

リンク機構を応用した姿勢保持型バリ取りロボットの研究

東京電機大学 理工学部 産業機械工学科

教授 斎藤之男

(平成元年度研究開発助成 AF-89021)

1. 研究の背景

埼玉県川口市周辺に見られる鋳物製造業社は中小企業が多く、環境改善は遅々として進められない状況である。砂型造形、注湯工程等はライン化が進み製造コストを低下しているが、バリ取り・仕上げ工程の全コストに対する割合が高くなってきている。また、鋳物製造を含む素形材工業は3Kといわれるもので、若者の姿は皆無に等しく作業者は高齢となっている。バリ取り作業は、振動、粉塵等過酷な環境であり、ロボットに置き換えるには非常な困難が伴う。

本研究は、ロボットの関節に生じるトルクをフィードバックする事により、加工・研磨時における接触力を制御するバリ取りロボットの研究であり、特に、ロボット本体、制御系、コントローラロボット用ソフトウェアを全て専用ロボットとして独自に開発し、実験研究した。

2. 研究方法

2.1 バリ取りロボットのシステム構成

バリ取りロボットに要求される機能としては主に、剛性の高いロボット、環境との接触力を測定する力センサ、ロボットを制御するコントローラ制御プログラムを開発、管理するためのコンピュータ等である。我々のシステムは、これらすべてをサポートしている。

2.2 ロボットの仕様

本ロボットのは、各軸DCサーボモータによって駆動され、3次元空間での位置決め、工具方向維持に必要な6自由度を有している図1にバリ取りロボットの外観図を示す。

回転部2自由度 (θ_1, θ_5)、揺動部 ($\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_6$) となっている。我々の対象するワーク形状は600mmの立方体でありこれを加工できる動作範囲が得られる構造となっている。なお、本体中央部は4節平行リンク機構となっており、研削作業時に要求される高剛性を満たしている。振動吸収と、軽量化を目指し、本体中央部の4節リンク部と、ロボット最上部第5アームの材質は、カーボンファイバ積層材を使用することで減衰率を高めている。

2.3 ロボットのシステム構成

図2にシステム構成図を示す。本システムはホストコンピュータにPC9801を用い、制御プログラムの開発、各種

パラメータ設定、ティーチングデータ保存等を行っている。プログラム言語は主にC言語を使用している。計算はホストコンピュータだけでなく、専用マイクロプロセッサとして開発したMMPS (Multi micro processor) との併用により、計算時間の高速化をはかっている。

ロボットは各軸ACサーボモータによって駆動しており、サーボアンプに、正転、逆転パルス (2bit) を送信するだけ

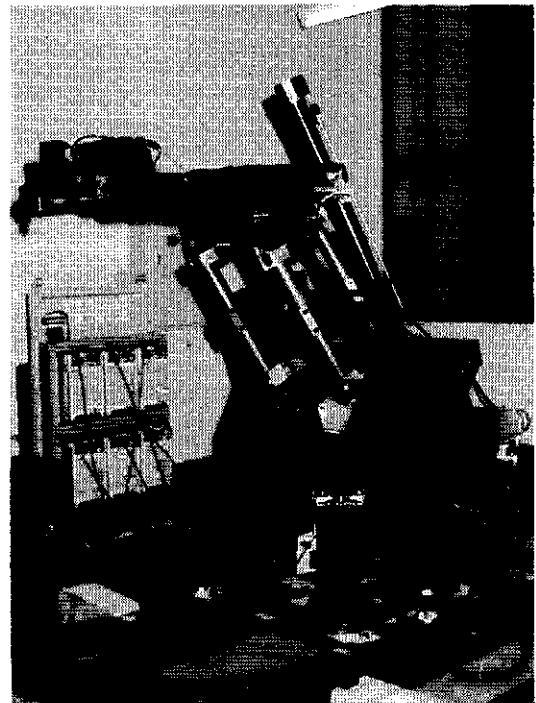


図1 バリ取りロボットの概観図

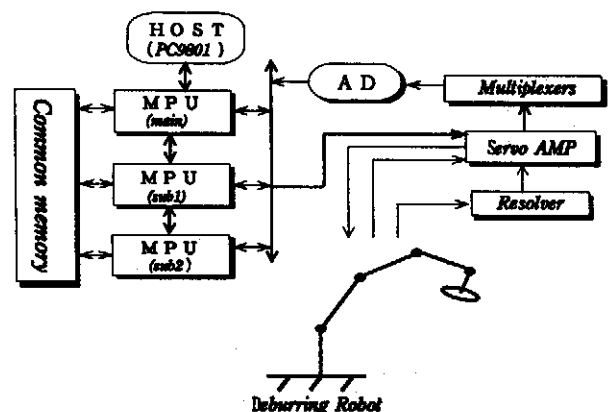


図2 バリ取りロボットシステム図

でロボットを動作させることが出来る。MMPSのサブ1からは、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の動作指令信号が、サブ2からは、 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ の動作信号が並列に送信される。サーボアンプからはモータの電機子電流に比例した、トルクモニタ信号が0~10 (V) の範囲で出力される。したがってこの信号を検出することにより、各軸でのトルク値を知ることが出来る。研削時にはこのトルク値をもとに、ワークとグラインダーとの接触力を検出する。実際のサーボアンプから出力されるトルク電圧とトルクの各軸での関係は図3のようになる。尚、 θ_5 のトルクモニタ信号のステップ応答は図4である。このように、各軸の応答性を測定し、本ロボットにおける接触力をリアルタイムで精度良く検出できる。

2.4 ロボットコントローラ

前述で述べてきたように、本システムはロボットコントローラとして、ホストコンピュータであるPC9801と、並列分散処理が可能なMMPSを使用している。MMPSとはMulti Micro Processor Systemの意味であり、複数のMPU (Micro Processing Unit) を使用している、各MPUにはローカルメモリとして32kbytesを有しているが、各ボードでアクセス可能な共有メモリボードも有している、MMPS全体で128kbytesのメモリ空間を持ち、必要に応じてメモリの増設も可能であるが、ホストコンピュータの処理速度が速いことから、ホストコンピュータ上のメモリを使用することで、メモリの不足分を補うことができる。メインボードからサブボードへのデータの書き込みは共有バスを経由する方法とI/Oを通じて行う方法の2種類がある。サブボードからメインボードへのデータ書き込みは直接的には行えないが、共有メモリを通して実現することが可能

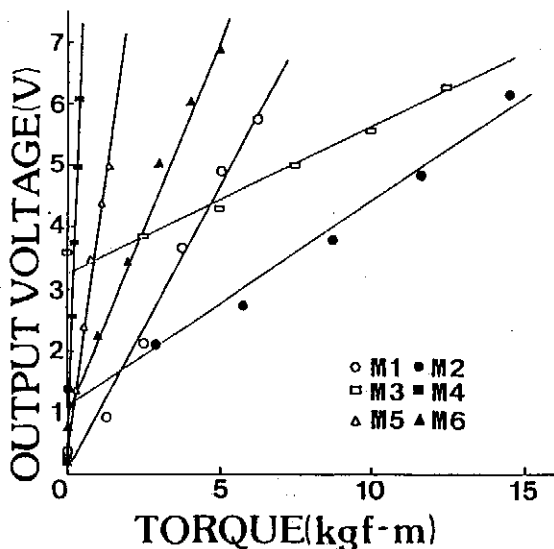
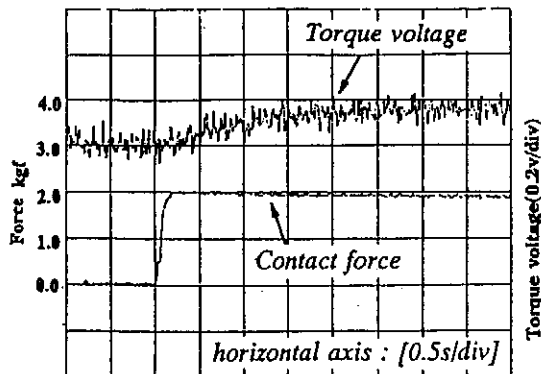


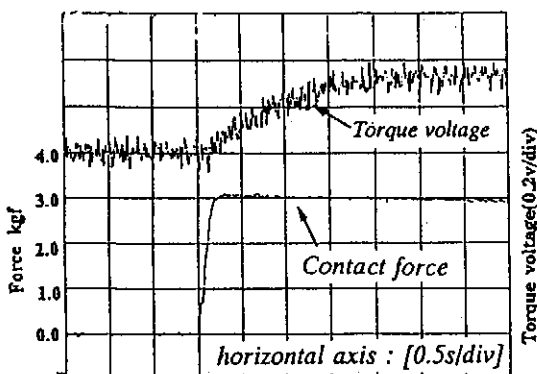
図3 関節トルクとトルク信号電圧の関係図

である。共有メモリは、通常、WRやRDの制御バスをメインボードが占有しているためサブボードからのアクセスは行えず、そのためにはメインボードCPUの動作を停止させる事が必要になる。従って、共有メモリにそれぞれのボードが頻りにアクセスする場合、個々の処理能力は低下するが、ソフトウェア上でのタスク分散をうまく処理すれば高速化が計れる。

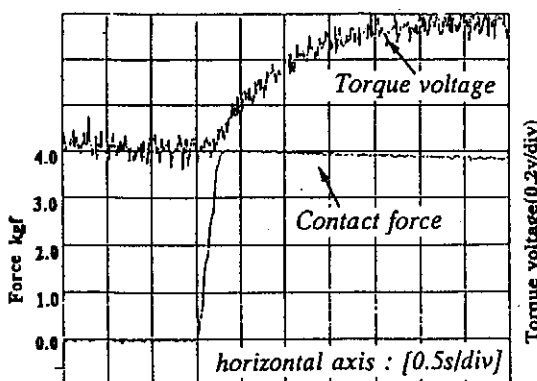
図5はロボット専用コントローラとして開発したMMPSの構造を示す。



(a)入力2kgfの時



(b)入力3kgfの時



(c)入力4kgfの時

図4 トルク信号のステップ応答 (θ_5)

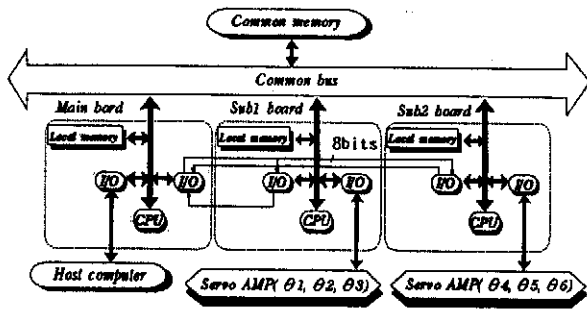


図5 MMPS構成図

3. 各モータ関節機構におけるトルク検出

3.1 ばね-ダンパー-質量系における関節トルク応答性

本ロボットの力学系を、ばね、質量、ダンパ系としてモデル化する。

ここで本ロボット関節、アームを図6に示すモデル化を行う。

図6の系の運動方程式は次式で与えられる

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = P(t) \quad (1)$$

さらに

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C_1 C_4 & C_2 & C_4 \\ C_2 & -C_2 - C_3 & C_3 \\ C_4 & C_3 & -C_4 - C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 - k_4 & k_2 & k_4 \\ k_2 & -k_2 - k_3 & k_3 \\ 0 & k_3 & -k_3 - k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで、

$$M1=20(\text{kgf}), M2=10(\text{kgf}), M3=8(\text{kgf}), K1=25(\text{kgf/m}), \\ K2=5(\text{kgf/m}), K3=2(\text{kgf/m}), K4=5(\text{kgf/m})$$

減衰マトリクスはレーレー減衰のときのモードマトリクスは次のようになる。

$$U = \begin{bmatrix} -9.76881 & 14.7541 & 335.796 \\ -25.2256 & -4.90961 & -641.921 \\ -22.3072 & -9.19012 & -359.667 \end{bmatrix} \quad (3)$$

この時の固有値 λ は

$$\lambda = [1.74408 \quad 0.318592 \quad 1.01233] \quad (4)$$

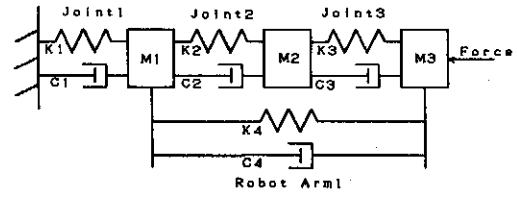
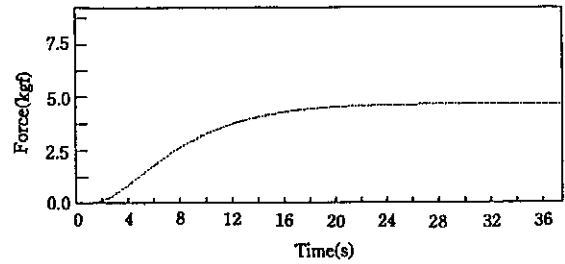
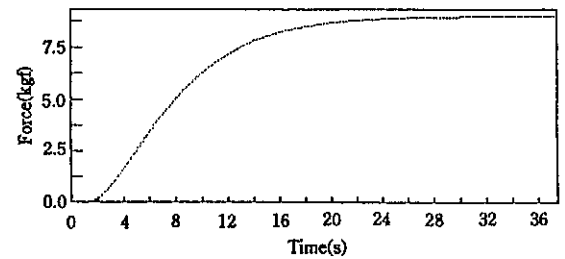


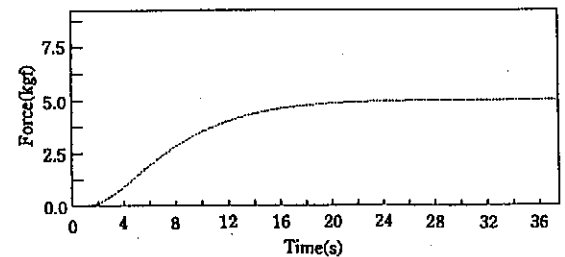
図6 ロボットの関節モデル化



(a)x1の結果



(b)x2の結果



(c)x3の結果

図7 各関節軸のトルク応答性計算結果

である。この条件下における x_1, x_2, x_3 の応答性の計算結果を図7に示す。

このように、各軸のトルク応答性が分かれば、外力が作用した時に、どの軸が最も感度がいいかを考慮してトルク検出する事ができ、外力検出感度の向上が計れる、言い換えれば、外力に対する本ロボットの姿勢保持について各軸の分担率を示している。

4. 実験結果

4.1 湯口面の研削と面粗さ

力制御によって研削した湯口部上面の形状と粗さを図8(a),(b)に示す。全体の形状としては測定点の始点と終点で中央部よりも研削量が多い形になっている。これは、力制御により研削した際の反力を一定に保つために湯口の両端部は切り込みが深くなり、湯口部上部では研削砥石のコンプライアンスにより送り速度が一定であることから中央部が砥石形状に合わせ変化したものである。

研削面の粗さとしては中心線平均粗さで $3\mu\text{m}$ が得られた。この値は、本システムでの加工がバリ取りとしては、十分な仕上げに値する。

研削加工実験としては、加工時のトルク電圧の変動とロボットアームの振動検出を行った。

4.3 関節トルク測定実験

本ロボットの特徴は、先にも述べてきたように、一般に使用されている6軸力覚センサーといった、力検出器をエンドエフェクタ付近に搭載することなく、DCサーボモータによって駆動される各軸のトルク電流値を、0~10 (V) 幅でトルクモニタ信号としてコントローラにフィードバックし、接触力に変換する。そこで、実際に本ロボット動作時における各軸のトルク電圧の変動を測定する。

本実験では、エンドエフェクタを加工面に押しつけたときのロボット関節トルクと接触圧をロードセル (KYOWA 製) を使用し、デジタルオシロスコープにより記録した。

エンドエフェクタを動作量一定で鉛直方向に押しつけていった時の押しつけ力と、関節トルクの変動を測定した結果を図9に示す。この時、1回のエンドエフェクタ動作指令量は、2.5mmとし、動作関節は最上部アームx軸回りの回

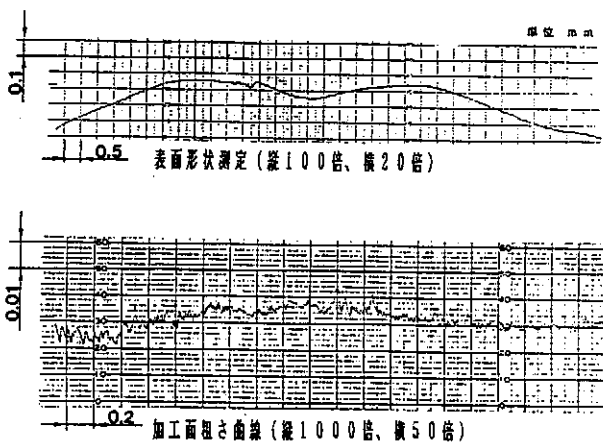


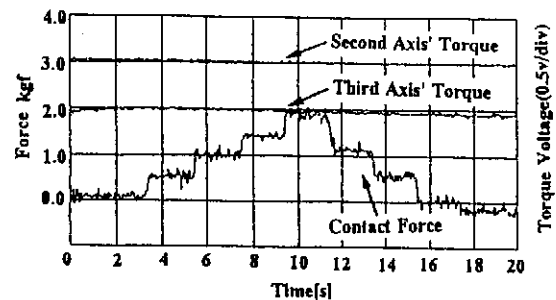
図8 加工面の形状測定と粗さ測定結果

転をする θ_5 軸を使用した。明らかに θ_1 に力は作用しないので、 $\theta_2 \sim \theta_6$ に作用するトルクを測定した。図9 (a) は θ_2, θ_3 軸のトルク変化を、図9 (b) は θ_4, θ_6 軸トルク変化を示している。図から分かるようにロボット姿勢によってトルク変動の大きい軸と変化がほとんど見られない軸があるため、実際には変動の大きい関節に注目する必要がある。

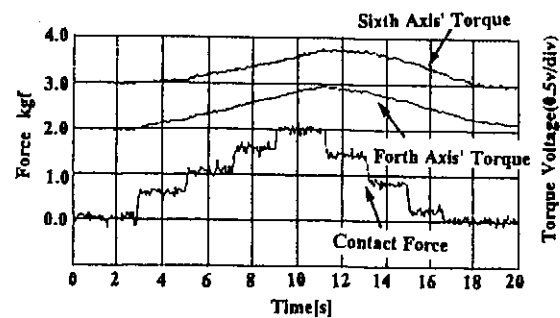
次に、本ロボットでの実際の力制御測定を行った。本測定では θ_5, θ_6 をトルク検出軸とし、接触力が設定値付近でロボットが制御できるかを測定したものである。

図10では θ_5 をトルク検出軸とし、 θ_5 のトルクモニタ電圧0~10Vを分解能12bitでMMPSにフィードバックし、設定値との比較により、接触力が設定値付近になるようにロボットを制御し、接触力と、関節トルク電圧を測定したものである。設定押しつけ力は2.5kgf、5.0kgf、7.5kgfについて行った。図11では同様に、 θ_6 をトルク検出軸として行った結果である。

先にも述べたが、図9から分かることは、姿勢、加工方向が変わるごとに、接触力による、各軸へのトルクの影響力は変わってくるということである。これらは、アームのコンプライアンスや、各軸のコンプライアンスにより更に複雑に変化する。接触力はコンプライアンスの大きい軸から順に吸収され、全くトルク変動が無い軸もでてくる、これは図9より明らかである。こういった特性を考慮し、精度良

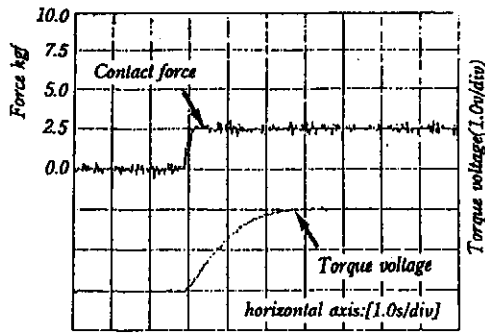


(a) θ_2, θ_3 の結果

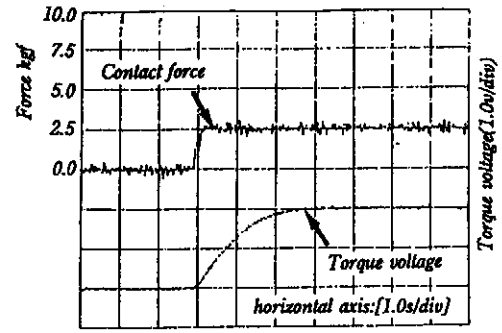


(b) θ_4, θ_6 の結果

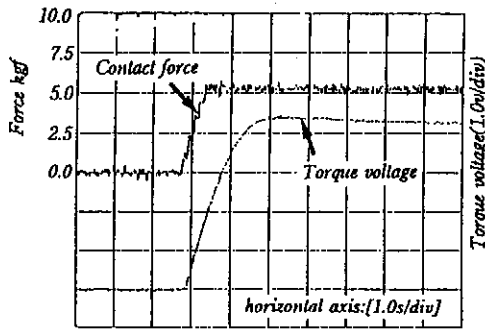
図9 関節トルクと接触圧測定結果



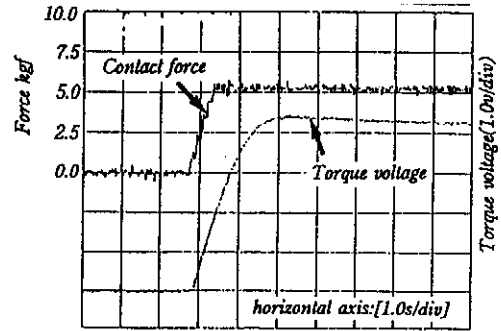
(a) 目標値 2.5kgf



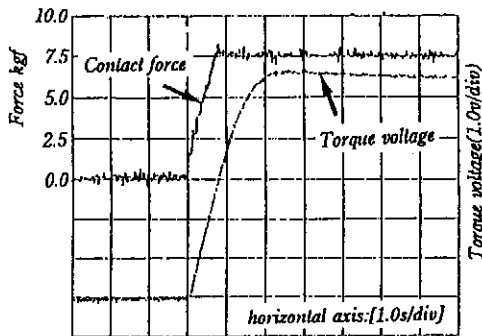
(a) 目標値 2.5kgf



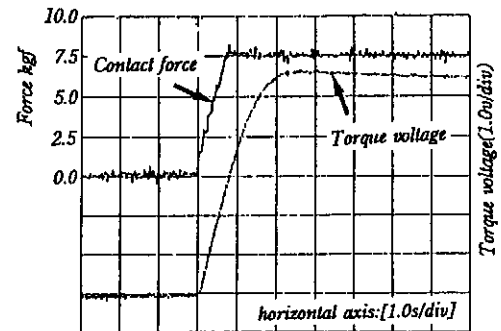
(b) 目標値 5.0kgf



(b) 目標値 5.0kgf



(c) 目標値 7.5kgf



(c) 目標値 7.5kgf

図10 検出軸 θ_5 の時の制御結果

図11 検出軸 θ_6 の時の制御結果

く接触力を検出し、制御できるシステムを考慮しなければいけない。図10、図11からは、本システムで、各軸におけるトルク変動特性が既知であれば、十分に精度良く目標接触力で、制御できることが分かった。

5. 結び

本研究は、高齢化と環境から自動化の要求が高まっている鋳物工程のバリ取りを対象に最適なロボットシステムの確立を計るものである。バリ取りや研磨作業ではロボットを力制御によって動作させることが必要となる。

バリ取り作業において、熟練作業者のように時事刻々と

変化するバリの状態（大きさや硬さ等）に応じ、適切に切削工具速度、工具押しつけ力や工具把持インピーダンスを調整し、良好な研削結果を得ることが必要である。このような適応的な作業を行うことが可能な知的ロボットの実現が最終目的であるが、一般には、スキルベース制御の研究となる。しかし、このスキルベース制御と現実とは課題があり、如何にして熟練作業員が有する作業スキルを計算機処理可能な知識として獲得するかという問題と、獲得した作業スキルに基づき、如何にしてロボットを適応的に制御するかという問題である。その一方、本実験で示すように、ロボットシステム特有の制御性能が示されており、

人間に替わって作業する研磨ロボットの可能性も見えてきた。

終わりにあたり、本研究を助成された財団法人天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝申し上げます。

発表論文

- 1) Y. Saito, H. Itoh, T. Kawashima, A. Maeda, T. Haneyoshi, S. Fujii : A Development of Torque Equilibration Type Deburring Robot System, 20th International Symposium on Industrial Robots, (1989), 901 - 908.
- 2) 斎藤、藤井、羽根吉、前田、川島、伊藤 : 軽量型バリ取りロボットに関する研究、東京電機大学総合研究所年報、No.9, (1990), 131 - 136.
- 3) 斎藤、藤井、前田、羽根吉、川島、伊藤 : バリ取りロボットシステム, 自動計測制御学会ロボティクス・自動化システムシンポジウム、(1990). 145 - 146.
- 4) 斎藤、小川、羽根吉、川島、伊藤、降旗 : バリ取りロボットに関する研究、第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集、(1990). 841 - 842.
- 5) Y. Saito, H. Itoh, T. Kawashima, S. Fujii, T. Haneyoshi, A. Maeda, K. Ogawa : Adaptive Deburring Robot Mechanism for easy Cutting, Eighth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Proceedings, (1991), Vol. 6, 63 - 66.
- 6) Y. Saito, T. Haneyoshi, A. Maeda, H. Ueno, T. Kawashima and H. Itoh : A Periodic Effect with Multi - Force Control to Robotic Deburring and Polishing, 24th ISIR, Tokyo Japan, (1993), 55 - 62.