

切削抵抗を自動制御できる工作機械の試作開発 —磨きレス加工が可能な金型用CCM加工システムの開発研究(第2報)—

大塚裕俊*・垣野義昭**・大坪 寿***・中川元彦****

*生産技術部・**京都大学工学部・***安田工業(株)・****(株)戸高製作所

Development of Integrated CCM System by Intelligent Machining Center for Manufacturing Dies and Molds with Fine Surfaces (2nd Report)

Hirotooshi OHTSUKA*・Yoshiaki KAKINO**・Hisashi OHTSUBO***・Motohiko NAKAGAWA****

*Production Engineering Division・**Kyoto University・***Yasuda Precision Tools K.K.・****Todaka Corporation

要旨

切削抵抗の予測・制御技術と、応答性が高く高速で外乱に敏感なリニアモータの特性を利用した切削抵抗のモニタリング技術、および工作機械の高精度制御技術とを組み合わせることにより、工具の送り速度など加工条件のフィードバック制御を行い、切削抵抗を自動的に一定化できる新しい工作機械(マシニングセンタ)を試作開発した。また高機能CAMによって作成された加工データ(フィードフォワード制御)との相乗効果により、金型加工における切削抵抗を適切に制御することが可能となり、安定した高精度加工が可能となった。リニアモータ駆動による試作機を用いた実験結果によれば、金型仕上げ面の品質の向上、工具損傷の防止、工具寿命の増大が確認された。

1. はじめに

金型製造などものづくりの現場においては、中国等への技術移転により産業の空洞化が生じている。これに対応するために我が国では金型製作における高精度化、低コスト化による製作時間短縮が求められている。

これまで我が国の金型加工技術に関する技術開発は、難削性材料を高能率・高品位に切削加工するための技術を中心にCAM(C)、CNC制御装置(C)、工作機械(M)をはじめ、工具、ツーリング、被削材料などの分野で個別に研究開発が進んできた。しかし、これらの関連技術が個々にしかも急速に進化するために、これらを組み合わせて用いる際の総合的な加工技術の確立はいまだ進んでいない。そこで本研究開発では、切削加工時の切削抵抗に基づいて、以上のような合理的な加工条件の適正化を行えるシステム開発を行おうとするものである。

これまでの既存の金型加工システムは、精通し熟練した作業員しか有効に活用できない面が多く、その合理化は、実験データの体系化(データベース構築)といった定型的アプローチに限られていた。これに対し本研究開発の目標は、それによらない高機能化・知能化によるCCM加工システムを開発するものである。これによれば、大規模なデータベースを必要とせずに、熟練していない作業員によっても金型加工が十分可能になり、かつ

高能率・高信頼性で長い工具寿命が確保でき、高精度加工が実現する。本研究開発の目標であるCCM加工システムにより実現されるべき主要な機能は以下のとおりである。

(1) フィードフォワード制御/高機能化

高機能化・知能化による本CCM加工システムによって、CAM側からは加工形状、工具形状に応じた切削抵抗を制御する最適工具パスをもつNCデータが出力され指令される。

(2) フィードバック制御/知能化

実際の切削では、ワーク硬さのばらつきや工具種類・工具摩耗の状況などの変動要因があるため、従来の「一方通行型」システムとは異なり、リニアサーボモータの電流値などを用いて静的な切削抵抗や加工状態をモニタリングし、実加工中に切削抵抗に応じて送り速度など加工条件を最適に制御する適応制御機能を付加する。本研究ではその制御機能の安定性の確保について製品化のため確実なものとなるよう研究を行う。開発された加工システムにおいては、CAM、CNC制御装置、工作機械は下位システムは上位システムの指令を状況に応じて変更できる機能を有する。

本システムの概念を従来のシステムと比較して Fig.1 に示す。

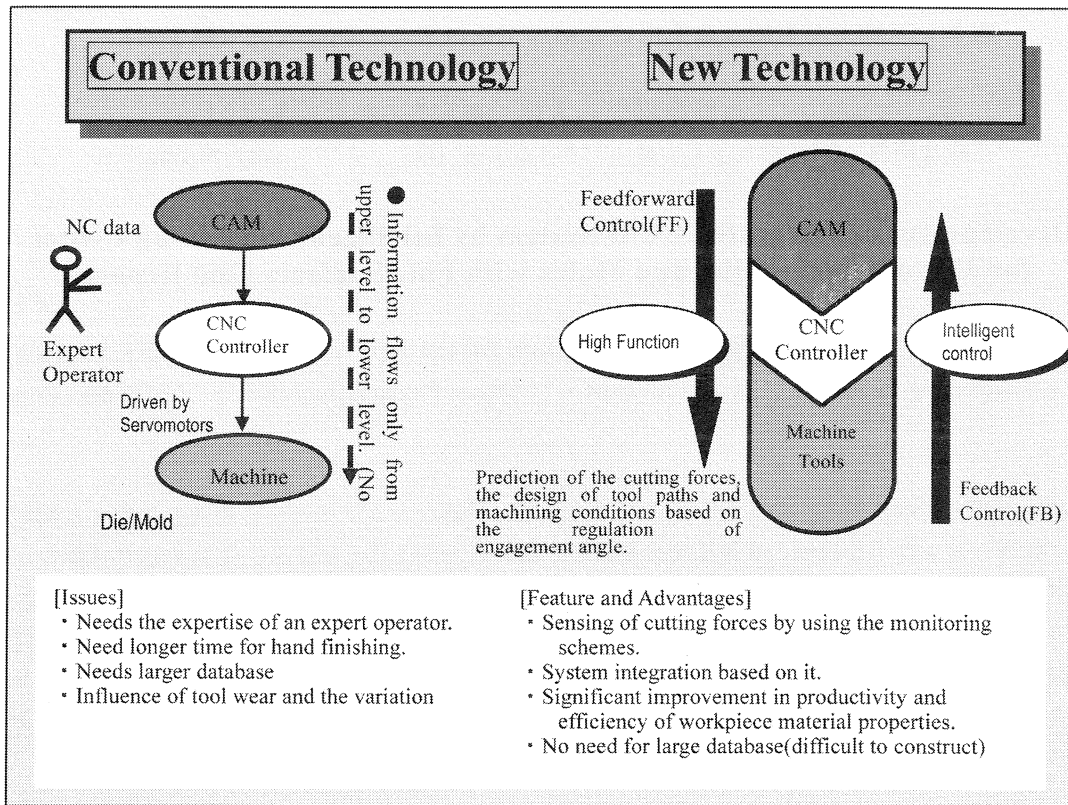


Fig.1 Overview of the CCM technology and conventional technology

2. フィードフォワード制御による高機能化

要素技術のうちフィードフォワード制御（以下 F F 制御）については、切削抵抗の予測式より切削抵抗が一定値となるような指令送り速度と工具パスを与える高機能 CAM の開発が、粗加工パスを対象としてほぼ終了したので、本年度は仕上げ加工について検討した。

ボールエンドミルによる金型の仕上げ加工は通常一定の取代（約 0.1mm）を一定の送り速度で等高線加工を用いて行われる事が多い。この場合には、ボールエンドミルに発生する切削抵抗は全体として 20N 以下であるが、その大きさは加工形状によって大きく変動し、これが工具の倒れの変動をもたらし、結果的に金型の加工精度を低下させている。

そこで中仕上げにおいて、加工形状に応じて仕上用の取代を変化させて加工し、仕上げ切削において切削抵抗が一定になるように工夫し、加工精度の向上を図ることとした。本手法をテーパ付花卉金型の仕上げ切削に適用した結果を Fig.2 と Fig.3 に示す。この結果により、切削関与角を一定にした仕上げ代を創生する加工法についての検証実験によりその有効性が確認できた。これらにより切削抵抗という観点からの F F 制御手法の研究開発はほぼ達成された。

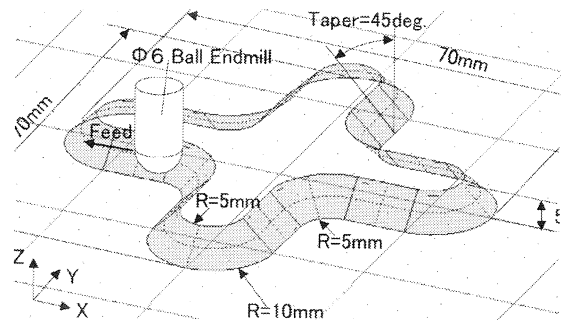


Fig.2 Tapered petal-shaped mold

凹部 4 ヶ所での急峻な切削抵抗増大が低減されている

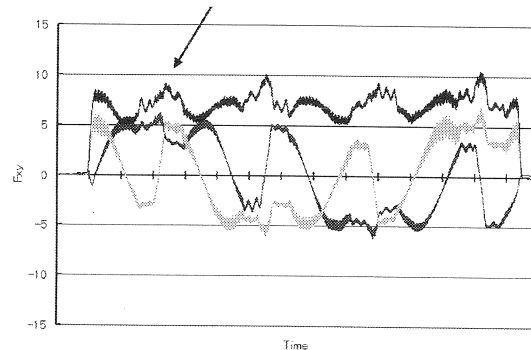


Fig.3 Measured cutting forces in end milling the tapered petal-shaped mold

3. フィードバック制御による知能化

要素技術のうちフィードバック制御（以下FB制御）については、切削加工中の切削抵抗の検出について、リニアモータ電流値による切削抵抗のモニタリング技術とFB制御技術、加工中のエンドミル切削抵抗成分の検出法の開発を行ったうえで、切削抵抗の制御法について（a）オーバーライド制御法（b）反比例制御法（c）2次多項式モデル制御法の3手法を比較検討し、検証実験のうえ2次多項式モデル制御法の優位性を確認してこれを採用した。

この手法では、切削抵抗の2次多項式予測モデルを用いて、モニタリングされた切削抵抗値に対応する指令送り速度 f を刻々と与え、標準の切削抵抗値となるようFB制御を行う。具体的には、モニタリングされた切削抵抗値から、切削幾何条件を利用して設定された切削抵抗の目標値（XY平面内の合力）となるよう、適正な加工条件（送り速度）を探索してリアルタイムで与える制御法である。制御の安定性、収束性とも他の手法に比べて優れていることがわかった。（Fig.4 と Fig.5 に検証実験結果の一例を示す。）

4. 工具寿命に対する効果

正常な加工においても工具磨耗は常に進展するので、切削抵抗を初期値（新品時）のまま一定に保って加工を行うと、適正值よりも送り速度が小さくなり、加工能率が低下してしまうという問題がある。よって適正な磨耗の進行は許容せざるを得ないので、加工能率を確保するためには、モニタリングされた切削抵抗より予測された工具磨耗量に応じて目標切削抵抗を一定化ないし増大させてゆくという方法が考えられる。これについて今回は目標切削抵抗をある一定値（初期値の30%増）として、どの程度寿命が延びるか切削抵抗の制御を行わない場合との比較実験を行った。Fig.6 に示すように被削材をエンドミルで周回させて工具寿命試験を行った。実験結果については Fig.7 に示す。切削抵抗の制御は開発されたCCM加工機による自動制御によるものである。切削距離は192mから264mに30%延びたが、加工時間は30%増加した。よってCCM加工機の機能により、加工効率の低下が許容できる範囲で工具寿命の伸長が可能となることがわかった。

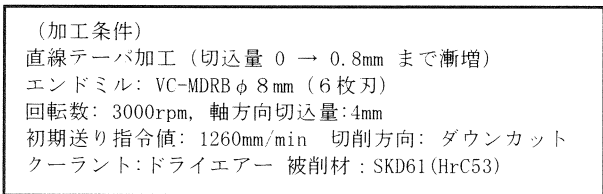


Fig.4 Cutting test for the function of feed back control

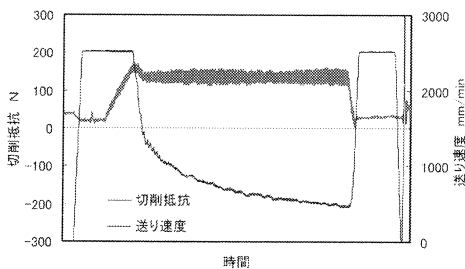


Fig.5 Measured cutting force and feed rate in Fig.4

が低下してしまうという問題がある。よって適正な磨耗の進行は許容せざるを得ないので、加工能率を確保するためには、モニタリングされた切削抵抗より予測された工具磨耗量に応じて目標切削抵抗を一定化ないし増大させてゆくという方法が考えられる。これについて今回は目標切削抵抗をある一定値（初期値の30%増）として、どの程度寿命が延びるか切削抵抗の制御を行わない場合との比較実験を行った。Fig.6 に示すように被削材をエンドミルで周回させて工具寿命試験を行った。実験結果については Fig.7 に示す。切削抵抗の制御は開発されたCCM加工機による自動制御によるものである。切削距離は192mから264mに30%延びたが、加工時間は30%増加した。よってCCM加工機の機能により、加工効率の低下が許容できる範囲で工具寿命の伸長が可能となることがわかった。

5. 試作機の設計と製作

前節までの成果を取り込み、リニアモータ駆動CCM加工システムの基本仕様を決定したうえで加工機の設計・製作を行った。とりわけ切削抵抗の制御機能につい

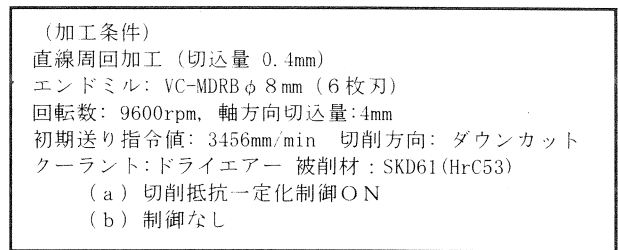


Fig.6 Tool life experiment using feed back control

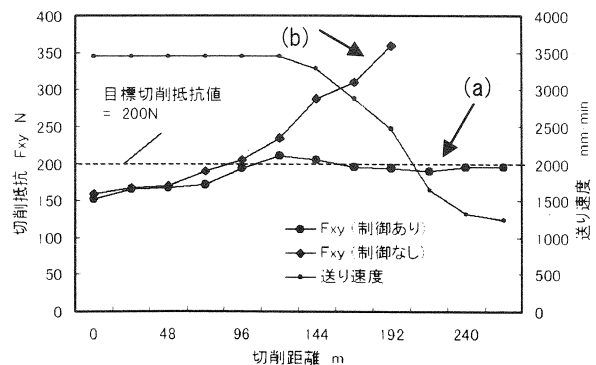


Fig.7 Measured cutting force and feed rate in Fig.6

ては、前章で説明したアプリケーションソフト開発を行ってNC制御装置にインストールし、これを利用した。そして完成した加工機を日本国際工作機械見本市(JIMTOF2004：平成16年11月1日(月)～8日(月)於東京ビックサイト)に出品展示した。展示風景や出品された試作機について Fig.8 と Fig.9 に示す。

6. 金型加工による評価

開発されたシステムの機能評価のため、機能評価用の金型モデルを決定し、従来型と開発型の新旧のハード(工作機械)とソフト(CAM)の組合せを変えた機能評価プランを作成し、既設システムと新システムによる加工評価実験を実施した。

機能評価用の金型モデルとしてモデルA, B, Cその他を決定したうえで、ハード(工作機械)として従来型のボールねじ駆動のテーブルをもつマシニングセンタ(YBM850V, YBM950V)と今回開発されたCCM試作機を利用して加工実験を行った。CCM試作機は開発されたアプリケーション(カスタマーズボードに搭載)により、実切削中の送り速度を自動的に変更して切削抵抗をコントロールする機能を選択することが出来る。またソ



Fig.8 JIMTOF2004(trade fair in Tokyo)

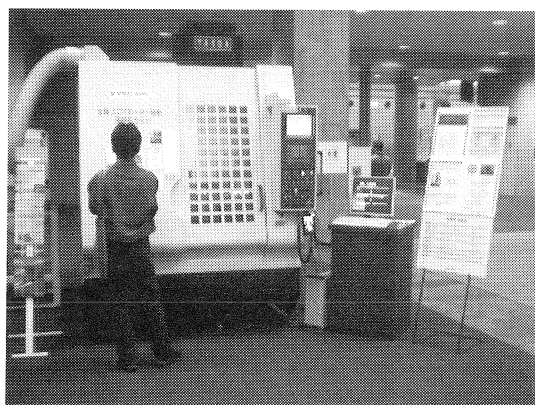


Fig.9 Developed CCM machine tool model

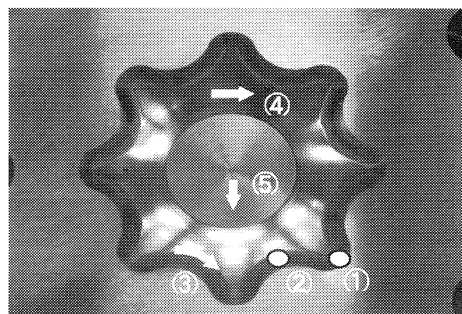
フト(CAMによる)として、通常の送り速度一定の工具パスと、高機能CAMのFF制御によりパス毎に送り速度を変えた工具パスを用いた。

6.1 高機能CAMによる効果

高機能CAMにより、切削抵抗が一定になるよう送り速度を各工具パス毎に変化させたNCデータを与えて、金型粗加工について高機能CAMによるFF制御機能の有効性を確認する実験を実施したところ、急激な切削抵抗の変化をなくすことで工具の折損を防止し、また工具の寿命を延ばす効果があることを確認できた(工作機械は従来型機)。

6.2 金型の表面粗さ・表面品位

開発されたCCM試作機により、花卉型金型の粗加工から仕上げ加工までを行って従来機と比較したところ、CCM試作機の方が金型仕上げ面の面粗さがかなり良くなる結果となった。これは静圧案内によるテーブル構造をもち内部の機械的な摩擦が小さく、比較的大きな加減速にもなめらかに追従できるリニアモータ駆動のCCM試作機のテーブル運動特性と関係していると考えられる(カスタマーズボード未使用)。すなわちCCM試作機のハード的な特性(運動性能)に基づく仕上げ加工での表面粗さ・表面品位等の金型品質向上が検証できた。以上について花卉型金型の仕上げ加工を行って、表面粗さを比較測定した結果を Fig.10 と Table 1 に示す。



(仕上げ加工条件)
 エンドミル: R2 ボールエンドミル (2枚刃)
 回転数: 20000rpm, 軸方向切込量: 0.1mm
 初期送り指令値: 1800mm/min 切削方向: ダウンカット
 クラント: ドライエアー 被削材: SKD61 (HrC53)

Fig.10 Finished surface of mold type C

Table 1 Measured surface roughness

Ry(μm)	①	②	③	④	⑤
CCM model	1.16	0.90	1.83	1.19	1.61
conventional	3.46	3.29	6.58	1.42	1.21

6.3 工具寿命に対する効果

FF制御に加えてFB制御を行った結果、通常切削抵抗の小さくなる箇所での送り速度の上昇および通常切削抵抗が大きくなる箇所（コーナー部）での送り速度の低下について、FB制御のみなど他ケースに比較して追従性・応答性の面でかなり改善しており、それに伴い切削抵抗も上限下限の幅が狭くなっており、工具寿命の延長や工具折損の防止にとつての有効性が期待できる結果となった。

またFF制御に加えてFB制御を行って工具寿命試験を行った結果、加工時間や切削抵抗の変化、工具刃先の状況から検討して、工具寿命に関してはFB制御+FF制御が最も有効であると判断できる。すなわち高機能CAMによるFF制御とハードのFB制御の相乗効果による粗加工における工具折損の防止、工具寿命の増大等の効果が検証できた。

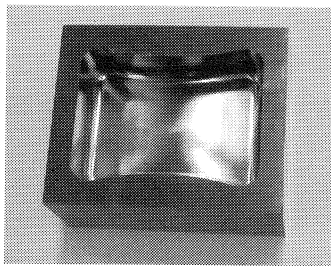


Fig.11 Mold type A

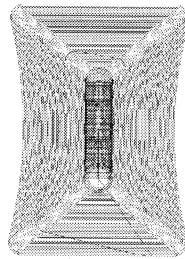


Fig.12 Tool path for rough cutting

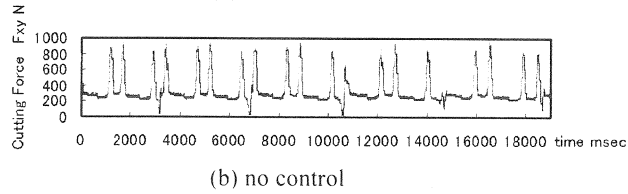
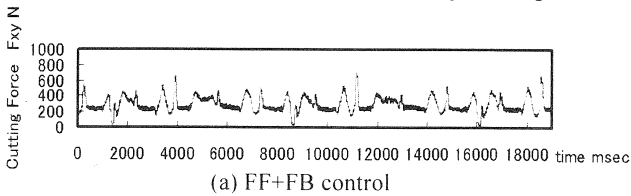


Fig.13 Measured cutting forces

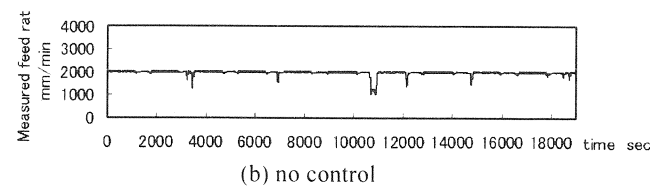
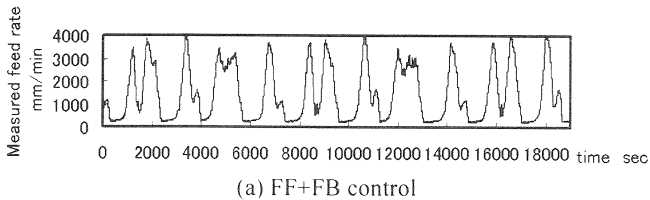


Fig.14 Measured feed rates

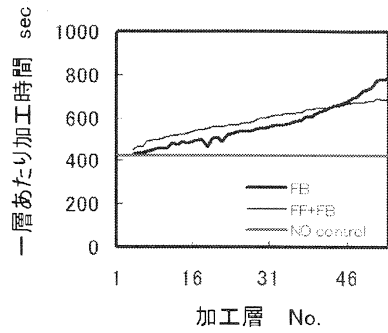


Fig.15 Measured cutting time

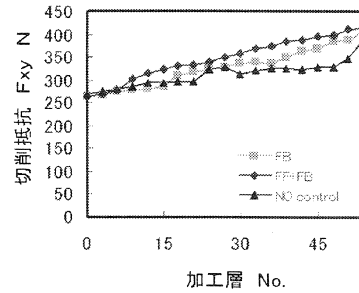


Fig.16 Measured cutting forces

以上の実験結果と考察についての関連する資料は以下のとおりである。Fig.11とFig.12に工具寿命試験で用いた金型モデルとその粗加工用工具パスを示す。またFig.13とFig.14にFB制御+FF制御と制御なしの場合についての工具パス周回切削時の測定された切削抵抗と送り速度を示す。またFig.15とFig.16にFB制御+FF制御と制御なしの場合についてのパス一層あたりの加工時間と切削抵抗の工具寿命までの変化を示す。

7. おわりに

本研究開発によりCCM加工システムを構成する各要素技術について、必要最小限の機能開発がほぼ完了した。とりわけFB制御、すなわちリニアサーボモータの電流値を用いて静的な切削抵抗や加工状態をモニタリングし、実加工中に切削抵抗に応じて送り速度など加工条件を最適に制御する適応制御機能を付加し、その効果を検証するという当初の研究目標について、一応の目途は達成できた。

今後は製品化を目標として、制御機能の安定性の確保などについて研究を継続する。またマン・マシン・インターフェイスなど商品化としては不足する部分を整備する必要がある。

追記

本実験に使用したマシニングセンタYBM850Vは、競輪(日本自転車振興会)の補助金を受けて設置したものである。