロコンピュータ [2] への A/D 変換拡張ボード [3] を試作している。

さらに、学生実験用マイクロコンピュータからの動作指令によりマニピュレータを動作させるためのインタフェースとして、シリアル・パラレルインタフェースとタイマ・カウンタ LSI を搭載した拡張ボード [4]-[5] を試作している。今回利用した玩具用4自由度マニピュレータには、パーソナルコンピュータによる制御用インタフェースボード [6] がオプションとして利用可能である。この制御用インタフェースボードはパーソナルコンピュータとシリアルインタフェースで接続されるため、学生実験用マイクロコンピュータにシリアルインタフェースを用意することにより、学生実験用マイクロコンピュータからのロボット制御を可能としている。

また、関節と指を加えた5つのモータの動作状態をモニタするため、20文字×4行の液晶モニタ [7] を備えている。

以上の構成により、図1に示すように、操作レバーの動きに追従して動作する4自由度マスタスレーブマニピュレータシステムを構築している。各関節がオン・オフ制御しかできず、またオフ時のブレーキが不可能な回路構成であり、さらに制御特性悪化の原因である遅れ時間が大きいなどの理由により、制御特性はよくないものの、各部の構成が単純であり各技術要素の理解が容易であるという特長を有する。また、各モータの駆動回路を新たに試作してシステムに組み込むことなどにより、制御性能向上のための発展的な実験も可能である。さらに、

平成11年12月21日受理

* 八戸工業大学 システム情報工学科 講師



図1 ロボットシステムの構成

玩具用マニピュレータを利用しているため、メカニズムのレベルでトルクリミット機構が備えられており、ソフトウェアやハードウェアのバグなどでロボットシステムが暴走しても安全性が高い。このため、試行錯誤が繰り返される学生実験用教材として適している。加えて、玩具用マニピュレータが数千円程度と低価格であるため、学生数に応じて数十台の教材を準備することが容易である。

このように、玩具用マニピュレータの有する低価格性、安全性、単純性を活用して構成された教育用ロボットシステムは、数百万円程度と価格が高く、運動エネルギーが大きくて安全性の確保が難しく、かつ内部構造が複雑で公開されていない産業用ロボットを教材として利用する場合と比較すると、制御性能が劣り実用性は低いものの学生がマイクロコンピュータ応用システムの基本原理を効率よく理解できるという観点で有用であることを明らかにしている。

2. システム構成

2.1 マニピュレータ

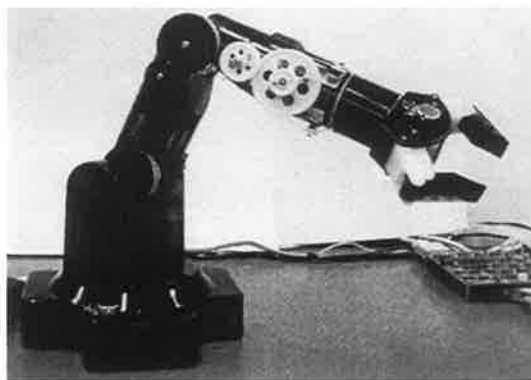
ロボットシステムにおいては、フィードバック制御を取り入れることにより、所望とする動作の実現が容易となる。このため、マニピュレータに関節変位検出用ポテンシオメータを取り付けている。

玩具用マニピュレータは工作精度がそれほど高くなく、ギヤボックス内部のギヤ段数が多くガタ（バックラッシュ）が大きいこと、動作原理の理解を主目的とするため精度は重要視されないことなどの理由により、マニピュレータの各関節と指の位置（変位）の検出には低価格である汎用16型可変抵抗器（Bタイプ）をポテン

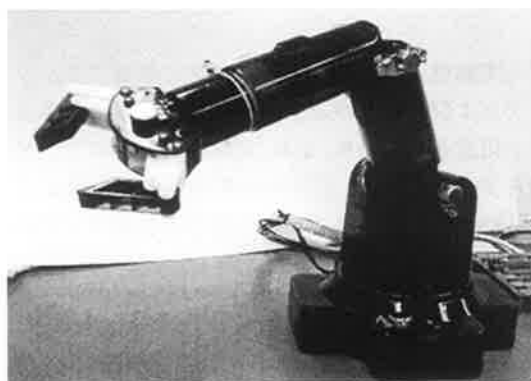
シオメータとして用いている。B型可変抵抗器は回転角度と抵抗変化がほぼ比例関係にあるが、数パーセント程度の誤差を有する。したがって、このポテンシオメータから得られた回転角度に比例した電圧を8ビットA/Dコンバータで変換することにより、マニピュレータ工作精度や可変抵抗器の精度に見合った精度のデジタルデータとして各関節と指の変位を得ることができる。

図2に、ポテンシオメータを取り付けたマニピュレータの構造を示す。今回利用したマニピュレータは、指の開閉に加えて、手首の左右回転、肘および肩の上下回転、台座の左右回転の4関節を有する。指については、平行リンク機構を利用して指の開閉をポテンシオメータの回転に変換し、変位値を得ている。また、肘と肩については、図2(b)に示すように関節回転軸を直接ポテンシオメータの回転軸に結合し、関節変位を得ている。

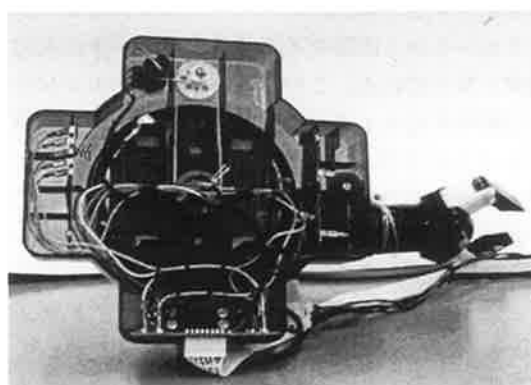
これに対し、手首と台座の部分についてはポテンシオメータの回転角度（約300度）に対して関節の回転角度がほぼ360度と大きいため、回転軸を直接ポテンシオメータに接続できない。また、回転軸内側に配線を通すという機構的制約により、関節回転軸とポテンシオメータとの結合にはギヤやベルトなどを用いる必要がある。そこで、手首関節については、図2(a)に示すように2段のベルトで関節回転軸とポテンシオメータを結合している。1段目のベルトを回転軸方向の変換に、また2段目は2:3の異径ベルト車による減速に用いることにより、ほぼ360度の関節回転角度をポテンシオメータの回転角度以内に対応させている。同様にして、台座関節についても図2(c)に示すように、2段のベルト結合によりほぼ360度の関節回転角度をポテンシオメータの回転角度以内に対応させている。本来このような関節には360度回転型のポテンシオメータを利用すべきであるが、低価格



(a) 右側面 (指・手首)



(b) 左側面 (肘・肩)



(c) 底面内部 (台座)

図2 ポテンシオメータを取り付けたマニピュレータの構造

なシステムを目指すこと、および小型のポテンシオメータでなければ取り付けが困難であることなどの理由により、ベルト伝達手法を採用している。このため、本来の関節バックラッシュに加えてベルト伝達部でのバックラッシュが誤差として累積するという短所を有する。

2.2 操作レバー

マニピュレータを動作させるには、所望とする動作を実現するための各関節の動作パターンを与える必要がある。しかし、同時に4つの関節と1つの指というように多くのモータを同時に動作させるためのパターン生成は

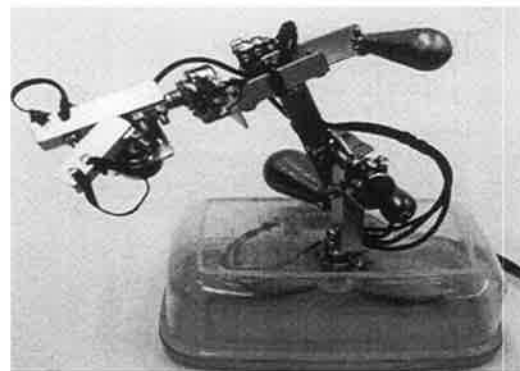


図3 操作レバーの構造

直感的でないため、それを想像し実際に生成することは比較的難しい。この種の問題は逆運動学問題と呼ばれており、数学的には三角関数を含む複雑な連立方程式を解く必要がある。そこで、専門的な知識を必要とせず直感的にマニピュレータを動作させる手法として、マニピュレータと等価な構造を有する制御レバーを準備し、制御レバーの動作と同じようにマニピュレータを動作させるマスタスレーブマニピュレータ構成を採用している。

図3に、試作した操作レバーの構造を示す。低価格で簡易的な構造とするため、汎用16型可変抵抗器をポテンシオメータとして利用している。また、操作レバーの各関節軸には可変抵抗器の回転軸をそのまま利用する形態としており、さらに可変抵抗器の回転軸に加工されている1mm幅のスリットにアルミアングルを差し込むことにより、操作レバーの各リンク構造を簡易的に実現している。さらに、各関節には制動トルクがほとんど働かないため、リンク機構だけでは操作レバーが自重で倒れてしまい、操作レバーから手を離すとマニピュレータもまた倒れてしまうという問題がある。そこで、操作レバーの各リンクにカウンターウエイトを配置し、自重による各関節の回転を防止している。

マニピュレータの各関節のポテンシオメータと操作レバーの各関節のポテンシオメータでは、対応する関節から得られるアナログ電圧範囲は機構の違いにより一致しない。そこで、それぞれのポテンシオメータから得られる電圧範囲をあらかじめ測定しておき、ソフトウェアにより各関節の回転角度を正規化することにより、制御時の関節変位入力データとして用いている。

2.3 A/D変換ボード

マニピュレータおよび操作レバーの各関節ポテンシオメータから得られる関節角度に応じたアナログ電圧を実験用マイクロコンピュータにデジタル入力するため、図4に示すA/D変換ボードを試作している。マニピュレータと操作レバーからそれぞれ4関節と指の合計5つのアナログ電圧が出力されるため、8チャンネルマルチプレク

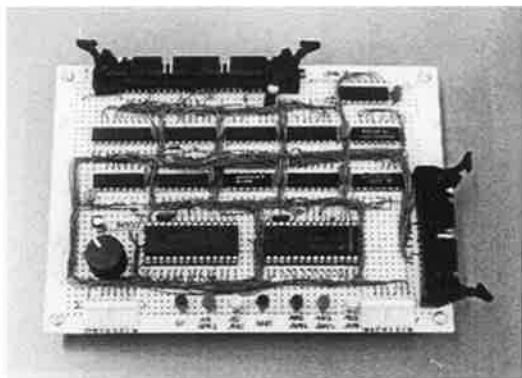


図4 A/D変換ボード

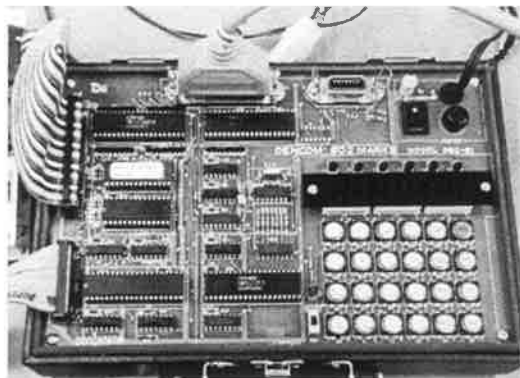


図5 実験用マイクロコンピュータ

サ入力を有する A/D 変換 LSI を 2 つ備える構成としている。また、各 A/D 変換 LSI の 5 チャンネル分をマニピュレータと操作レバーのそれぞれ 5 つのアナログ信号入力用として利用している。

原理的には、すべての関節から出力される関節変位信号を同時にサンプリングし、かつすべての関節モータに同時に制御信号を出力しなければ、時間的なずれによりマニピュレータの各関節の協調動作が困難になる。このため本来であればすべてのポテンショメータ出力に個別に A/D 変換 LSI を接続し、同時にサンプリングするためのハードウェアを備えることが望ましい。しかし、今回利用したマニピュレータの応答時間が少なくとも数 10～数 100 msec 程度であるのに比べて、A/D コンバータの 1 チャンネルあたりの変換時間が 0.1 msec と十分に短く、マニピュレータと操作レバーの各 5 チャンネル分を逐次変換しても全体で 1 msec 程度であることから、ハードウェア構成が簡単となる 8 チャンネル入力 A/D 変換 LSI を利用している。

また、A/D 変換ボードのハードウェアおよびソフトウェア面でのデバックを容易とするため、A/D 変換ボード上にテスト用として汎用 16 型可変抵抗器を備え、抵抗分割によるアナログ電圧出力を A/D 変換 LSI の空チャンネルに接続している。また、残りの 5 チャンネル分は外部アナログ電圧入力用端子に接続している。このため、A/D 変換ボード単体でのデバックのみならず、A/D 変換ボードと他の装置を用いた種々のプログラミング演習も可能としている。

2.4 実験用マイクロコンピュータ

学生実験教材用マイクロコンピュータとして、その拡張コネクタに種々の実験用ボードを接続でき、ソフトウェアとハードウェアの理解を助けることを主目的とした図 5 に示すマイクロコンピュータを利用している。実験用マイクロコンピュータの左手前部分には 30 ピンヘッダコネクタが備えられており、パラレル入出力インタフェース LSI 8255 の入出力端子に接続されている。

種々の実験用ボードはこのコネクタに接続され、ソフトウェアおよびハードウェアの種々の実験ができるように教材が用意されている。また、実験用マイクロコンピュータの左奥部分には 50 ピンヘッダコネクタが備えられており、Z80CPU のすべてのバス信号を拡張ボードに接続できるようになっている。

今回試作した A/D 変換ボードはこのコネクタに接続するように設計されている。

ソフトウェア開発用として、パーソナルコンピュータ上で作成したマイクロコンピュータ機械語をインテルヘキサフォーマット形式にてパーソナルコンピュータのプリンタポートから直接マイクロコンピュータに入力できる構成となっている。このため、パーソナルコンピュータ上で動作するマイクロコンピュータ用クロスアセンブラと C コンパイラを用意するとともに、Windows マシンのプリンタ出力デバイスドライバをバイパスしてパラレルポート（プリンタポート）に直接インテルヘキサフォーマットデータを出力できるソフトウェアを用意することにより、実験用コンピュータのソフトウェアを Windows マシン上で C 言語やアセンブラを用いてクロス開発できる環境を実現している。また、今回利用した C コンパイラはアセンブル命令を C 言語のソースコードに埋め込むことが可能であるため、アセンブリ言語と C 言語の混在したソフトウェア作成が容易であるという特長を有する。

2.5 LCD ディスプレイ

実験用マイクロコンピュータのソフトウェアを開発する場合、特に C 言語によりソフトウェアを作成する場合には、システムの動作状態や種々のメッセージを表示するデバイスが便利である。産業用などのマイクロコンピュータボードでは通常シリアルインタフェースを備えており、パーソナルコンピュータ上にシリアルインタフェースを介して種々の情報を表示可能な場合が多い。しかし、今回利用した実験用マイクロコンピュータにはシリアルインタフェースが備えられていないため、簡単

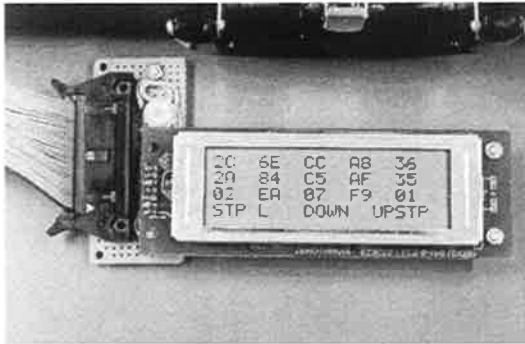


図6 20文字×4行LCDディスプレイ

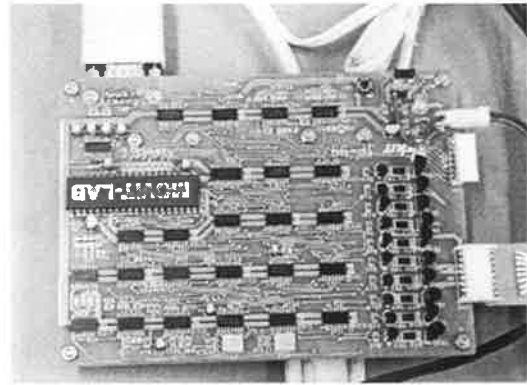


図7 モータ制御ボード

に種々のメッセージを表示できるデバイスとして図6に示すようなLCDモジュールを接続している。このLCDモジュールは複雑な初期設定などが必要であるが、動作タイミングが厳しい部分についてはアセンブリ言語で、またそうでない部分はC言語で階層的にソフトウェアを作成することにより、種々の表示機能を有する関数を容易に作成可能である。この特長を利用することにより、LCDモジュールのみを用いても種々の実験テーマを作成することが可能である。

2.6 モータ制御ボード

マニピュレータを動作させるためにはマニピュレータの各関節と指のモータを駆動する回路が必要となる。今回利用したマニピュレータについては、パーソナルコンピュータから動作指令を受け取りマニピュレータの各モータを動作させるための図7に示すような制御ボードが制御ソフトとともに市販品として入手可能である。この制御ソフトは関節センサのない状態のマニピュレータ制御用であるため、各モータの動作時間を0.2 sec単位でプログラムする手法をとるフィードフォワード制御ソフトウェア開発用である。また、モータ制御ボードとパーソナルコンピュータとはシリアルインタフェースで接続されており、制御ソフトを動作させると0.2 sec毎にパーソナルコンピュータからモータ制御ボードに動作命令が送られる。このため、実験用マイクロコンピュータからモータ制御ボードにマニピュレータの各モータ動作指令を与えるためには、実験用マイクロコンピュータにシリアルインタフェース拡張ボードを備える必要がある。

2.7 インタフェース拡張ボード

モータ制御ボードに実験用マイクロコンピュータボードからのモータ動作指令を与えるためのシリアルインタフェースを備えるため、図8に示すようなインタフェース拡張ボードを試作している。また、本インタフェースボードには、ロボットシステムに種々のセンサなどを新たに接続可能とし拡張性を持たせるためにパラレルインタフェースを備えている。さらに、マニピュレータ制御

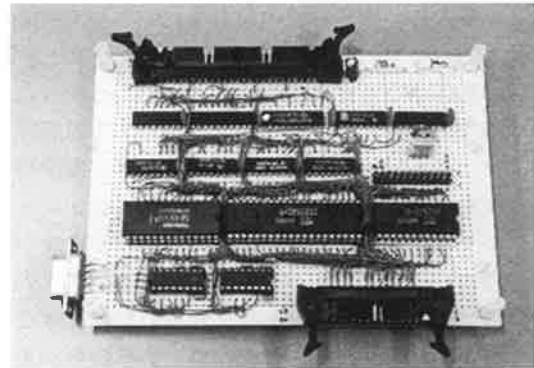


図8 インタフェース拡張ボード

を一定サンプリング時間間隔で実現するためのカウンタ・タイマLSIをも備えている。このインタフェース拡張ボードを実験用マイクロコンピュータに接続することにより、マイクロコンピュータ応用システムの構築に必要なほとんどの基本機能を実現可能である。このため、インタフェース拡張ボードのみを用いても、シリアルインタフェースLSIおよびパラレルインタフェースLSIのプログラミング演習やタイマLSIを用いたリアルタイム並列処理などの実験テーマを作成可能である。

インタフェース拡張ボードはA/D変換ボードと同様に実験用マイクロコンピュータのZ80拡張バスに接続するように設計されている。このため、図9に示すようにA/D変換ボードとインタフェース拡張ボードを2枚重ねて50芯フラットケーブルで接続することにより、実験用マイクロコンピュータとバス接続している。

モータ制御ボードへのモータ動作指令コマンドについては、パーソナルコンピュータからモータ制御ボードへ出力されるコマンドを解析することにより、マイクロコンピュータからの動作指令を可能としている。しかし、モータ制御ボードの中心部がカスタムチップで構成されているため、必ずしもすべてのコマンドについて解析されてはならず、予想外の動作をする可能性がある。また、モータ制御ボードの仕様がパーソナルコンピュータから0.2 sec毎に送られる制御コマンドを処理するように

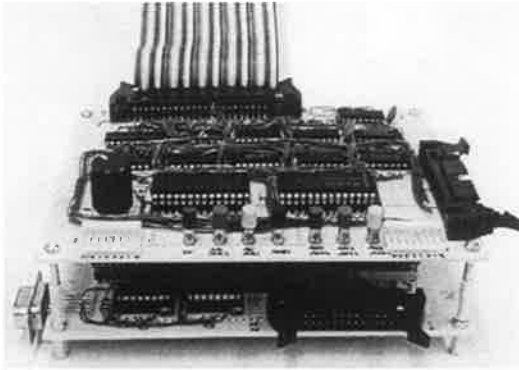


図9 A/D変換ボードとインターフェース拡張ボードの接続

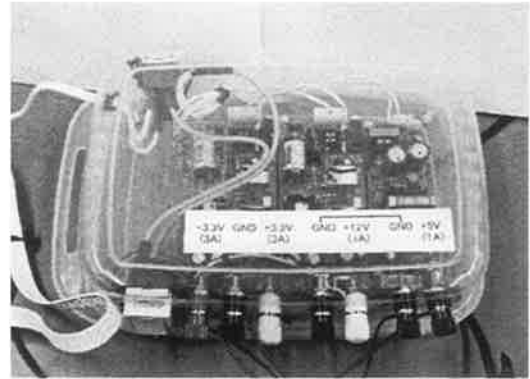


図10 電源装置

なっているため、制御特性の向上を目的としてサンプリング周期を0.2 sec以下にしようとするとうモータ制御ボードの動作が不安定になることが明らかとなった。このため最悪の場合マニピュレータが暴走する可能性があるが、マニピュレータに備えられたモータが模型用の小型モータを利用していること、およびマニピュレータ本体にトルクリミッタなどが備えられており安全性が高いこと理由により、ハイパワーなロボットシステムを用いた実験において暴走時に十分に注意しなければならないような大きな事故は起こりにくいという特長がある。

2.8 電源装置

実験用マイクロコンピュータおよびその拡張ボードについては、あらかじめ電源装置が備えられている。これに対し、マニピュレータやモータ制御ボードについては乾電池により動作する仕様となっている。しかし、乾電池によりマニピュレータ各関節のモータを動作させる場合には、乾電池の消耗の度合いにより動作の再現性が著しく損なわれるため、マニピュレータ動作の再現性向上を目的として図10に示すような電源装置を試作している。

電源装置の構成は、マニピュレータモータ用電源として±3.3 V 3 Aのスイッチング電源と、モータ制御ボード用電源として+5 V 1 Aのスイッチング電源を備えている。また、オプションとして+12 V 1 Aのスイッチング電源も内蔵されている。マニピュレータの各関節に備えられているモータは模型用であるため、乾電池動作を目的として、ワット数が少ないながら3 V程度の電圧源とモータ1個あたり0.5 A~1 A程度の電流源を必要とする。このためモータの個数が増えると低電圧大電流電源が必要となる。今回のマニピュレータでは合計電流が平均で2.5 A程度になるため電源装置の試作が容易であったが、モータの寿命や制御性を考慮すると、同じワット数のモータであれば電流が少なく電圧が6 Vや12 V程度の制御用モータが備えられていることが望ましい。

2.9 マスタスレーブマニピュレータシステム

図1に示すように、マニピュレータおよび操作レバーからの関節変位アナログ電圧をA/D変換ボードにより実験用マイクロコンピュータに入力可能とするとともに、インターフェース拡張ボードからシリアルインターフェースによりモータ制御ボードとマイクロコンピュータを接続することにより、実験用マイクロコンピュータからマニピュレータの各関節や指のモータを動作させることを可能としている。ここで、操作レバーとマニピュレータのそれぞれ対応する関節や指について、操作レバーからの入力値をマイクロコンピュータ上のソフトウェアで線形変換することにより、操作レバー関節変位入力とマニピュレータ関節変位入力とがそれぞれ同じ範囲の値をとるように正規化されている。また、モータ制御ボードが各モータの回転方向とモータのオン・オフしか制御できないことから、各関節や指の制御は次に示す制御アルゴリズムにより実現されている。

```
diff := poslever - posarm
if (diff > backrush) then
    dirup and moteron
else if (diff < -backrush) then
    dirdown and motoron
else
    motoroff
```

ここで、上式の各変数や式は、指、手首、肘、肩および台座の5つのモータについてそれぞれ成り立つ。すなわち、各関節が独立に動作する制御方式であるため、マニピュレータの滑らかな動作を実現するための各関節間の協調動作は考慮されていない。

また、*diff* は目標値としての操作レバー関節変位正規化入力 *pos_{lever}* と現在値としてのマニピュレータ関節変位正規化入力 *pos_{arm}* との差、すなわち誤差を表している。さらに、*backrash* は各関節や指の機構的なバックラッシュを考慮に入れた不感帯幅を表している。

$backrush$ の値が大きいくほど、制御誤差が大きいくても $|diff| \leq backrush$ を満たす不感帯の範囲内であれば、各関節が目標とする位置の範囲内に到達したことになるため、マニピュレータの制御誤差をできるだけ減少し精度を向上させるためにはこの数値は0であることが望ましい。しかし、今回利用したマニピュレータシステムでは機構的なバックラッシュが大きい事に加えて、モータ制御ボードの仕様から起因する関節変位入力からモータ制御出力までの遅れ時間すなわち無駄時間が大きいことや、各関節や指のモータのオン・オフしか制御できないためモータの停止コマンドを与えてもモータやギヤおよび各リンクの慣性による行き過ぎ量が大きいなどの原因により、 $backrush$ の値を小さくすると目標値を行きすぎたりは戻り、また戻りすぎでは行過ぎるというリミットサイクルを繰り返してしまう。このため、 $backrush$ の値を大きくすることにより、制御精度を犠牲にして動作の安定化を図っている。さらに、 $motor_{on}$ と $motor_{off}$ はそれぞれ各関節モータのオンとオフの動作命令を表しており、 dir_{up} と dir_{down} はそれぞれ各関節モータの回転方向を決定する命令を表している。ここで dir_{up} は pos_{arm} を増大させる方向であり、 dir_{down} は pos_{arm} を減少させる方向とする。また、指における回転方向は dir_{up} と dir_{down} の代わりに dir_{open} と dir_{close} が用いられるとともに、手首と台座においては dir_{cw} と dir_{ccw} が用いられる。

以上のシステム構成と制御アルゴリズムにより、教育用マスタスレーブマニピュレータシステムを構築できる。

3. 動作実験

構築したマスタスレーブマニピュレータシステムを用いて図 11 に示すように動作実験を行った結果、制御特性はあまりよくないもののマスタスレーブマニピュレータの基本的動作実験を行うことができた。また、本システムでは図 6 の LCD 表示モジュールに示すように指と 4 つの関節における操作レバー目標値、マニピュレータ関節位置、制御誤差、関節動作モード（正逆回転および停止）をリアルタイムで表示させることにより、マスタスレーブマニピュレータ動作実験での異常時における原因究明を容易に行うことができた。

動作実験の結果、モータ制御ボードに 0.2 sec より短い周期で各モータの動作指令を与えると、しばらく正常に動作した後突然にモータ制御ボードがハングアップする場合があります。モータ停止命令を送っても停止せずマニピュレータが暴走するという現象が確認された。今回利用したマニピュレータは本来玩具用として市販されている安全性の高いものであるため、このように何らかの問題でマニピュレータが暴走しても特に安全性の面で問題のないことが確認できた。

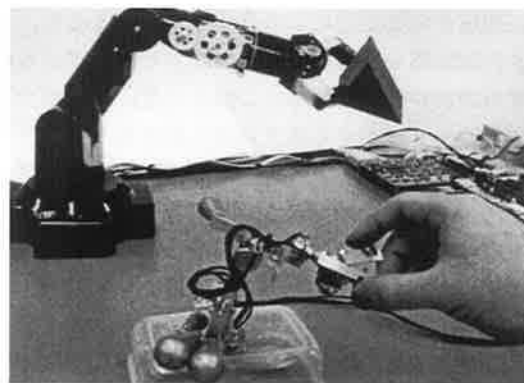


図 11 動作実験の様子

また、マスタスレーブマニピュレータによりスポンジ製の積み木を組み立てる実験を行ったところ、特に指の部分について物をつかんだ感触を操作レバーで得ることができないため、必要以上に強くつかみすぎたり、あるいはつかむ強さが弱すぎて途中で積み木を落としたりすることが確認された。これは、指や関節の位置情報だけを用いてセンサフィードバック制御を行うことの原理的問題であり、改善点としてマニピュレータの指先にセンサを取り付けるなどの工夫が必要である。しかし、機構的にトルクリミッタが備えられているために強くつかみすぎてもモータが焼損したり対象物が壊れるなどの問題が起こらず、安全に実験を行えることが確認できた。

さらに、サンプリング時間をあまり短くすることができないため、マニピュレータの動作としては目標値を行過ぎてから戻るまでの応答時間が長く、それが制御精度をさらに悪化させていることが確認された。制御精度悪化の原因としてはほかにもモータから関節軸までのバックラッシュが挙げられる。実際、指や肘および肩の部分についてはマニピュレータの関節軸が直接ポテンシオメータの回転軸に結合されているのに対して、手首や台座の部分は 2 段のベルトを介して関節軸とポテンシオメータ回転軸が結合されている。このため、関節軸が動いてからポテンシオメータ回転軸が動くまでにベルトの緩みによりバックラッシュが発生し、これにより肘や肩よりもさらに制御精度が悪化していることが確認できた。しかし、肘や肩などについても制御特性があまりよくないことと、マニピュレータの動作を観察した知見によると、制御精度を悪化させる主要因は、モータ制御ボードの制約による制御のサンプリング間隔すなわち無駄時間が大きいことと、モータのオンとオフしか制御できず、かつモータをオフにしても急停止できず目標位置からの行き過ぎ量が多いことの 2 つの要因であることが強く予想される。そこで、この 2 つの要因を解決する方法として、現在利用しているモータ制御ボードの代わりに、PWM 制御方式のモータ制御回路を新たに指と 4 関節の合計 5 モータ分用意し、モータ回転速度すなわち各関節

の回転速度を制御誤差により変化させるとともに、このモータ制御回路を実験用マイクロコンピュータから直接制御する方法が挙げられる。これにより、実験用マイクロコンピュータが有する最大演算性能によりサンプリング時間を大幅に減少できるのみならず、PWM制御によるモータ供給電力を制御することにより、単にモータの回転方向とオン・オフを制御するのみならず、モータ回転速度すなわち指や各関節の変位速度をも制御可能となる。つまり、比例制御(P制御)やPID制御など種々の古典的な制御手法を容易にマニピュレータに適用できるのみならず、実験用マイクロコンピュータの計算能力が十分であれば、モデルベース制御などの現代制御理論をも本ロボットシステムに適用して実験可能と考えられる。

マニピュレータの応答性能が悪いという点とマニピュレータの制御誤差が大きいという2つの悪条件の下で積み木の組み立ての実験を行った結果、これらの悪条件は、つかんだ積み木を少しずつ動かしながら重ねていくという作業を著しく困難にすることが確認できた。つまり、バックラッシュ対策として不感帯を設定しているため、マニピュレータを少しだけ動かそうとするとかなり操作レバーを動かさなければならない。この状態で不感帯を抜ける程度の目標値を与えると、今度はその不感帯程度の幅の制御誤差を打ち消そうとして各関節が動作するために、目標としていたほんの少しの動作よりかなり大きな動作指令が各関節に与えられ、目標とする位置を行過ぎたり戻りすぎたりという動作を繰り返す。積み木を組み立てるために複数の積み木が互いに近接している状況でこのような動作を繰り返すため、周囲の積み木にマニピュレータがぶつかるなどして別の積み木の位置や姿勢をずらしてしまい、最悪の場合マニピュレータの届かないところまで積み木を追い出してしまうことがある。このように、今回構築したマスタスレーブマニピュレータシステムは、実用的に簡単な組み立てを行うことは非常に困難であるという短所を有する一方、マニピュレータによる精密な作業における本質的な問題を明らかな形で体験できるという観点からすると、教育用ロボットシステムとして有用であるという特長を有する。

マニピュレータ軌道制御という観点から本システムについて考察すると、操作レバーからは目標とするマニピュレータ手先動作軌道を容易に生成可能である。これに対し、マニピュレータの各関節は各モータがオン・オフ制御しかできないため、目標手先軌道を実現するために本来必要となる各関節速度を協調して変化させ制御することが不可能である。この結果、各関節がそれぞれの動作速度で独立に動作するため、マニピュレータの指先を最終的に目標位置付近まで移動するPTP制御は実現できるが、そこに到達するまでの目標手先軌道に追従して動作させるCP制御の実現が不可能であり、マニピュ

レータの指先がどこを經由して最終位置付近に到達するかは予想が困難な状況である。つまり、何かの表面をなぞる、あるいは紙に文字を書くなどの制御はほとんど不可能である。この問題を解決する手法として、各関節モータのPWM制御法の導入による各関節の速度制御の実現が挙げられる。ただし、各関節のモータ出力があまり大きくないため、PTP制御においても操作レバーを早く動作させるとそれに追いつかないという現象が確認された。このため、本システムを用いてCP制御を実現するためには、操作レバーの操作をきわめてゆっくりと行う必要があると考えられる。それでも、原理的な実験をできる可能性があるため、本ロボットシステムはロボット制御の基本についてわかりやすい実験ができるという特長がある。

マニピュレータ自由度と制御性能という観点から考察すると、本マニピュレータは4関節と1つの指を有する4自由度マニピュレータである。3次元空間において所望とする位置と姿勢を実現するためには、位置について縦・横・高さ方向の3自由度と、姿勢についてロール・ピッチ・ヨー角または3種類のオイラー角で表現される3自由度の計6自由度が必要となる。従って、4自由度しか備えていない本マニピュレータでは、位置の決定に3自由度を用いると姿勢については1つの自由度しかなく姿勢を任意に決定できないという問題がある。このため、積み木の組み立て実験を行う際には、単に重ねるといった動作ができる程度であり、きちんとそろえて重ねるといった動作を実現するためには積み木の配置に何らかの制約を与えるなどの工夫が必要となる。つまり、自由に組み立て実験を行うことが本質的に不可能であるため、必要であれば不足分の2自由度を補う機構を追加する必要がある。その方法の一つとして、例えば x 方向と y 方向に動作可能な2次元 x - y テーブルを別に用意して、マニピュレータかあるいは作業空間をその上に載せることが考えられる。ほかにも、マニピュレータを改造して関節数を増やすなどが考えられるが、市販のマニピュレータは改造を前提とした設計とはなっていないため、改造には困難が予想される。また、2次元 x - y テーブルの代わりにテーブルの回転も可能な x - y - θ テーブルを用いれば、システム全体の自由度がマニピュレータの4自由度とテーブルの3自由度の合計7自由度となるため、1つの冗長自由度を有するシステムを容易に実現可能である。冗長システムを用いた実験では、マニピュレータ手先の位置と姿勢を決定した場合、冗長自由度を利用して手先の位置と姿勢を変化させることなくマニピュレータの姿勢を変化させることができる。これにより、人間の腕は基本的に7自由度を有し、手の位置と姿勢を固定しても肘を回転できるのと同様に、冗長マニピュレータについても障害物回避やマニピュレータ動作エネルギー最小化などの目的によりマニピュレータの姿勢を変化させ

るような実験が可能になると考えられる。

4. む す び

玩具用として市販されている低価格なマニピュレータの安全性や単純性に着目してこれにフィードバック制御用のモジュールを試作し追加した教育用ロボットシステムを開発した。この結果、実験用マイクロコンピュータと接続して簡単なフィードバック制御に基づくマスタスレーブマニピュレータシステムを実現することができた。本システムは関節部分のバックラッシュが大きくまたモータ出力も小さいため実用性は低いものの、マイクロコンピュータ応用システムの具体的理解や、ロボット工学の基本原理の理解を行う上では単純で理解しやすくかつ安全性が高いため、教育用ロボットシステムとして有用であることが確認できた。また、本ロボットシステムを構成する各モジュールそれぞれを用いても種々の実験テーマによる教育が容易である。

さらに高度なロボット制御の基本的実験を行う場合には、実験用マイクロコンピュータを用いているため演算性能やメモリ容量などの点で不十分な場合が出てくると

考えられる。この場合には、実験用マイクロコンピュータをほかのマイクロコンピュータやデジタル信号処理プロセッサ、あるいは汎用部品などを用いて試作した汎用プロセッサなどに置き換えて実験することができる。特に、システム全体が単純な構成であるためこのようなシステム構成の変更が容易であるという特長を有しており、学生実験などの教育用として広く利用可能である。

参 考 文 献

- 1) “MOVIT Robot Arm MR-999 組立説明書”, イーケイジャパン (1998).
- 2) “DENCOM 80Z 取扱説明書 第2版”, デンジニア (1997).
- 3) 神崎: “作りながら学ぶマイコン設計トレーニング”, CQ出版社, pp. 210-214 (1983).
- 4) 横山: “パソコン・インターフェースの製作実習”, 技術評論社, pp. 93-95 (1986).
- 5) 神崎: “シリアル・インターフェース”, トランジスタ技術 Special, No. 6, 第6章, CQ出版社, pp. 84-96 (1987).
- 6) “MOVIT-LAB IF-99 取扱説明書”, イーケイジャパン (1998).
- 7) 長嶋: “Java & AKI-80”, CQ出版社, pp. 84-99 (1997).