内挿型可変速繰返し制御と

その工具負荷制御バリ取りロボットへの適用

木村洋一* 向井良二* 小林史典** 小林 勝***

Interpolative Variable-Speed Repetitive Control and its Application to a Deburring Robot with Cutting Load Control

Yoichi KIMURA Ryoji MUKAI Fuminori KOBAYASHI Masaru KOBAYASHI

Usual repetitive control, when applied to path control of robots, cannot afford dynamical path speed changes, which correspond to changes in the reference period. This paper proposes a modified repetitive control that achieves feedforward control by switching the waveforms previously stored in several controllers according to speed changes, in an interpolating manner if necessary. An algorithm to implement the proposed method for robots is developed, and a deburring robot is actually constructed to change its path speed according to the cutting load, which is detected by the variation of tool revolutionary speed. Experimental results with test models show that the method can significantly reduce errors even when speed changes, and is advantageous to achieve accurate robots.

Key Words: Repetitive Control, Path Control, Deburring Robot

1. はじめに

反復制御(繰返し制御,学習制御)は1周期前(11試 行前)の偏差を利用する制御手法で,制御対象が十分に 同定されていなくても周期的な目標入力には高精度で追 従させられることが特長である.これまでにもプレイバ ック型ロボットに導入し,軌道誤差をなくす試みがいく つか報告されている^{1~5)}.しかしこの手法は,目標周期 に相当するロボットの速度が変化する場合には適用しに くい.すなわち,繰返し制御は原理的には補償器内のむ だ時間の長さが入力周期に一致している場合にのみ有効 であるし,速度変化に対応できる学習制御⁵⁾には後述す る問題がある.これに対し筆者らは,目標周期変化に対 応できる繰返し制御の方式を先に提案した⁹⁾.

しかし、この方式は速度ごとに補償器を用意するので、 基本的にステップ状の速度変化にしか適用できない.そ

日本ロボット学会誌 8巻4号

こで、本論文ではさらに、連続的な速度変化にも対応で きるように、複数の補償器内の操作量波形から内挿法で 操作量を算出して補償する繰返し制御応用の一形態(以 下,内挿型可変速繰返し制御と呼ぶ)を提案するととも に、バリ取りロボットでその有効性を確認した結果につ いて述べる.

鋳物のバリ取りは粉塵,騒音など悪環境下の作業であ るため,ロボットを使った自動化の研究が推進されてい る.しかしロボットは

- (1) ワークとの干渉やロボットの負荷能力から出力 の大きな工具が使用できない.したがって、工 具の送り速度を低く設定せざるを得ず、高能率 加工が困難である.
- (2) 目標値と制御出力との間に、一般に速度に依存 する偏差が存在するため、再生速度が異なると 軌道が一致しなくなる。

という問題があり、特に複雑形状毎物の不規則なバリ取 りには充分対応ができなかった。(1)に対して筆者らは、 工具の切削抵抗を検出して送り速度を適応的に変える鋳 バリ取りロボットの制御法を提案した¹⁰⁾.この工具負荷

377

原稿受付 1989 年 9 月 8 日

^{*} 日立金属(株)

^{**} 九州工業大学

^{***} 長岡技術科学大学

制御では速度が連続的に変化する. ここではこのロボットに,内挿型可変速繰返し制御を適用する. この手法の 適用によって,加工タクトの短縮に加えて,速度の大き さによらず偏差が大幅に低減した.

この論文では、内挿型可変速繰返し制御の原理と具体 的な実現アルゴリズム、その工具負荷制御バリ取りロボ ットへの適用、実験結果の順で述べる.

2. 内挿型可変速繰返し制御

まず,目標周期変化に対応できる繰返し制御とそれへの内挿法の適用について説明する.

2.1 目標周期変化に対応できる可変速繰返し制御

繰返し制御は内部モデル原理に基づいているため,目 標周期が変化して、内部モデルである補償器内のむだ時 間の長さと一致しない状態になると、性能は保証されな い、すなわち、目標周期に相当する軌道速度の変化する ロボットには適用できなかった、この目標周期の変化に 対応できる繰返し制御法として、筆者らは次の手法を提 案した、すなわち

- (1) 予め操作量波形を形成させた補償器を複数個用 意し(注1),目標周期の変化に応じて切換える.
- (2) フィードフォワード制御により、状態量を新しい目標周期のそれに合わせる.

これらの工夫により、収束動作がほとんど不要になり、 偏差を大幅に低減できることを示した⁶⁾.

さらに、1サイクルの中で2回以上現象の進行速度が 変化し、繰返しによる操作量波形の修正が行われない状 況においては、補償器をループに入れない方法でフィー ドフォワード制御することを提案した。

しかしこれらの方法は、基本的にはステップ状の速度 変化に対応するものであるため、たとえば工具負荷制御 を行なうバリ取りロボットのような、連続的な速度変化 のあるものに適用するには不十分であった.そこで、こ のような状況では限られた複数の操作量バターン(繰返 し制御にて充分繰返しを行い、偏差がほぼ0に収束した 定常的な状態での、補償器内の操作量波形パターン)か ら内挿する方法を提案する.

2.2 内挿法による連続的速度変化への対応

内挿で目的を達成するためには、 ロボットの軌道位置, 姿勢が同一のところで操作量と速度が線形関係にあるこ とが必要である. このための一般的な条件を導くことは, 小林史典 小林 勝

目標値の周波数成分の構成(振幅比,位相差)と制御系 の周波数特性の両方が複雑に絡みあって決まるので、き わめて困難である.しかし、目標の周波数帯域で制御系 のゲインが周波数の1次関数と見なせ、位相差が小さけ れば問題ない.速度制御ループ伝達関数G(s)が(1)式 である実際のロボットの直動軸(制御ブロックは Fig.5 に示されている)に対しシミュレーションを行って、こ のことを検証した.

 $G(s) = 280^2/(s^2+2.0.52.280 s+280^2)$ (1) **Fig.** 1(a)に、この制御系に対して幅が 63.7mm の 区間を往復する、1周期が2sec と 4sec の2種類の正弦 波目標入力を与えたとき、5回の繰返し後に繰返し補償 器内に生成される二つの操作量パターンと、これらの操, 作量パターンから1周期が2.67sec の操作量パターンを 内挿で求めた結果を示す、一方 Fig.1(b)に、実際に1 周期が2.67sec で繰返しを行なって生成された操作量パ ターンを示す、Fig.1(a)にて内挿の基準とした二つの 操作量パターンは2倍の速度比をもっているが、内挿し た場合と実際に繰返しを行った場合とは最大誤差4(単 位パルス)で一致する結果が得られている(注2).

ゲインと位相差が上記の条件を満たさないときは内挿 で十分な精度が得られない。しかしその場合も、狭い周 波数帯域(速度差)を仮定すれば、一般には線形近似で きる。そこで、速度と速度の間の操作量が線形とみなせ る。段階的な複数の速度に対して、予め操作量バターン を求めておき、その間の速度のときは、最も近い二つの 速度の操作量パターンから操作量を内挿で与えることで、 偏差を十分小さく保つことができる。

2.3 実現アルゴリズム

一般のロボットコントローラでは繰返し補償器をソフ トウェアで構築するので、操作量バターンはマイクロコ ンピュータシステムメモリ内のサンプル値で構成される. ロボットのサーボ制御は、ソフトウェアで一定のサンプ ル周期毎に位置ループを制御する方式をとっているため、 操作量波形の生成もこれに同期して行うことが望ましい。 そのためロボットの軌道の補間点と同様、低速で動作さ せたときほど多くの操作量サンプルが生成されることに なり、操作量パターン毎にサンプル数と各々のサンプル 値に対応するロボットの位置、姿勢が異なる。したがっ て、工具負荷制御のために操作量を切換える際、単に周 期開始からの時間を操作量パターンからサンプル値を取 り出す基準にすることはできず、工夫が必要となる。

JRSJ Vol.8 No.4

August, 1990

⁽注1)速度変化に対応できる学習制御⁵⁰は,別の速度での操 作量を、1サイクル単位で計算で求めている.一方この手法は、 実際にその速度で繰返しを行うためロバスト性に富むほか、工 具負荷制御のような、1サイクル内の予期しない速度変化にも 対応できる.

⁽注2) この場合,目標の周波数は 0.5 Hz と 0.25 Hz であり, 一方(1)式の ω_nは 280, つまり 44.6 Hz 以下はゲインが平 坦である.また双方の位相差は 0.3°と小さい.このため高い 内挿精度が得られた.





(a) Actual control patterns for $100 \sin \pi t$ and $50 \sin (\pi/2)t$, and computed pattern for $75 \sin (75 \pi/100)t$

(b) Actual control pattern for $75 \sin (75 \pi / 100)t$

Fig. 1 Effectiveness of interpolation

ここでは、予め離散的に生成された操作量パターンか ら、工具負荷制御中の速度および位置、姿勢に唯一に対 応するロボット各軸の操作量を求めるため、教示点と教 示点の間を一つの制御ブロックとし、現在のロボット軌 道の補間点と一つ前の教示点からの距離を基準に切換え る方法を採用する. **Fig.2**にロボット軌道の補間点と生 成される操作量パターンの概念図を示す.工具負荷制御 中の制御速度が *V**、補間距離が *L** のとき、軸毎の操 作量 *C** は操作量パターンから(2)~(4)式で算出すれ ばよい.

$$CU = \begin{cases} CU_{j} + \\ (CU_{j+1} - CU_{j})(L^* - LU_{j})/(LU_{j+1} - LU_{j}) \\ (j \ge 1) \\ CU_{0} + \\ (CU_{1} - CU_{0})L^*/LU_{1} \\ (j=0) \end{cases}$$
(2)

$$CL = \begin{cases} CL_{K} + \\ (CL_{K+1} - CL_{K})(L^{*} - LL_{K})/(LL_{K+1} - LL_{K}) \\ \\ (k \ge 1) \\ CL_{0} + \\ (CL_{1} - CL_{0})L^{*}/LL_{1} \\ \end{cases}$$
(k=0)
(3)

$$C^* = CU + (CL - CU)(V^* - VU)/(VL - VU)$$
 (4)

ここで*CU*, *CL* は制御速度 *V** を上側および下側に挾む 速度 *VU* および *VL* を有する操作量パターンの,補間 距離 *L** における操作量であり,*LU*, *LL* は各操作量サ ンプルが生成されたときの補間距離である. 添字。は、 速度 *VU*, *VL* の操作量パターンとしてメモリ内に離散的 に生成されているデータのなかで、制御ブロックの始点 教示点 P_n の、添字」は P_n から1 サンプル周期後のサ ンプル値であることを示す. また添字 _{j,k} は *VU*, *VL* の 操作量サンプルのなかで補間距離が *L** を超えない最近 傍の, _{j+1,k+1}, はその次の周期のサンプル値である. すな わち,まず生成されている複数の操作量パターン名々か ら現在の補間距離 L^* を超えない最近傍のサンプル値を 引き出し、これらのなかから生成速度が制御速度 V^* を 挾む二つのパターンを選択する. つぎにこの二つの操作 量パターンについて、補間距離 L^* における操作量を L^* を挾む二つのサンプル値から(2),(3) 式を用いて 内分計算する. 最終的に (4) 式で制御速度 V^* におけ る操作量を内挿する.

3. 工具負荷制御バリ取りロボットへの適用

3.1 工具負荷制御バリ取りロボット

筆者らは、アルミニウム鋳物を対象とするバリ取りロボットの研究を進めている。アルミニウム鋳物は金型鋳造で比較的寸法精度は良いが、形状が複雑でバリが大きいため、従来のプレイバックロボットでは、十分な能率, 精度を得ることが難しい。近年、バリ加工中の負荷状態を力センサーや工具モータの電流により検出して、工具





Fig. 2 Control patterns for various path velocity and teaching points

日本ロボット学会誌 8巻4号

— 3 **—**



Fig. 3 Configuration of a variable-speed deburring robot

押付力あるいは送り速度を制御するバリ取りロボットが 報告され、用途によっては一部実用化されている^{7~9)}. 大きなバリを1パスで除去するため、高出力な高周波誘 導電動機とエンドミルを工具に用い、最大 100mm/s 近 くの送り速度でバリ取りを行うには問題があった。そこ で、誘導電動機は負荷トルクが増加すると同期速度から すべりが生じることを利用して、工具の回転速度からバ リ加工の状態を検出し、負荷が一定になるように送り速



Fig. 4 Schematic of the robot control system

度を制御する方法を提案した¹⁰⁾. この工具負荷制御ロボ ットの制御偏差を無くし,仕上げ精度を向上するため内 挿型可変速繰返し制御を適用する.

3.2 実験ロボットの概要

Fig.3に実験ロボットのシステム構成を示す. アルミ ニウム鋳物の高負荷, 高速バリ取りを目的として, 特に 剛性を考慮して開発したACサーボモータ駆動の6軸円 筒座標形ロボットである. 工具は定格回転速度 17,500 rpm, 定格出力 0.6kW の高周波誘導電動機で駆動され るエンドミルあるいはロータリーバーであり,厚さ1mm 程度のアルミニウム鋳物のバリは, 100mm/s 近くの送 り速度でも除去が可能である. 負荷に応じて変化する正



Fig. 5 Block diagram of a deburring robot using the variable-speed repetitive control

具の回転速度は、工具に内臓したパルス発生器からのパ ルスを F/V 変換して検出する. ロボットコントローラ は、電圧に変換された値を A/D 変換器を通じて取り込 み、負荷トルクが一定となるように工具の送り速度を制 御する.

応答の速い工具負荷制御を実現するため、ロボットコ ントローラには極力短いサンプル周期で負荷の検出、送 り速度の決定、補間点の演算、そして6軸サーボ制御の できる処理速度が要求される.本ロボットでは、演算プ ロセッサ付の16ビット2CPUマイクロコンピュータシ ステムとすることにより、サンプル周期が10msのリア ルタイムサーボ制御および繰返し制御の操作量処理を可 能とした.Fig.4にコントローラ内のマイクロコンピュ ータのシステム構成を示す.

3.3 制御方法

Fig.5 に工具の回転速度レギュレータを組み込んだロ ボットの制御ブロック図を示す.図にて左上端の Nnom は工具の目標回転速度,左下端の N_n は現在の工具の回 転速度,右上端の V com はバリに当る前の工具送り速 度,中段左の θ_i com は各軸の目標位置である.工具負 荷制御系は、バリの大きさと送り速度に応じて変動する ゲイン(図中最下部の 2540(Ad·Rd·V/N_n)^{0.66}の部分) を含んでいる.図には2枚刃エンドミルに対する値を示 した.工具の伝達関数(図中最下部の1次遅れ要素の部 分)は実験で求めたものであり、時定数Tは条件に応じ て変動するが、0.1~0.25 の範囲である. サーボモータ の速度制御系の特性(図中中段右)は、周波数応答測定 の結果,全軸共2次系で近似できた.図には第3軸のみ を詳述している. 操作量パターンの作成, 工具負荷制御 などの制御形態に応じて図示のようにロボットコントロ ーラの処理内容を切換える。図は内挿型可変速繰返し制 御の状態を示す.

工具負荷制御は PD 制御 (図中最上部 K_1, K_2 の定数 を含んだ部分) で目標回転速度に収束するように送り速 度を制御する.ただし、教示速度以上にならないように リミタ (図中最上部中央)を設けた.また、制御プログ ラムには、過大なバリにあたったときに急速に速度を下 げる処理を含んでいる.

内挿の基準となる操作量パターンは、ティーチングプ ログラムの教示速度を1として、0.2、0.4、0.6、0.8、 1.0 の5段階の速度に対し、繰返し制御を実行して作成 する.ここで、通常ロボットは、ワークのセッティング 等のため、必ずしも連続的に再生運転しない、したがっ て教示時、最後の命令実行後直ちに次の周期に入ったの では、生成される操作量の波形が不連続運転に対応でき ないものになる、そこで制御プログラムは、一連の教示 動作の最後に一定の停止期間を組み込み,連続,不連続 を問わず,毎回のスタート時の内部状態が同一(速度, 加速度は0)となるようにした.

前述したように、操作量パターンは10msのサーボサ ンプル周期に合わせてサーボモータの軸単位でメモリに 記憶する、操作量データはモータエンコーダの2バイト 符号付きパルス数とした。また、メモリデータには同期 用のパラメータとして2.3で述べたアルゴリズムを実現 するための、制御ブロック内での補間距離、補間の始点 や終点、ティーチング命令の種別等を識別する制御情報 部分、およびサンプル値作成時の動作速度を含んでおり、 6軸ロボットでは1サンプル週期あたり18バイトで構 成される、実験ロボットでは操作量パターンの記憶メモ リに2MバイトのRAMをあてがい、5段階の速度に 対して最大145秒の動作まで対応可能とした。

Fig.6にサーボサンプル周期毎に実行する位置ループ サーボ制御の、繰返し制御に関する部分の処理手順を示 す.工具負荷制御のための、工具回転速度センサ入力値 からの工具送り速度決定、ロボット軌道補間点の演算, さらにサーボモータ各軸の目標値を求める演算は、サー ボ処理の余裕時間に別のタスクで実行され、そこで算出 された各軸の目標値は、内挿用の制御速度および補間距 離のデータを付してこのサーボ制御処理に渡される.操 作量の内挿演算に先だっては、制御速度と補間距離から (2)~(4)式に代入するサンプル値を選択する必要があ る.この選択処理を少しでも速くするため、制御プログ ラムにはメモリ内の操作量パターンを指すポインタを設 けた.ポインタは、使用しない操作量パターンについて もサンプル周期毎に現在の軌道の補間位置に近いところ

Entry

- 5 -





日本ロボット学会誌 8巻4号

まで常に更新し、次回のサンプル値の選択がポインタの ところから始まるようにして、処理が短くなるようにし た.

4. 実験結果

4.1 基礎実験

繰返し制御の一つの問題は安定条件が厳しいことであ り、高次系の制御対象を、高周波成分を含む目標波形に 安定に追従させることは難しいとされている.実験ロボ ットの位置制御ループ系は Fig.5 に示すように3次以上 の系であるため、元来高周波帯域を補償しないと不安定 である.

そこで、実験ロボットの6軸の各々に高周波帯域のゲ イン補償をしないで、偏差の収束状況を調査した. Fig.7 に、第3軸の定速往復動作に対して各回毎の rms 偏差 を求めた結果を示す.例えば最高速度が500mm/s の動 作では 11 回の繰返しの後、基本サーボ系の応答に対し て 1/708 にまで減少し、その後は増加する.また最大偏 差も 10 回程の繰返しで、1000 パルス/rev のモータ軸エ ンコーダで2 パルス(0.032mm 相当)近くにまで減少 した.したがって、この時点で操作量波形の更新を中断 し、以後はフィードフォワード制御で補償すれば、安定 化補償をしなくても繰返し制御の効果を実用的に利用す ることができる.ここでは、このときの操作量波形を操 作量パターンとする.



Fig. 7 Control errors as a function of the number of repetitions

実機での内挿法の効果を確認するため、片道移動距離 00mm の往復動作に対して 200mm/s から 40mm/s ま

小林 勝

300mm の往復動作に対して 200mm/s から 40mm/s ま で、40mm/s 刻みの 5 段階の速度の操作量パターンを作 成後、200mm/s と 80mm/s の間で正弦波状に速度を変 化させ^(注3)、内挿法で操作量を与える状況を試みた. な お操作量パターン作成時の目標速度パターンは加減速度 0.1G の台形である. **Fig. 8**(a) に ωが 14.7 での実験 結果を示すが、ほとんど偏差が発生しない結果が得られ た. **Fig. 8**(b) に同一動作に対して補償をしない場合の 制御偏差の様子を示す.

ただしωが大きくなると、加速度が最大となる高速側 の変曲点付近に進み偏差が発生するようになる。例えば ωが 22 では 0.8mm の偏差が発生し、それ以上のωで は目立って大きくなる(注4).

4.2 可変速加工実験

実際のバリ取り作業は3次元であるが、まず Fig.9に

(注3) 正弦波状にしたことに特に意味はない.変化を滑らか にするためである。



Fig. 8 Effect of the variable-speed repetitive control

August, 1990



Fig. 9 Yest model

示すようなアルミニウム鋳物のテストモデルを使い,第 1軸,第3軸の二つの軸を制御して切削加工する実験を 試みた. 直線,円弧,直線の3つの教示点を結んだ加工 動作で,二つの軸を協調動作させる.基準教示速度100 mm/s,工具の目標回転速度17,300rpm,切り込み2.5 mmとし,切削加工に入ると負荷が増し,工具回転速度 が低下する状況を与えた.なお,実験時の位置ループゲ インは第1軸,第3軸共に13(単位1/秒)とした.

Fig. 10 に補償を行わない場合の実験結果を示す.第 1軸 5.4mm,第3軸4.9mm の最大偏差が存在し.湾 曲部分で最大2mm 近くの削り残しが発生している.一 方,**Fig. 11** は5段階の速度に対し、各々19回の繰返し で操作量パターンを作成した後、内挿法で操作量を補償

(注4) ωが大きくなった場合の偏差の発生は、制御系が3次 以上の高次系であるため、状態量偏差の影響が顕著になるため である.これは状態量のフィードフォワード制御によって改善 が可能である⁶.







日本ロボット学会誌 8巻4号

した結果を示す. 負荷により, 無負荷時 100mm/s あっ た送り速度が 65mm/s にまで下がったにも拘らず, 計 画軌道からのずれが 0.5mm 以下で仕上がっている. 一 時的に発生する偏差は, 円弧補間の最初の処理時間不足 が原因であり, 高速の CPU を使えば回避できる.

実際のワークに対して、この制御を適用した結果、厚 さ 1~2mm、高さ 2~5mm のバリのある自動車用アル ミニウム鋳物の場合、従来 のロボットの2倍以上速い 50~60mm/s の速度設定でも仕上げ寸法精度は -0.5~ 1.0mm 程度である.このテストモデルの実験結果から、 提案した内挿型可変速繰返し制御は、工具負荷制御バリ 取りロボットなどに適用すれば、精度の大幅な向上が実 現できる.

5.むすび

本論文では、これまで目標周期が離散的な値をとる場 合に応用が限られていた繰返し制御を、目標周期変化に 相当する速度が連続的に変化するロボットにも適用でき るようにするため、次の手法を採用した.

- (1) 予め教示速度を一定比率倍した複数の目標周期 について操作量パターンを形成する。
- (2) 連続的な速度変化には、これらの操作量パター ンから内挿演算してフィードフォワード制御で 補償する。







7 -

1990年8月

提案した手法を工具負荷制御バリ取りロボットに適用 し、次の結果を得た.

 切削抵抗に応じて送り速度を制御する場合でも, 各軸の制御偏差を0.5mm以下と十分小さく抑えることができる。

この結果, 能率に加えて精度に優れた鋳バリ取りロボットを実現することができた。

今後の課題として、次の点を更に検討していく.

- (a) 教示点のつなぎ部分で一時的に発生する偏差を 更に抑制する.
- (b) 目標パターンに高精度に追従するようになるため目標パターンが円滑でないところではロボットが振動し、仕上げ精度に影響する.円滑な目標パターンの生成法を導入する.

最後に, 日頃よりご指導いただいている東京大学鈴木 俊夫助教授に心から感謝の意を表します.

参考文献

- 内山, "試行による人工の手の高速運動パターンの生成", 計測自動制御学会論文集, Vol 14-6, pp 706-712, 1978.
- S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki, "Bettering operation of Robots by Learning", J. of Robotic Systems, Vol.1-2, pp. 123-140, 1984.
- 3) 美多,加藤,青木,"反復制御とロボットアームの軌道

制御への応用",計測自動制御学会論文集, Vol 21-11, pp. 1223-1230, 1985.

- T. Omata, S. Hara and M. Nakano, "Nonlinear Repetitive Control with Application to Trajectory Control of Manipulators", J. of Robotic Systems, Vol 4-5, pp. 631-652, 1987.
- S. Kawamura, F. Miyazaki and S. Arimoto, "Intelligent Control of Robot Motion Based on Learning Method", Proc. of the 1987 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Philadelphia, pp. 365-370, 1987.
- 小林,木村,渡辺,"目標周期変化に対応できる繰返し 制御とその応用",計測自動制御学会論文集,Vol 26-2, pp. 174-179, 1990.
- M. Matsunaga, T. Ioi, T. Osada and M. Endo, "High-Speed Adaptive Control and High-Performance Grinding Conditions for Deburring Robot", SME TECHNICAL PAPER, No.MR 85-829, pp. 5-1~5-16, 1985.
- A. Noda, T. Tanaka, Y. Watanabe, K. Nishine, Y. Yamamoto and S. Horiguchi, "Development of Sensor Controlled Robot for Deburring", Proc 15 th Int Symp Ind Rob 1985, Vol.1, pp. 207-214, 1985.
- H. Hirabayashi, S. Ohwada, I. Yoshida and M. Miki, "Force-Controlled Deburring Robots", ROBOTS 11 17 th International Symposium on Industrial Robots, pp. 19-1~19-12, 1987.
- 木村、田辺、小林、"工具負荷制御による鋳バリ取りロボ ットの高能率化", 鋳物, Vol 61-6, pp. 394-399, 1989.