切削加工トルクのインプロセス制御*

前田輝幸^{*1}, 松永信智^{*1}, 山田隆章^{*1}
笹岡俊雄^{*1}, 川路茂保^{*2}

In-Process Control of Cutting Torque in Drilling Process

Teruyuki MAEDA, Nobutomo MATSUNAGA, Takaaki YAMADA
Toshio SASAOKA and Shigeyasu KAWAJI

This paper concerns an in-process torque control system in drilling processes of machine tools. In drilling processes, it is necessary to increase the drilling speed without drill breakage. However, increase of the drilling speed often leads to breakage of the drill by the excessive torque arising from the undesirable conditions such as wear of the drill and the misadjustment of the feed rate of the drill. In order to overcome this problem, it is necessary to measure and control the cutting torque in real time. Our objective is to construct a system which can control the cutting torque irrespective of drill wear and the material of target workpieces. Paying attention to the characteristic that the cutting torque is almost proportional to the feed of the drill, a PID control system which varies the feed rate is constructed. From the experimental results, the proposed system can control the cutting torque and suppress the vibration of the cutting torque without breakage of the drill. Furthermore, some advantages of the torque control system are discussed.

Key Words: Machine Tool, Drilling, Tool Failure, Cutting Torque, In-Process, Torque Control

1. 緒言

近年の生産技術の発展に伴い、生産の高効率化・高付加価値化が要請されている。特に工作機械加工においては、加工精度の向上とともに加工時間の短縮が重要視されており、機械系の高剛性化および主軸・送りモータの高速化がはかられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これらの高剛性化・高速化は工作機械の重量や価格に直接影響するため容易ではなく、工作機械の性能を十分に引き出すという立場から切削という現象を把握した上で、制動的な観点からの考察も必要である。

現在の工作機械では、被削材や加工内容等に応じてあらかじめ設定した位置指令値や速度指令値をNC装置にプログラミングし、その指令に従いモータを制御しているものが多い。例えば、工作機械のなかで最も多用されているドリルによる穴あけ加工では、被削材の材質・ドリルの材質・ドリル径などを考慮してあらかじめ主軸回転速度および送り速度の指令値を設定して

いる。その設定値は、これまでの経験を基に試加工を行い、工具が破損しないように試行錯誤的に決定される場合が多い。さらに、指令速度の設定ミスや切り屑の排出不良などにより切削抵抗が急激に増大した場合でも工具が折損しないように、主軸回転速度および送り速度の指令値は安全係数を見積もって小さく設定されているため、加工効率の低下をきたしている。

加工時間短縮の観点から考えれば、指令速度を上げ、工具の折損トルク近辺での切削加工を行えばよいが、単に速度を上げただけでは工具摩耗の進行により加工時に工具にかかる切削抵抗が過大になり工具が折損する場合が生じ、加工に要する時間は短くても工具交換の時間を要するためにタクトタイムが長くなる。これに対して、加工時の負荷変動を計測し、負荷が急に過大となった場合に機械を停止させたり、摩耗などにより加工負荷が増大した場合に送り速度などの条件設定を変えるなど、適応制御型の工作機械に関する研究がなされており⁽³⁾⁽⁴⁾、実際の工作機械に適用した報告もある⁽⁵⁾。しかし、これらの報告では主軸モータの電流を計測することにより負荷変動を検出する手法が用いられ

* 原稿受付 1994年11月16日。

*¹ 正員、オムロン(株)熊本研究所(〒861-22 熊本県上益城郡益城町田原2081-17)。*² 熊本大学工学部(〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

ており、主軸モータの定格トルクに対し加工トルクが非常に小さい場合や主軸機構の途中に減速機がある場合、主軸機構のダイナミクスの影響が大きい場合などでは高精度な電流情報が得られず実用に適さない。この欠点に対して、工具にかかる力・トルクを直接計測し、インプロセスで切削トルクを制御することにより加工時の負荷変動に対応する手法が有効であると考えられる。実際に、加工力を計測してびびり振動や切り屑つまりなどの異常を判断したり、研削加工のインプロセス制御を行った報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾もあるが、具体的な制御系の構成法や加工結果、インプロセス制御による効果等を論じている研究は少ない。

本論文では、ドリルの切削トルクを直接計測しインプロセスで制御するトルク制御手法を提案する。まず第2章でドリル加工における切削条件とトルクの関係について述べ、切削トルクを制御するための手法について考察する。次に第3章で実験のために使用したドリル加工実験機について説明し、トルクのインプロセス制御系の構成を示し、そのアルゴリズム・設計法について論じる。第4章では、従来の加工手法である速度制御による切削加工と提案するトルク制御手法による加工結果を比較し、トルク制御の有効性を示す。最後に第5章でトルク制御によりもたらされる効果を実験データをもとに考察する。

2. ドリル加工における切削条件とトルクの関係

ドリル加工における切削トルクを制御するためには、切削条件とトルク関係を明確にすることが必要である。そこで、ドリル加工における切削トルクとそれに影響するパラメータの幾何学的関係を、図1に示す切削状態モデル⁽⁸⁾を用いて導く。

図1 ドリルの切削状態モデル

図1は、直径 D [mm]、先端角 α のドリルを用いて送り f [mm/rev] で切削を行ったときの模式図であり、ドリルが1回転するときにハッチングで示された部分を削り取るとしている。切削時にはドリルの切れ刃部が被削材を削り取る際の切削力によりトルクが生ずる。被削材の比切削抵抗を K [N/mm²] とし切削力が切れ

刃部の中央部に作用するとすると、ドリル1回転で生じるトルク τ_c は切削時の切り屑の断面積に比例し、

$$\tau_c = \left(\frac{D}{2} \times \frac{f}{2} \times K \right) \times \frac{D}{4} \times 2 \\ = k_c \cdot f \cdot D^2 \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad , \quad k_c = \frac{K}{8} \quad \dots\dots (1)$$

となる⁽⁸⁾。

ここで、文献(9)によると比切削抵抗 K の大きさは正味切り込み深さ h に依存し、 h が小さい場合に K が大きいことがわかる。また図1より h は送り f の間には

$$h = \frac{f}{2} \sin \frac{\alpha}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

なる1対1の関係があるため K は f に依存するといえる。しかし、通常切削する範囲内で送りの使用範囲が小さい場合は f の変化に対して K の変化が小さいため、 K が一定値と見なしても差し支えない。このとき、(1)式より、切削トルク τ_c は送り f に比例する。

一方、切削中には(1)式のトルク τ_c 以外にドリルと穴壁面との摩擦や排出不良の切り屑による摩擦等により発生するトルク τ_f が存在する。その摩擦は粘性抵抗成分であるとする、その大きさはドリルの回転速度に比例する。また、穴あけが進むに従いドリルと穴壁面との面積が大きくなるため、摩擦トルクの大きさは穴の深さに比例すると考えられる。よって、摩擦トルク τ_f は

$$\tau_f = k_f \cdot N \cdot d \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表すことができる。ここで、 N がドリル回転速度、 d は切削した穴の深さであり、 k_f はドリルと被削材との摩擦係数である。

以上より、ドリル切削時の切削トルクは

$$\tau = \tau_c + \tau_f \\ = k_c \cdot f \cdot D^2 + k_f \cdot N \cdot d \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表すことができ、使用するドリル径、回転速度、送り等の切削条件によって決定される。したがって切削トルクの制御は、切削条件の回転速度、送りを変えることにより実現できることがわかる。ただし、切削時には摩擦によるトルク τ_f は切削抵抗によるトルク τ_c に比べて十分小さいと考えられるため、

$$\tau \approx k_c \cdot f \cdot D^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

と近似し、送りにより切削トルクを制御する。

ここで、従来の切削加工における推奨条件について考察する。従来の推奨送りは、ドリルがねじり破壊を

図2 ドリル加工実験システム

おこすトルク τ_{max} を生じるときの限界送り f_{max} に対し約 1/8 ～ 1/12 程度に設定されている⁽⁸⁾。この場合、ある被削材 A の推奨条件下における切削トルクは、(5) 式の関係より

$$\begin{aligned}\tau &\approx k_A \cdot f \cdot D^2, \quad k_A = \frac{K_A}{8} \\ &= k_A \cdot \frac{f_{max}}{S} \cdot D^2 \\ &= k_A \cdot \frac{\tau_{max}}{k_A \cdot D^2} \cdot \frac{1}{S} \cdot D^2 \\ &= \frac{\tau_{max}}{S} \dots\dots\dots (6)\end{aligned}$$

となり一定となる。ここで、 K_A は被削材 A の比切削抵抗、 S が安全係数であり通常 8 ～ 12 の値である。

以上の結果から、従来のように推奨切削条件を基に回転速度や送りを設定することは、定常的にトルク一定の穴あけを行うことに相当することがわかる。したがって、トルクを制御するコントローラを構成することは、堅い材質では送りを遅く、柔らかい材質では送りが速いというように自動的に各被削材の推奨送りで加工することができるインテリジェントなコントローラを構築するための第一ステップとして意義がある。

3. 切削トルクのインプロセス制御システム

3.1 ドリル加工実験システムの構成 本論文で提案するトルク制御手法の有効性を示し、さらに従来のドリル加工手法との比較を行うために、図2に示す実験システムを作製した。

本実験システムは、横型のボール盤であり、ACサーボモータ（(株)安川電機製 400[W]）により直接駆動される主軸機構と、ACサーボモータ（(株)安川電機製 200[W]）およびボールネジ（リード 10[mm]）により駆

動される送り機構を有する。それぞれのモータ回転速度はパソコンからDAボードを介して指令できる。

被削材にかかるトルクおよびスラスト荷重のインプロセス計測用として、切削動力計（(株)佐藤マシナリー製：定格トルク 15[kgf·cm]、スラスト 25[kgf]）を用いている。切削動力計にはチャックが付いており被削材を保持できるようになっている。センサにより計測されたデータは、4次アナログ低域フィルタでノイズを除去した後、12bit ADボードにてパソコンに取り込まれる。また、モータの回転角をエンコーダで計測し、24bit カウンタボードにて取り込んだ後、角度の差分によりドリルの回転速度および送り速度を求めている。

切削トルクをインプロセスでフィードバックするためには、一定サンプリング間隔でトルクを計測し、その計測トルクをもとに制御アルゴリズムを実時間で計算する必要があるが、ここではマルチタスク型のリアルタイム制御用モニタ MRCOS（Multi-task Real-time Control Operating System）⁽¹⁰⁾を使用し制御を行っている。

3.2 トルクのインプロセス制御系 (5)式で示したように、ドリル加工における切削トルクと送りの関係は静的には比例関係にあると見なせるため、切削トルクを制御するために、制御対象を出力が送り f ・出力が τ である 1 入出力系として制御系を構成する。ここで、ドリルの送りは主軸回転速度 N [rpm] とドリル送り速度 F [mm/min] を用いて

$$f = \frac{F}{N} \dots\dots\dots (7)$$

のように表わされるので、送り f を変えるためには主軸回転速度 N またはドリル送り速度 F を変えればよい。しかし、加工中に主軸回転速度を変えると、切り屑の排出を妨げたりドリルの刃に急激な力をかけたり

図3 切削トルクのインプロセス制御系

する恐れがあるため、主軸回転速度 N は一定としドリル送り速度 F を変えることにより制御を行う方が望ましい。

図2の実験システムにおいて F を制御する場合、ドリルの送り機構にボールネジを用いているために、計算機から出力される送り速度指令から実際のドリル送り速度までの間には送り機構のダイナミクスが存在する。また、加工中には主軸系と送り系の相互干渉および被削材との間のトルク・スラストによる影響などがあるために、切削トルクを動的に制御するためにはドリル加工システム全体系のダイナミクスを考慮しなければならない。しかし、厳密なモデルを解析的に求めることは困難であるため、加工中において送り速度指令 F_r と切削トルク τ に関して

$$\tau = G(z) \cdot F_r \quad \dots\dots\dots (8)$$

なる線形関係があると仮定し、実験により伝達関数 $G(z)$ を求め制御系を設計する。制御系としては、産業界で多く用いられ有効な手法であるPID制御系⁽¹¹⁾を構成する。

構成したトルク制御系のブロック図を図3に示す。図中のPID制御部は、1サンプリング毎に計算されるが、その計算式は次のように記述される。制御開始から k サンプル目におけるドリル送り速度指令 $F_r(k)$ は、切削トルクと目標値の偏差 $\tau_e(k)$ およびその差分値・加算値を求め、それぞれの値に対してゲインを掛け合わせるにより

$$F_r(k) = F_{r0} + K_p \cdot \tau_e(k) + K_d \cdot \Delta\tau_e(k) + K_i \sum_{i=1}^k \tau_e(i) \quad (9)$$

$$\Delta\tau_e(k) = \tau_e(k) - \tau_e(k-1)$$

と求まる。ここで、 K_p , K_d , K_i はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲイン、積分ゲインである。また、 F_{r0} はあらかじめ設定した基本送り量であり、従来手法における推奨送り速度に設定することとする。

(9) 式より、切削トルクが目標値より大きい場合には送りが小さくなり、目標値より小さい場合には送りが大きくなる。また微分により応答を良くし、積分により外乱存在下での目標値への追従性を向上させている。ただし、ドリルが被削材に達するまでは切削トルクは生じないため、(9) 式の計算を行うのは切削時のみとし、非切削時は一定速度により送りを行う。

ここで、トルク制御系の概念を従来の制御系と比較することにより明らかにする。従来の制御系は、図4(a)に示すようにドリルや被削材の情報をもとに主軸・送りの目標値を設定し、速度制御の結果切削トルクが生じる。よって、切削トルクという観点では開ループ構造となっており、チッピングなど不慮の状態や経年変化に対する頑強性がなく、ドリル折損が起こる。これに対しトルク制御系の構成を図4(b)に示す。この場合、切削トルクの閉ループ制御を実時間でを行うことで、不慮の状態やドリル摩耗などの経年変化、被削材などの変化に対しても対応できる制御系となる。なお、従来の適応的な制御⁽³⁾⁽⁴⁾では、切削トルクと送りの静的な関係に着目しており、平均切削トルクを主軸モータ電流により推定し、推定値がしきい値より大きくなると送りを小さくするといった加工条件のオフライン変更が行われている。

図4 工作機械の制御系の構成

4. ドリル加工実験

4.1 従来制御によるドリル加工 前述のように、従来の方式はあらかじめ設定した一定の主軸回転速度・送り速度で加工を行う速度制御である。図5に新品および摩耗ドリルを用いて速度制御を行った場合の切削動力計トルク波形を示す。切削条件は

被削材：S45C

ドリル径：φ2 HSS ストレートドリル

ドリル回転速度：62.8 [rad/s] (1200 [rpm])

送り：0.05 [mm/rev]

穴深さ：止まり穴 6[mm]

であり、乾式切削とした。なお、計測トルクはA/Dコンバータに入力する前にカットオフ周波数 50[Hz] の4次低域フィルタにて処理し、2[msec] 毎に計測している。計測データはオフラインで25ポイントの移動平均処理を施している。

図5において、実線は新品ドリル使用時のトルク波形を、点線は摩耗ドリルの場合を示す。なお、穴深さと切削トルクとの関係を明確にするために横軸を穴深さとしている。原点は被削材の表面であり、穴が深くなる方向を正としている。新品ドリルによる切削結果は、ドリルの切れ刃部が被削材に入ってしまう位置(約1[mm])までは緩やかにトルクが上昇し、その後ほぼ一定になることを示している。しかし、穴壁面とドリルとの摩擦などがあるために、穴が深くなるに従いトル

クは上昇傾向となる。一方、摩耗したドリルで加工した場合は、ドリルの切れ味が悪くなっているために全体的に切削トルクが大きくなり、切削中のトルク変動も大きくなっている。また、穴が深くなるにつれトルクの変動分が非常に大きくなる傾向がある。

通常の穴加工では、ドリルの折損トルクに対して十分小さな切削トルクとなるように、安全を考慮した送り速度に設定するため、摩耗によりトルクが上昇した場合でもドリルが折損することは少ないが、タクトタイムを上げるために安全係数を低く見積もった場合、摩耗により折損頻度が高くなることが予想される。

図5 速度制御によるドリル加工時の切削トルク

4.2 トルク制御によるドリル加工 3.2節で述べたように、送り速度指令 F_r と切削トルク τ が線形関係であると仮定し伝達関数を求め、トルク制御系を設計する。図6に送り指令をステップ状に変化させたときのトルク応答波形を示す。同図の4～9[s]における送り速度指令 F_r に対する切削トルク τ の伝達関数を離散一次遅れ系で同定すると

$$\tau = \frac{0.090}{z - 0.911} \cdot F_r \quad (10)$$

と得られる。図6(b)に同定結果を重ねて表示すると、低周波域での特性は非常によく同定されているが、切削トルクの変動分が存在することがわかる。切削トルクのパワースペクトルを調べると、特にドリルの回転周波数成分にあたる約20[Hz]でのピークが大きいことがわかる(図7)。これは、切り屑の生成・破断の繰り返しにより変動する接触抵抗分や、ドリルの偏心により生じるトルク変動であると考えられる。

本論文では(10)式の伝達関数を基に(9)式のPIDゲインを計算し、さらに穴あけ結果をみてドリル回転周波数でのトルク変動分が小さくなるようにゲインの微

微調整を行うことにした。なお細径ドリルの場合、送りによるスラスト力変動で折損する可能性もあり、ゲイン調整には注意が必要である。

(a): 送り速度指令

(b): 切削トルク応答

図6 指令変化に対するトルク応答

図7 切削時のトルクパワースペクトル

図8に、トルクのインプロセス制御によりドリル加工した場合のトルク波形を示す。トルクの目標値についてはステップ状に設定すると穴あけ開始時にドリルの送りが過大となり座屈によりドリルを破損する危険性がある。そこで、ドリルの切れ刃部が被削材に入ってしまう1[mm]の深さまでは穴深さに比例して目標値を大きくし、それより深い位置では一定値とした。一定

目標値の大きさは速度制御時の1[mm]の深さにおける切削トルクをもとに0.12[N·m] (1.2[kgf·cm])と設定している。切削条件は送りを除いて前節の速度制御と同じの条件とし、図5の実験での摩耗ドリルを使用して加工している。図8より明らかなように切削トルクは目標値に極めて精確に追従しており、摩耗ドリルにもかかわらず切削トルクの変動が小さく抑えられている。穴深さが、1~6[mm]間での切削トルクの標準偏差と比較すると、摩耗ドリル使用時に図5で0.025[N·m]、図8で0.013[N·m]となっており、トルク制御により切削トルクの変動を約50%に抑えることができた。

図8 トルク制御によるドリル加工時の切削トルク

図9に速度制御とトルク制御におけるドリルの送り速度を比較した結果を示す。トルク制御においては、切削トルクの上昇を抑えるために穴が深くなるにつれて送り速度が遅くなっているのがわかる。なお、ドリルの回転数を上げるとトルク変動の周波数が高くなるため、PID制御系のゲインの再設計が必要になる。また、より速いドリル回転速度でのトルク変動を制御するためには、高い応答周波数の送り機構が必要となる。

図9 速度制御とトルク制御における送り速度の比較

5. トルク制御の効果

前章において、本論文で提案したトルク制御によりドリル加工を行うと切削トルクを目標値に追従させることができ、トルク変動が小さく抑えられることを示したが、この他にトルク制御により加工の高速化、摩耗ドリル使用時の加工性向上、積層状ワークの加工性向上などの効果が期待できる。そこで本章ではこれらの効果の検証実験を行った結果について述べる。

5.1 加工の高速化 従来の加工では、穴が深くなるに従い切削トルクが大きくなるが、加工中に過大トルクによってドリルが折損することがないように安全を考慮して条件設定されている。したがって、トルク制御の場合に従来制御のピークトルク値での切削を行ってもドリル折損することはない。

そこで、従来加工のピークトルク値付近に目標値を設定してトルク制御による加工をおこなうことにより、切削トルクは従来制御と同程度で、タクトタイムが短縮できるかどうかの検証を行う。穴が浅い位置では切削トルクを上げることにより従来より高速な加工ができ、穴が深い位置での切削トルクは従来と同等の大きさに抑えることができると予想される。

両手法による加工結果例を図 10 に示す。深さ 0～6[mm] 間の穴あけに要した時間は速度制御時は 6.9[s]、トルク制御時には 6.2[s] であり、トルク制御により約 10 % の高速化が実現できた。

図 10 トルク制御による高速加工結果

5.2 摩耗ドリル使用時の加工性向上 速度制御ではドリルが摩耗してくるに従いドリルの切れが悪くなり、切削トルクが増大する傾向があることは 4 章で明らかにした。さらに摩耗がすすむと急激なピークトルクを示しドリル折損を引き起こす可能性がある。これに対

し、トルク制御の場合摩耗ドリル使用時においても切削トルクを抑えながら加工ができるかどうかの検証を行う。

4.1 節の切削条件で 100 回の穴あけにより摩耗したドリルを使用した場合の速度およびトルク制御の加工結果を図 11 に示す。速度制御では 7[s] 付近で 0.1[N·m] 以上のピークトルクがでていますが、トルク制御ではピークトルクを 0.01[N·m] 程度に抑えて加工が行われていることがわかる。

図 11 摩耗ドリル使用時の穴あけ結果比較

なお、トルク制御では摩耗の進行にともないトルクを抑えるために送り速度が遅くなっていくため、加工に要する時間が徐々に長くなることに注意する。加工時間を計測することによりドリルの摩耗が定性的に判断できるが、ここではその具体的方法は省略する。

5.3 積層状ワークの加工性向上 被削材の種類が途中で変わるような積層状のワークに対し穴あけ加工を考える。例えば SUS とアルミを切削する場合、従来制御では通常どちらかの切削条件により穴あけを行うが、アルミの条件に設定すると送り速度が大きいため SUS の切削トルクが過大になり、SUS の条件に設定するとアルミの切削に時間がかかるなどの問題があり、速度指令の設定にノウハウが必要になる。一方、被削材が変わることを考慮して加工中に切削条件を変えるのは煩雑であり実用的ではない。

実際に、積層状ワークとして厚さ 3[mm] の A5052 と SUS304 を重ね合わせて速度制御およびトルク制御により穴あけを行った結果を示す。図 12(a) は A5052 から SUS304 への穴あけであり、同図 (b) は SUS304 から A5052 への穴あけである。(a), (b) どちらの図においても速度制御での加工では SUS の加工時に大きな切削トルクが生じているのがわかる。

一方、トルク制御により穴あけを行った結果が同図に重ねて表示されている。ここで、トルク目標値は推奨切削条件から計算し、SUS304 も A5052 もほぼ同じであったので、被削材によらず 0.1 [N・m] とした。切削トルクを目標値どおりに制御できており過大トルクは生じないことがわかる。被削材の境界で多少トルクの変動がみられるものの、約 0.5[s] で整定している。この整定遅れは、被削材の境界でのドリル送り速度指令の変化に対し実送り速度が追従するまで遅れが生じていることが原因であると考えられる。

(a): A5052 → SUS304 (柔らかい→堅い)

(b): SUS304 → A5052 (堅い→柔らかい)

図 12 積層状ワークの穴あけ結果

6. 結言

本論文では、切削トルクをインプロセスで制御する工作機械のトルク制御手法を提案した。本制御による加工では、計測した切削トルクを目標値と比較してドリルの送りを制御することにより、切削トルクを目標値どおりに制御でき、トルク変動を従来手法よりも小さく抑えることができる。

実際にドリル加工実験により従来制御結果と比較し、

本制御系の有効性を示した。トルク制御により、(1) トルク制御により高速加工が実現できる、(2) 摩耗ドリルを使用しても切削トルクが過大にならずドリル折損防止ができる、(3) 積層状ワークで被削材に応じた加工ができるといった効果が得られることが実験により明らかになった。

本制御系では、不慮の事故によりドリルが加工中に折れると適切な切削トルク情報が得られず、最悪の場合トルク情報が0になり無理にドリルの送りを速くするような制御が行われる可能性がある。したがって、実用を考えた場合に何らかの原因でトルクが急激に変化した場合や、トルクが目標値通りに制御できない場合などをトルクの偏差の大小などにより判定し、機械を停止するような保護機能が必要である。

提案したトルク制御では、切削トルク変動が小さいため、従来よりもドリル摩耗が少なくドリル寿命がのびる、穴加工面の粗さが小さいなどの新しい効果も期待できその検証を現在行っているが、他の機会に発表予定である。また、本トルク制御はドリル加工のみでなく他の加工にも応用できる可能性もあり、今後さらに検討していく予定である。

文 献

- (1) 特集：加工技術レベルアップへの最近の展開，機械と工具，37-11，(1993)
- (2) 大平，工作機械の高速・高精度化，機誌，97-911，859.
- (3) M.A.Mannam, et al., Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements, CIRP Ann., 38-1, (1989), 347.
- (4) J.L.Stein, Analysis of Power Monitoring on AC Induction Spindle Systems, ASME PED, 23, (1986), 19.
- (5) 特集：NC 工作機械におけるセンシング事例集，機械と工具，37-2，(1993)
- (6) 特集：インプロセス計測の現状，応用機械工学，32-7，(1991)
- (7) Y.Hatamura, et al., Development of a Force Controlled Automatic Grinding System for Actual NC Machining Centers, CIRP Ann., 38-1, (1989), 19.
- (8) 穴加工用工具のすべて，(1991)，大河出版
- (9) 機械実用便覧改訂第6版，(1990)，日本機械学会
- (10) 川路他，パーソナルコンピュータによる実時間制御用システムの設計，熊本大学工学部研究報告，37-2，(1988)，175.
- (11) 須田他，PID制御，(1992)，朝倉書店