

# 大形汎用ロボットのマスターアームによる 制御について

松尾博文\*・黒川不二雄\*  
太田勝彦\*\*・今村賢\*  
浅野陸喜\*

## Large Industrial Robot System With Master Slave Control

by

Hirofumi MATSUO\*, Fujio KUROKAWA\*, Katsuhiko OHTA\*\*,  
Ken IMAMURA\*, and Mutsuyoshi ASANO\*

This paper present the new grinding robot system with master slave control in order to use the industrial robot system effectively, in which conventionally the point-to-point teaching playback control is applied. The configuration of the proposed robot system is discussed and the trajectory tracking performance characteristics are examined. As a result, it is clarified that the industrial robot system with master slave control can be made useful by adding the interface unit as an intelligent terminal, which connects the industrial robot with master arm.

### 1. まえがき

近年、産業用のロボットの普及は目覚ましく、機械組立、塗装、溶接等の作業に広く用いられている。これらの作業は量産品を作るための繰り返し作業であるため、予めロボットの動作の軌跡を点としてコントロールボックスを用いてメモリに記憶し、その後、繰り返し再生する PTP (Point-to-Point) 教示・再生方式が一般的に用いられている<sup>(1), (2)</sup>。この方法は量産品を作るための繰り返し作業に対しては、頻繁に教示を行わずに済むため一応使用できる。しかし、コントロールボックス<sup>(2)</sup>はキーあるいはジョイスティックによりロボットの操縦やリモート教示を行うため、操作性に難点があり、教示に長い時間を必要とす

る<sup>(2), (3)</sup>。したがって、毎回作業内容が異なる場合にはそのままでは適用が困難である。そこで、教示に要する時間を短縮するために、マスタスレーブ方式の適用が検討されている<sup>(3)</sup>。しかし、産業用ロボットは、通常、PTP 教示・再生方式で動作するため、マスタスレーブ方式で制御する場合のように、実時間で応答するようには作られていない。そのため、マスタスレーブ方式でロボットを動作させるためには新たに専用のロボットを設計・製作する必要があり、ロボットの導入が見送られることが多い<sup>(3)</sup>。

本論文では、産業用ロボットにマスタスレーブ方式を適用して、教示に要する時間を短縮することにより、単品作業の多い大形鑄造部品の研削ロボットシステ

平成4年 月 日受理

\*電気情報工学科 (Department of Electrical Engineering and Computer Science)

\*\*海洋生産科学研究科 (Marine Production Science and Engineering)

ム<sup>(4)</sup>を構築することを検討している。まず、本稿で提案するマスタスレーブ方式ロボットシステムの概要について述べ、次にマスターアームの動きに対するスレーブとしてのロボット本体の追従特性を示す。その結果、従来のロボットシステムにマスターアームのインタフェースの働きをするインテリゼントターミナルを新たに付加することにより、産業用ロボットに対してマスタスレーブ方式が適用可能なことを示した。また、その場合に生じる振動現象のメカニズムおよびその抑制方法を明らかにし、平滑制御動作<sup>(5)</sup>を施すことにより比較的良好な追従特性が得られることが分かった。

## 2. システム構成

Fig. 1はマスタスレーブ方式による研削ロボットシステムの構成図である。ここで、スレーブロボットアームとしては、研削を容易に行うために、6軸垂直多関節型で、可搬重量が100kgの大形の産業用ロボットを用いている。このロボットの腕の長さは2,200mmであり、広い動作範囲を持っているため、プロペラヤス

クリュー等の大型の加工物の研削作業にも容易に対応できる。このロボットの制御はロボット制御ユニットにより行われている。

ロボットの手首先端には研削グラインダおよびそのグラインダとロボットの緩衝装置としてダンピングアダプタ<sup>(6)</sup>が装着されている。このダンピングアダプタは、加工物の表面の変化に対して押付力一定で追従できる。このため、提案したシステムでは一定の深さを容易に研削することができる。またロボットは研削時にも位置制御を実行するだけで動作できる。研削制御ユニットでは、これらグラインダの駆動、姿勢制御およびダンピングアダプタの押圧制御を行っている。

通常、産業用ロボットにおいてはロボット制御ユニットに取り付けられたコントロールボックスにより、操縦、教示動作が行われている。しかし、Fig. 1のシステムでは操縦性能の向上および教示時間の短縮を計るために、マスターアームを付加している。このマスターアームの大きさは、操縦性を考慮してスレーブロボットアームの大きさの1/3の相似形である。また、各関節には角度検出用のインクリメント形エンコーダが

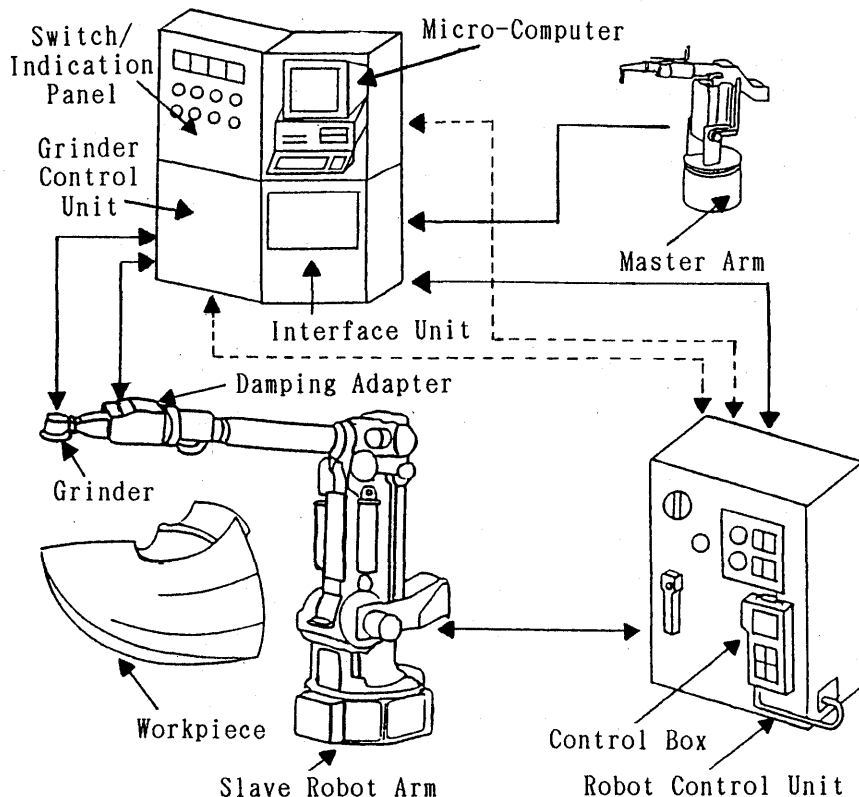


Fig. 1 System configuration.

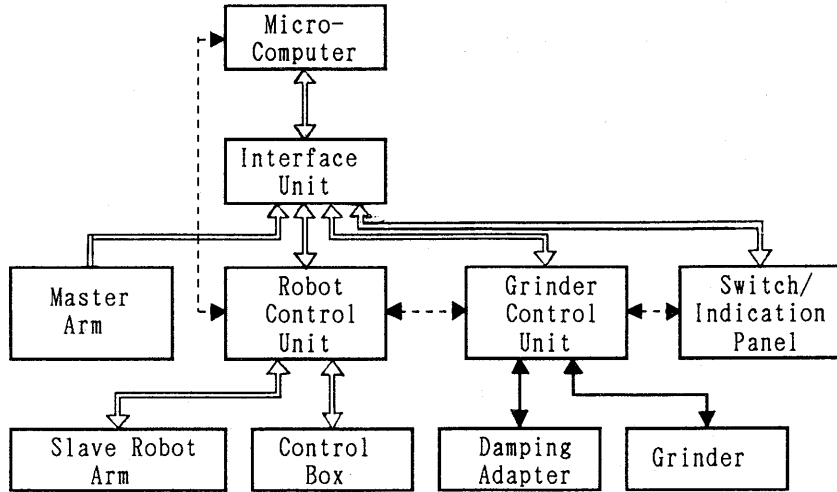


Fig. 2 System blockdiagram and Signal flow.

取り付けられている。

インタフェースユニットではこのマスタームのエンコーダからの直列データを DSP を用いて並列データに変換すると共に、絶対角度を求めている。これに要する演算時間は  $100\mu\text{sec}$  以下である。ロボット制御ユニットはこれらマスタームの 6 関節の角度のデータを一定周期で一度に入力し、PTP 制御を行う。通常、ロボット制御ユニットは実時間で外部からのデータを受信して、動作するには作られていない<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>。このため、一周期の動作として最大で 250 msec の時間がかかる。

また、システム全体の動作の制御は制御用のマイクロコンピュータが行っている。

Fig. 2 に Fig. 1 のマスタスレーブ方式研削ロボットシステムのブロック図と信号の流れを示す。このシステムは制御用マイクロコンピュータを中心に構成されており、制御用マイクロコンピュータからの信号はイ

ンタフェースユニットを介して他の端末に分岐して送られる。このインタフェースユニットには DSP が内蔵され、インテリゼントターミナルとして機能している。また、分岐先の端末からはさらに通信網が枝分かれしている。さらに、特定の端末間に破線で示す別の通信経路を設けてスター形複合網<sup>(7)</sup>を形成している。これによりシステムの信頼性、安全性の向上が計られている。

Fig. 3 は本システムを用いて位置制御を行った場合の制御動作モデルである。操作者がマスタームを操作することにより、マスタームの 6 個の関節に取り付けられたエンコーダの角度のデータがインタフェースユニットに送られる。このデータはインタフェースユニットで演算処理された後にロボット制御ユニットに送られ、スレーブロボットアームの 6 個の軸を動かすサーボモータを駆動させる。操作者はスレーブロボットアームとその先端に装着されたグラインダを目視

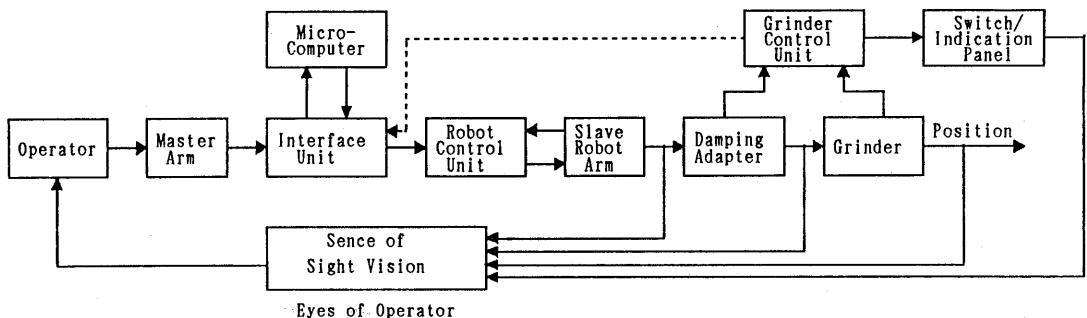


Fig. 3 Operation model.

しながらこのマスターアームの操作を行う。この場合、工作物上の曲面を滑らかに動作させるためには、常にダンピングアダプタの制御範囲でグラインダが動作する必要がある。

### 3. システム各部の動作

ここでは、Fig. 1 のシステムの各部についての詳細な説明を行う。

#### 3. 1 スレーブロボットアームおよびロボット制御ユニット

Fig. 4 はスレーブロボットアームとして用いる大形の汎用ロボットの外形である。駆動方式としては AC サーボモータ（1～3 軸：3.6kW, 4～6 軸：1.6 kW）を用いており、動作範囲は施回角度270度、前後

115度、上下140度であり、腕の長さは2.2mである。また、可搬重量は100kg、本体重量は1,850kgである。本システムではこのように、大形で動作範囲の広いロボットを用いており、大形鋳造部品の研削を容易に行うことができる。このロボットはロボット制御ユニットにより制御される。

Fig. 5 にロボット制御ユニットの構成図を示す。内部は大きく3つに分かれており、モーションコントローラ、I/O 制御ボードおよびサーボアンプにより構成される。この汎用ロボットでは、通常は外部との通信はI/O コントロールボードを介して行われる。しかし、ここでは、応答速度を早くするために、マスターアームの6軸の角度の16ビットの並列データをモーションコントローラに一括して入力させる。モーションコントローラは、CPU、入力、出力、入出力、通信およ

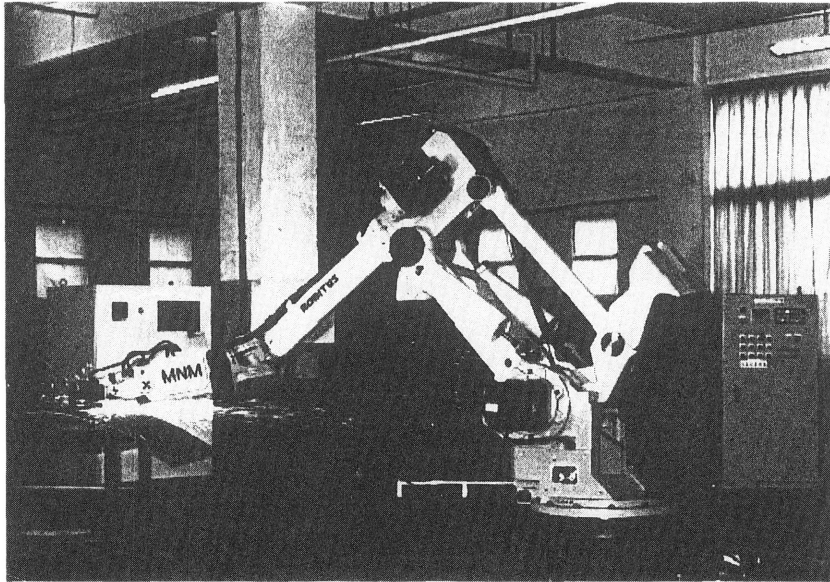


Fig. 4 Slave robot arm.

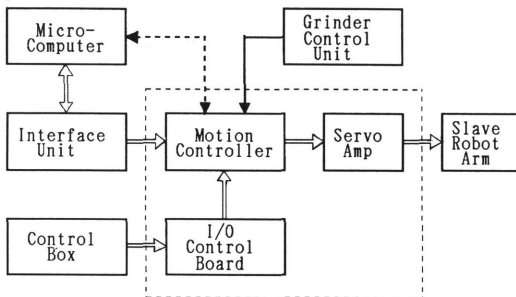


Fig. 5 Configuration of robot control unit.

びサーボの各モジュールにより成っている。入力モジュールより得られたデータは、CPU モジュール内に予め書き込まれたプログラムで実行され、動作指令がサーボモジュールを通してサーボアンプに送られる。

モーションコントローラはここで行うような実時間の制御用としては作られていないため、以上の一連の動作を行うためには最大で250msec.を要する。

また、通信モジュールは、制御用マイクロコンピュータおよび研削制御ユニットに対してRS232C ケーブルにより接続されている。これにより、異常信号の送受

信を行っており、システムの安全性が向上されている。

### 3. 2 マスタアーム

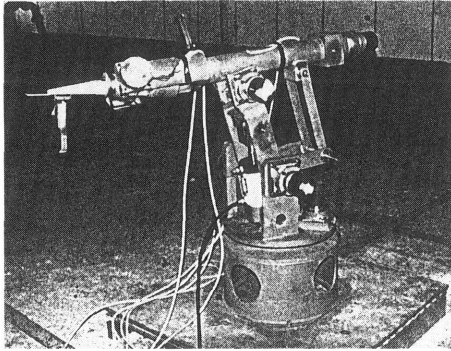


Fig. 6 Master arm.

Fig. 6はマスタアームの外形である。各軸の長さはスレーブロボットアームの1/3である。各関節にはインクリメント形で1回転当りの分解能が14,400のエンコーダが取り付けられている。これら6つの関節に取り付けられたエンコーダのデータはインタフェースユニットに送られる。

### 3. 3 インタフェースユニット

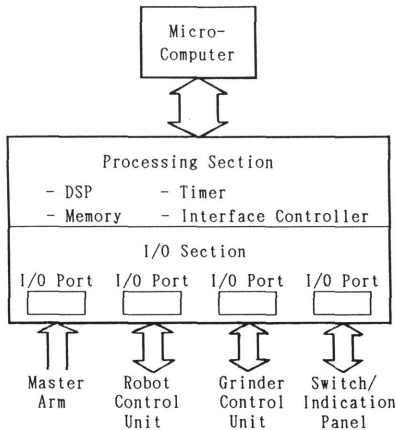


Fig. 7 Configuration of interface unit.

インタフェースユニットはFig. 7に示すように、演算処理部とI/O部より構成されている。

演算処理部では、I/O部からのデータをメモリに予め書き込まれたプログラムに従ってDSPで演算処理し、所定のメモリ上に書き込んで置く。このメモリは

共有メモリとして扱われ外部の機器からは、I/O部を通してこのデータを読み出すことができる。また、I/O部は電気的に絶縁されており、さらにFig. 1のシステムで用いるRS232Cケーブルは絶縁型を用いるため、全てのシステム間は絶縁されている。これにより、耐雑音性の面からも安全性が確保されている。

### 3. 4 ダンピングアダプタおよび研削制御ユニット

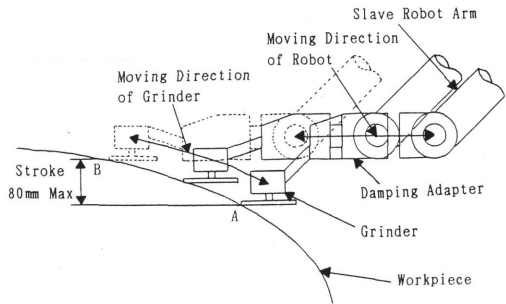


Fig. 8 Operation principle of damping adapter.

Fig. 8はダンピングアダプタの動作原理図である。ダンピングアダプタはロボットとグラインダの緩衝装置として用いられている。ダンピングアダプタはロボットの手首先端に装着されており、最大80mmの制御範囲内で上下し、加工物の曲面に柔軟に追従する。また、空気圧制御により、上向き、下向きあるいは横向きなど姿勢が変化してもグラインダの砥石の押付力は変化せず、常に一定の深さを研削することができる。

Fig. 8においてグラインダがダンピングアダプタの制御範囲の上限の点Aに近づくと、Fig. 3で示したように研削制御ユニットへ検出信号が送られる。これにより、スレーブロボットアームは上方に移動し、ダンピングアダプタの制御範囲の中心で動作するようにする。その後、点Bに近づいた場合にも同様の動作を上方の移動分に対して行い、常にダンピングアダプタの制御範囲の中心近傍で動作するようにする。研削制御ユニットはこの動作の他に、グラインダの異常検出、押付の角度制御および押付圧の制御等を行っている。

### 4. システム制御プログラム

Fig. 9は制御用マイクロコンピュータ内に組み込まれるシステム制御プログラムの流れ図である。このシステム制御プログラムは、教示モードと再生モードに大きく分かれている。教示モードではFig. 3に示した位置制御を行うと共に、教示点を記憶する動作を行っている。

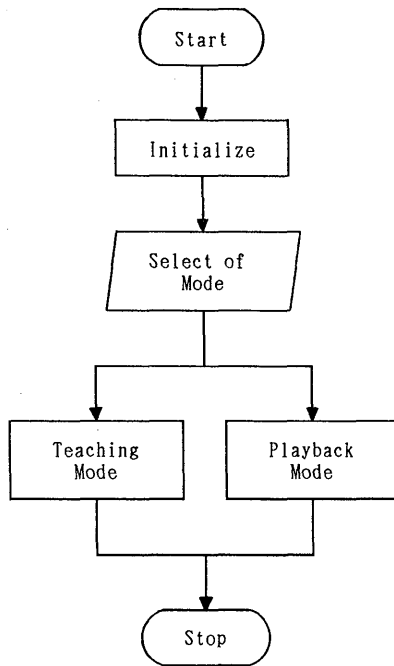


Fig. 9 Flowchart of system control program.

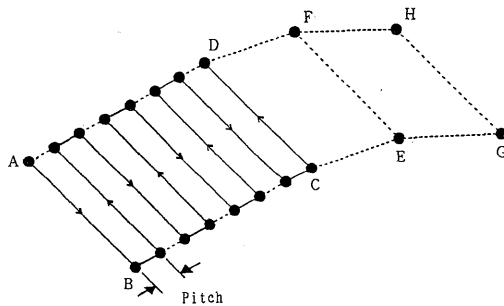


Fig. 10 Trajectory with interpolation playback control.

また、再生モードでは教示モードで記憶した複数の教示点の間を Fig.10に示したように補間する PTP 教示補間 CP 再生方式を採用している。

## 5. 追従特性

ここでは、産業用ロボットにマスタスレーブ制御を施した場合のマスタアームの動きに対するスレーブロボットアームの追従特性について検討する。

Fig.11(a)および(b)はスレーブロボットアームの第1関節の等速運動特性を示している。Fig.11(a)は速度  $v$  対経過時間  $t$  特性であり、Fig.11(b)は移動角度  $\theta$  対経過時間  $t$  特性である。Fig.11(a)の速度の測定値は

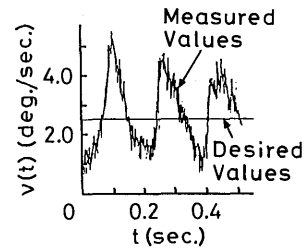
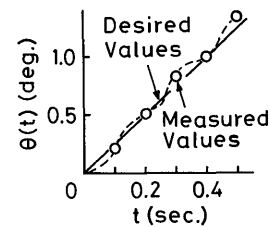
(a) Velocity  $v$  versus time  $t$ .(b) Angular position  $\theta$  versus time  $t$ .

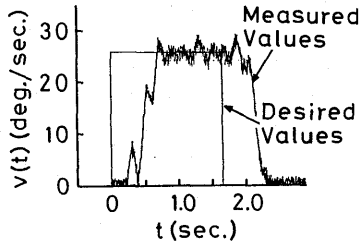
Fig.11 Trajectory tracking performance characteristics without smooth motion control.

スレーブロボットアームのサーボンプの速度検出出力端子の出力波形であり、Fig.11(b)の角度  $\theta$  の測定値はFig.11(a)の速度の測定結果を基にして求めた値である。PTP 教示・再生方式の産業用ロボットにマスタスレーブ制御を施した場合、Fig.11(a)に示すように、速度  $v$  を  $2.5$  度/sec. で等速運動をさせようとしても、速度  $v$  がほぼ一定周期で振動を繰り返し、スレーブロボットアームは激しい振動と振動音を発することがある。この現象は速度が比較的遅い場合に現れる。

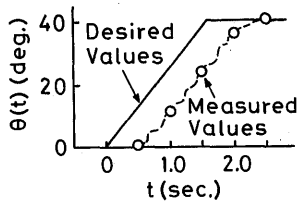
通常、PTP 教示・再生方式の産業用ロボットでは、予め与えられた比較的距離が離れた点の位置の情報によりアームは移動している。しかし、本システムのように産業用ロボットにマスタスレーブ制御を施す場合には、点の位置の情報は一定に比較的短い周期毎に実時間で与えられる。このため、ロボットは短い移動距離で移動と停止を高速で繰り返し、振動現象が生じる。

そこで、ここではこの振動現象を抑制するために、平滑制御動作を施すことにする。Fig.13(a)および(b)にこの場合の等速運動特性を示す。図より良好な特性が得られており、PTP 教示再生方式で動作する産業用ロボットのマスタスレーブ制御には平滑制御動作が有効なことが分かる。

次に、Fig.14(a)および(b)にこの場合のステップ応答を示す。Fig.14(a)は速度の変化であり、Fig.14(b)は移動角度の変化である。産業用ロボットの制御ユニッ

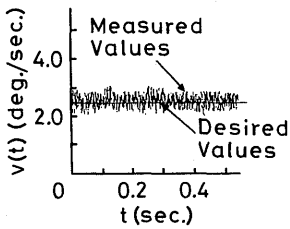


(a) Velocity  $v$  versus time  $t$ .

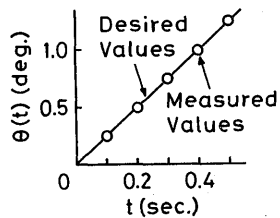


(b) Angular position  $\theta$  versus time  $t$ .

Fig.12 Step response without smooth motion control.

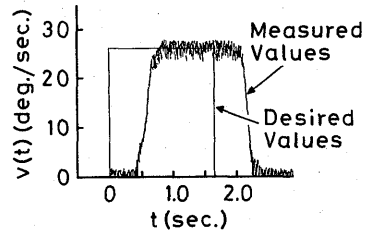


(a) Velocity  $v$  versus time  $t$ .

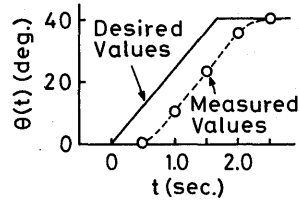


(b) Angular position  $\theta$  versus time  $t$ .

Fig.13 Trajectory tracking performance characteristics with smooth motion control.



(a) Velocity  $v$  versus time  $t$ .



(b) Angular position  $\theta$  versus time  $t$ .

Fig.14 Step response with smooth motion control.

トの中のロボットモーションコントローラは、通常、実時間で制御を行うようには作られていない。このため、ステップ入力目標値に対して、演算処理による時間遅れが生じている。しかし、平滑制御動作を施しているため、Fig.12(a)および(b)の施していない場合のように振動現象は現れておらず、比較的良好な特性が得られることが分かる。Fig.15に平滑制御動作を施した場合のステップ応答に対する速度の立ち上がり時間  $t_r$  に対する PTP 制御における速度の目標値  $v$  および加速度  $a$  の関係を示す。図より、速度にかかわらず、加速度には適切な値が存在することが分かる。このFig.15の特性より本システムにおける加速度  $a$  は  $275 \text{ deg./sec.}^2$  に設定している。ここでは、立ち上がり時間に対する特性のみを示しているが、立ち下がり時

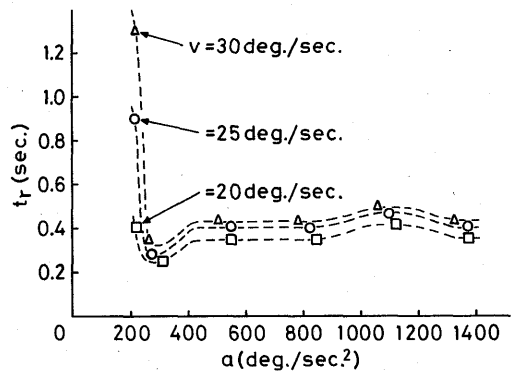


Fig.15 Rise time  $t_r$  versus acceleration  $a$  characteristics.

間に対しても同様の結果が得られる。さらに1軸だけでなく他の軸に対しても同様の結果が得られる。

## 6. むすび

以上、マスタスレーブ方式の大形産業用ロボットを大形加工物の研削システムに適用した場合のシステム構成および動作特性について述べた。その結果を要約すれば次のようになる。

(1) マスタアーム、制御用マイクロコンピュータおよびインタフェースユニットからなるシステムを産業用ロボットに付加することにより、マスタスレーブ方式で動作するロボットシステムを構築できることを示した。

(2) 提案したマスタスレーブ方式ロボットのシステムはもともと PTP 制御で動作する大形産業用ロボットを用いているため、動作的に振動現象が現れる場合がある。しかし、この現象は平滑制御動作を施すことにより抑制でき、比較的良好な動作特性が得られる。

前述したように、産業用ロボットは実時間で外部より制御を行うようには作られていない。このため、提案したシステムにおいてはスレーブロボットアームの動作に時間遅れが生じ、高速でマスタアームを動作させた場合停止命令にも拘らず動作を続け、衝突に至ることが考えられる。そこで、現在、衝突回避を計るた

めにソフトウェアによる動作範囲の制限、ロボットビジョンおよび力制御の導入を検討中である。また、マスタアームを人間工学上適切な形状にすることについても考察中であり、次の機会に報告したい。

## 参 考 文 献

- (1) 三菱重工：“ROBITUS MRS-300操作マニュアル”（平3-04）。
- (2) 日本ロボット学会：“ロボット工学ハンドブック”，コロナ社（平2-10）。
- (3) 吉井賢太，大富貞行，杉山謙吾，千足正吉：“鉄鋼プロセスへのロボット応用の現状と課題”，電学論 D, 111, 6, pp.423-426（平3-06）。
- (4) 松尾博文，黒川不二雄，浅野陸喜，東藤義則，太田勝彦：“大形汎用ロボットのマスタアームによる制御について”，1991年九支連大，1122。
- (5) A. J. Koivo：“Fundamentals for control of robotic manipulators”，New York:John Wiley & Sons, Inc., 1989。
- (6) 松尾博文，黒川不二雄，東藤義則他，“平面及び曲面の研削装置”，特願平3-130054（平3-05）。
- (7) 楠菊信，馬渡賢治：“通信ネットワーク工学”，オーム社（昭60-09）。