

マシニングセンタの生産性向上に関する研究 (第1報)*

— NC プログラムシミュレータによる生産性評価 —

閻 喜仁** 白瀬敬一*** 河端 裕† 平尾政利†† 安井武司††

Improving Productivity of Machining Centers Based on NC Program Diagnostic System (1st Report)
— Evaluation of Productivity Using NC Program Simulator —

Xiren YAN, Keiichi SHIRASE, Hiroshi KAWABATA, Masatoshi HIRAO and Takeshi YASUI

The productivity of machining centers is influenced strongly by the quality of NC programs. To investigate the productivity, an NC program simulator has been developed to analyze and evaluate an NC program by decoding its NC codes. With the simulator, even before the actual machining, the tool paths can be displayed and the operational times occupied in the positioning feed motion and cutting feed motion, etc. can be calculated. The effects of the maximum speed and the acceleration of positioning feed on the productivity have been analyzed. Additionally, the influence of feedrate override function to shorten the operational time has been investigated in the conventional and the high speed cutting, respectively. From the results obtained from analyzing three NC programs, it is found that the effectiveness of the override function depends on the relation among the average moving distance, the commanded feedrate and the acceleration of cutting feed. Especially, in the case of the NC program for machining dies or molds, the productivity will be hardly improved using faster feedrate, because the actual feedrate hardly increases as expected due to the tiny moving distances of NC blocks. High speed & high precision function, which is an advanced optional function, is much more effective not only to improve the productivity but also to keep the machining accuracy of high speed cutting.

Key words: NC program, machining center, NC program simulator, productivity, tool paths

1. はじめに

マシニングセンタ (以下 MC) が工場に広く普及し、金型や航空機構造部材等の複雑な形状加工に利用されるにつれて、MC メーカーやユーザがその生産性に注目するようになってきている。これまでは、MC の稼働率や稼働時間で生産性が評価されているが¹⁾、本来ならば NC プログラムの良否、すなわち加工条件や工具経路、加工時間などから総合的に評価すべきである。そこで本研究では、NC プログラムシミュレータによる MC の生産性評価と、エキスパートシステムによる NC プログラムの最適化を目標に、図 1 に示す NC プログラムの診断システムの開発に取り組んでいる。このシステムでは、NC プログラムを解析して得られる加工条件や工具経路を、熟練技術者のノウハウや経験を加工事例としてまとめたデータベースを基に最適化することで、MC の生産性向上を実現させることができる。

これまでも MC のコントローラや市販の CAM ソフトウェア²⁾に、加工時間を表示あるいは計算する機能があるにもかかわらず、生産性の評価や向上のために役立ってはいない。これは、それらの機能が別の目的で利用されるためであり、MC のコントローラの場合には稼働時間のモニタが目的で事前に加工時間の評価ができないとか、CAM ソフトウェアの場合にはタクトタイムの概算が目的で計算時間の精度が低いということによる。また、複雑な形状の加工や高精度の加工が要求されるにつれて NC プログラムが微小移動ブロック³⁾で構成されて肥大化したり、高速切削 (高い切削速度、高い送り速度) が

一般的になるにつれて現実の送り速度が指令値に達しないなど、事前に加工時間を精度良く評価することを困難にしている。

本報では MC の生産性評価のために NC プログラムを解釈しながら加工時間を精度良く評価できる NC プログラムシミュレータを開発した。さらに、3つの実加工 NC プログラムを用いて、MC の早送り速度や加減速度、送り速度のオーバーライドが加工時間に及ぼす影響を詳細に検討した。微小移動ブロックで構成される NC プログラムで高速切削を行う場合には、送り速度を高くしても加工時間の短縮が期待できないことから、加工精度を確保するという観点でも最先端の高速高精度加工モードというような機能が有効であることを示した。

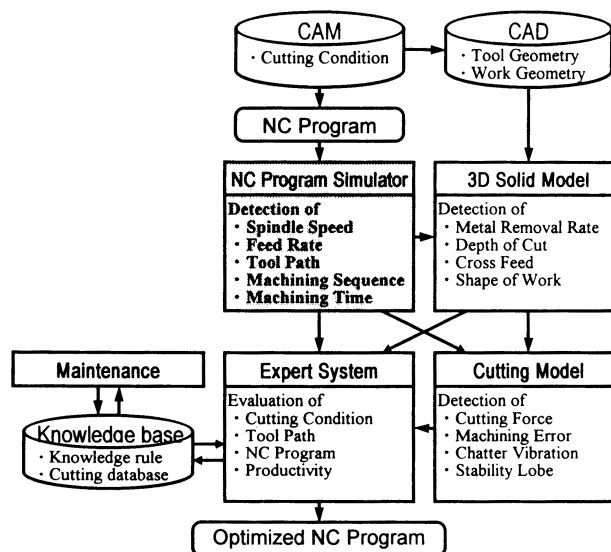


Fig. 1 Overall block diagram of the system

* 原稿受付 平成 8 年 12 月 18 日

** 学生会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 正 会 員 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

† 正 会 員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

†† 正 会 員 金沢大学工学部

2. NC プログラムシミュレータ

NC プログラムシミュレータは計算機内で NC コードを 1 ブロックごとに解釈して、工具経路を描画し加工時間の内訳を計算する。このシミュレータは図 1 に示した診断システム^{4)~6)}の NC Program Simulator の部分に相当する。本来、NC プログラムの良否は、工具経路や切削条件を考慮して診断すべきで、このため診断システムには、加工による被削材の形状変化を計算して NC プログラムに明示されない切削条件を抽出する 3 次元形状モデラ（図中 3D Solid Model の部分）、切削条件から加工中の切削力やびびり振動発生の有無を予測する切削加工モデル（図中 Cutting Model の部分）も含まれている。しかし、工具経路の良否は種々の戦略で作成した NC プログラムによる加工時間を比較することで評価できるなど、加工時間を精度良く評価できる NC プログラムシミュレータは生産性評価のためには不可欠である。

2.1 工具経路

NC ブロックを解釈して、G00, G01, G02, G03 などの G コードに対応した工具経路を画面に描画する。工具経路を描画することで、切削送りと早送りの違い、無駄な工具経路などが事前にチェックできる。

2.1.1 早送り (G00, G28, G29, G30)

工具早送りでは工具移動が各軸方向ごとに制御されるので、工具経路は直線とはならず途中で屈曲する。x, y, z 各軸方向の移動時間の関係が $t_x < t_y < t_z$ である場合、最初に x 軸方向の工具移動が終了し、次に y 軸方向、最後に z 軸方向の工具移動が終了する。各軸方向の移動時間と移動距離の関係から工具が通過する途中の座標値を求めることができる。

2.1.2 円弧切削送り (G02, G03)

円弧切削送りの場合、円弧中心または境界矩形の左上隅と右下隅の座標値を計算しておかなければならない。現在の工具位置が $S(x_s, y_s)$ 、指令後の工具位置が $D(x_d, y_d)$ で、半径が r で指定された場合、円弧中心の座標値は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= \frac{x_s^2 - x_d^2 + y_s^2 - y_d^2 + 2(y_d - y_s)y_c}{2(x_s - x_d)} \\ y_c &= \frac{y_s + y_d}{2} \pm \frac{x_s - x_d}{2} \sqrt{\frac{4r^2}{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(G02 では "+", G03 では "-")

2.2 切削送り時間

MC の作業時間の内訳として、切削送り時間、早送り時間、主軸加減速時間、その他の時間を計算する。

切削送り時間の場合、指令速度と移動距離だけから時間を計算すると、場合によっては非常に大きな誤差を生じる。特に、近年の高速送り対応の MC では、加工精度を維持するために加工形状に応じて送り速度や加減速度を巧みに制限する高速高精度加工モードというような機能を有しており、結果的に工具の移動速度が指令速度と異なるためになおさらである。以下に、通常の指数関数的な切削送り加減速の場合と、高速高精度加工モードにおける線形的な切削送り加減速の場合に分けて、切削送り時間の計算式を示す。

2.2.1 指数関数的な切削送り加減速の場合

工具の送り速度は、制御系の時定数を基に次式で求められる。

$$f(t) = \frac{f_s - F}{T_1 - T_2} \left(T_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - T_2 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right) + F \quad (2)$$

移動距離は式 (2) を積分して求められる。

$$d(t) = \frac{F - f_s}{T_1 - T_2} \left(T_1^2 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - T_2^2 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right) + f_s(T_1 - T_2) + F(t - T_1 - T_2) \quad (3)$$

ここで、 f_s は工具移動区間における初速度、 F は指令速度、 T_1 は加減速の時定数、 T_2 は位置決め制御系の時定数 (Position loop gain の逆数) である。NC プログラムシミュレータの検証に使用した MC では、 $T_1 = 32 \text{ ms}$ 、 $T_2 = 33 \text{ ms}$ であった。

近似式 $\exp(x) \approx 1 + x$ ($x \ll 1$) を利用して、工具移動区間における最終速度 f_b を考慮すれば、式 (3) から送り時間は次式で求められる。

$$t = \frac{d + (T_1 + T_2)(2F - f_s - f_b)}{F} \quad (t \gg T_1) \quad (4)$$

ここで、 d は移動距離、 F は指令速度、 f_s, f_b は工具移動区間の始点と終点での送り速度である。 $f_s = f_b = 0$ の場合、式 (4) は次式のようになる。

$$t = \frac{d}{F} + 2(T_1 + T_2) \quad (t \gg T_1) \quad (5)$$

式 (5) は、指令速度と移動距離から計算される時間を $2(T_1 + T_2)$ で補正すれば切削送り時間が求められることを示している。

2.2.2 線形的な切削送り加減速の場合

加工精度を確保するために加工形状に応じて送り速度や加減速度を巧みに制限する高速高精度加工モードでは線形的な切削送り加減速が行われている。特に微小移動ブロックが連続する場合には、送り速度は図 2 に示すように変化する。ここで 1 つの微小移動ブロックにおける送り速度の変化を考えると、移動距離と加減速度の関係から図 3 (a), (b), (c) の 3 つの場合に分けて考えることができる。

(1) 送り時間の計算

ケース 1 (図 3 (a))：送り速度が指令値に達する場合

以下の条件を満たす場合に、送り速度は工具移動区間で指令値に達する。

$$d' = \frac{F^2 - f_s^2}{2a} + \frac{F^2 - f_b^2}{2a} < d \quad (6)$$

これは、加減速に要する距離 d' が移動距離 d に比べて小さいことを示している。従って、この工具移動区間での送り時間は次式で求められる。

$$t = \frac{F - f_s}{a} + \frac{F - f_b}{a} + \frac{d - d'}{F} \quad (7)$$

ここで、 F は送り速度の指令値 (高速高精度加工モードで送り速度が制限される場合はその制限値)、 a は工具移動区間の始点と終点での加速度である。

ケース 2 (図 3 (b))：送り速度が指令値に達しないで、加速・減速をする場合

式 (6) を満たさず、以下の条件を満たす場合に、送り速度は工具移動区間で指令値に達しない。

$$f'_{\max} = (f_s^2 + 2ad)^{1/2} > F_1 \quad (8)$$

ここで、 F_1 は次ブロックの送り速度指令値である。式 (8) は、

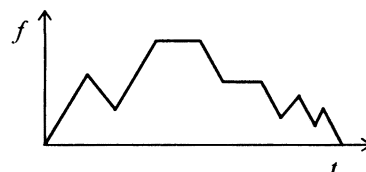


Fig. 2 Actual feedrate pattern of tiny consecutive blocks

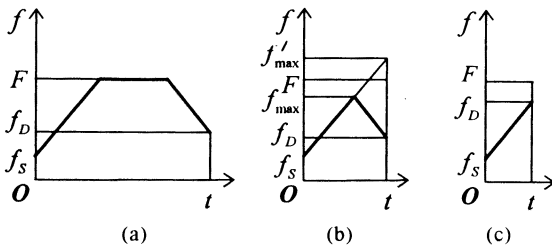


Fig. 3 Feedrate pattern of one tiny block

工具移動区間の始点から加速していくと終点の送り速度が次ブロックの送り速度指令値を上回ることを示している。このケースでは、工具移動区間の終点での送り速度が次ブロックの送り速度の指令値になるように ($f_b = F_1$) 途中で減速される。この工具移動区間での最大送り速度は、始点と終点での送り速度と加速度から次式で求められる。

$$f_{max} = \left(\frac{f_s^2 + f_b^2 + 2ad}{2} \right)^{1/2} \quad (9)$$

従って、この工具移動区間での送り時間は次式で求められる。

$$t = \frac{2f_{max} - f_s - f_b}{a} \quad (10)$$

ケース3 (図3(c))：加速あるいは減速だけをする場合

式(6), (8)をいずれも満たさない場合、工具移動区間での送り時間は次式で求められる。

$$t = \frac{f_b - f_s}{a} \quad (11)$$

(2) 計算した送り時間の補正

ケース3で、工具移動区間の終点で送り速度がゼロになる場合を考える。始点での送り速度が $f_s > (2ad)^{1/2}$ となる条件では、減速が不十分で $f_b \neq 0$ となってしまう。この場合、始点での送り速度を $f_s = (2ad)^{1/2}$ に修正して、すでに解析済みの工具移動区間について送り時間を補正しなければならない。解析中の工具移動区間 i における始点の送り速度の修正量 $\Delta f_{s,i}$ は、 $f_{s,i}^2 - f_{b,i}^2 = 2ad_i$ の関係から次式で求められる。

$$\Delta f_{s,i} = \frac{\Delta f_{b,i} f_{b,i}}{f_{s,i}} \quad (12)$$

また、送り時間の修正量 Δt_i は式(11), (12)の関係から次式で表すことができる。

$$\Delta t_i = \left(\frac{f_{b,i}}{f_{s,i}} - 1 \right) \frac{\Delta f_{b,i}}{a} = \frac{\Delta f_{s,i} - \Delta f_{b,i}}{a} \quad (13)$$

送り速度の減速が連続する工具移動区間で行われる場合には、各区間での送り時間修正量の総和を求めなければならない。

$$\begin{aligned} \Delta t &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i \\ &= \frac{1}{a} \left[\sum_{i=1}^n (\Delta f_{s,i} - \Delta f_{b,i}) \right] \\ &= \frac{1}{a} [(\Delta f_{s,1} - \Delta f_{b,1}) + (\Delta f_{s,2} - \Delta f_{b,2}) + \dots + (\Delta f_{s,n} - \Delta f_{b,n})] \\ &= \frac{\Delta f_{s,1} - \Delta f_{b,n}}{a} \\ &= -\frac{\Delta f_{b,n}}{a} \quad (\because \Delta f_{s,1} = 0) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)は工具移動区間 i における始点の送り速度の修正量 $\Delta f_{s,i}$ が、先の工具移動区間 ($i-1$) における終点の送り速度の修正量 $\Delta f_{b,i-1}$ に相当することから簡単にまとめられる。また、

$\Delta f_{s,1} = 0$ となるのは、送り速度の減速が始まる工具移動区間では一定の送り速度から減速が始まり、 $f_{s,1}$ が一定であることを仮定しているからである。

2.3 高速高精度加工モードにおける送り速度の制限

円弧補間による制御では円弧半径が小さくなるにつれて、また送り速度が速くなるにつれて、円弧半径の誤差が大きくなる。また、送り速度が速くなるにつれて、コーナ部のように送り速度が急変するブロック間でも工具の追従誤差が大きくなる。そこで、コントローラのオプション機能である高速高精度加工モードでは、局所的に送り速度を制限することで加工精度を維持しながら、高い送り速度で加工することを可能にしている。

この高速高精度加工モードでは、円弧切削における送り速度は次式で求められる送り速度で制限される。

$$F_{arc} = (a_{lim} r)^{1/2} \quad (15)$$

ここで、 a_{lim} は送り速度を制限するための加減速度、 r は円弧の半径である。

また、送り速度が急変するブロック間では次式で求められる送り速度で制限される。

$$F_{line} = (a_{lim} r_{eq})^{1/2} \quad (16)$$

ここで、 r_{eq} は連続ブロックにおける工具移動軌跡を曲線で近似した時の曲率半径に相当する。

2.4 NCプログラムシミュレータの実装

以上の点を考慮して、Windows 95の環境でVisual C++によりNCプログラムシミュレータを作成した。解釈できるコードには、G00~G03のような基本コード以外に、M98(サブプログラム)、G65, G66(マクロ)、コントローラのオプションである高速高精度加工のためのコードも含まれる。工具経路はNCコードの解釈とともに画面に表示され、計算された各種の作業時間はデータファイルとして記録される。更に、生産性を評価する観点から、早送り速度、切削送り速度、加減速度を変化させながら生産性(加工時間)に影響を及ぼす要因を定量的に解析することができる。

2.5 NCプログラムシミュレータによる実行例

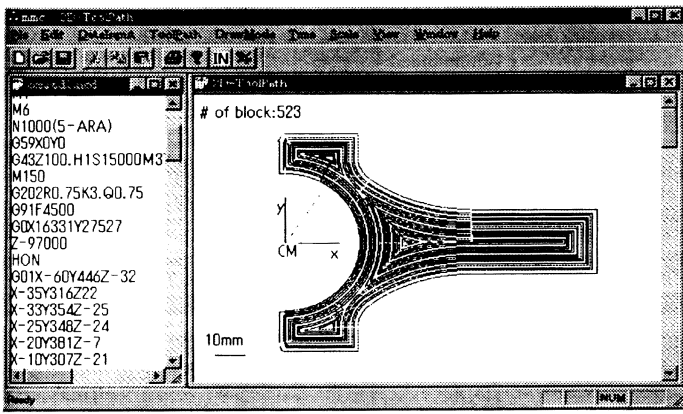
実行例としてコネクティングロッドの鍛造用金型加工用NCプログラム(プログラム名: Conrod)の例を示す。このNCプログラムは40000行余りから成り、使用工具はエンドミルで、4回の工具交換が行われる。前述の高速高精度加工も含まれている。

図4(a)はコンピュータ画面の表示例で、NCコードが解釈されて工具軌跡が表示されたことを示している。図4(b)は計算された各種の作業時間の内訳を示した結果で、切削送りに要する時間の割合が大きいことがわかる。

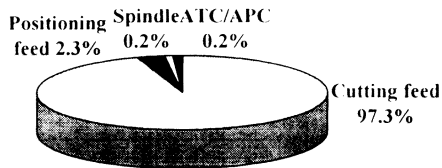
3. NCプログラムシミュレータによる生産性評価

3.1 実加工プログラムの作業時間解析

3つの実加工用NCプログラム(プログラム名: Conrod, Iron, Test)の解析結果を表1にまとめて示す。表1(a)は解析により推定された加工時間と実加工時間とを比較したもので、解析による誤差は3%以内であった。総加工時間には、切削送り時間、早送り時間、主軸加減速時間、ATC/APC時間などが含まれるが、金型加工のような例では切削送り時間がそのほとんどを占めていることがわかる。著者らは旋盤の場合についても同様の解析を行ったことがあるが⁴⁾、この場合の82.8%と比較しても、切削送り時間の割合が大きいことが分



(a) Tool paths



(b) Operational time ratio

Fig. 4 Simulation results of the sample NC program

Table 1 Analyzed results of sample NC programs

(a) Operational time

Name	Positioning feed time min	Cutting feed time min	Analyzed total time min	Actual total time min	Real cutting time ratio %
Conrod	1.63	71.2	73.1	75.2	97.3
Iron	2.11	17.6	19.8	20.4	90.3
Test	0.06	0.86	0.97	0.98	88.5

(b) Feedrates and moving distances

Name	Commanded feedrate mm/min	Actual average feedrate mm/min	Total cutting feed distance m	Average cutting feed distance mm/block	Kinematic factor $k = \frac{F^2}{ad_{av}}$
Conrod I	4 500	2 444	83.757	3.98	1.89
Conrod II	3 000	2 302	84.591	4.41	0.74
Iron	2 000	1 889	33.245	3.43	0.67
Test	10 000	5 491	4.722	18.1	1.75

かる。

表1(b)には、送り速度の指令値、解析結果から求めた平均送り速度、切削送りによる工具移動距離、NCプログラム1ブロック当たりの平均工具移動距離をまとめた。送り速度の指令値が大きく、1ブロック当たりの平均工具移動距離が短い場合、工具の送り速度が指令値に達していないことが分かる。そこで、次節に示す送り速度の指令値と実加工時の平均値の割合で生産性を評価することを考えた。

3.2 生産性評価のための有効送り速度比

送り速度の指令値に対する実加工時の平均値の割合を有効送り速度比と呼び、次式で示す。

$$e = \frac{f_{av}}{F} \quad (17)$$

ここで、 e は有効送り速度比、 f_{av} は実加工時の送り速度の平均値である。ここで、工具平均移動距離 d_{av} に対する有効送り速度比を求めてみる。簡単のために、図3(a),(b)で示したように送り速度が変化し、 $f_s = f_0 = 0$ であると仮定すると、式(7),(10)から、それぞれ以下の条件で有効送り速度比が求め

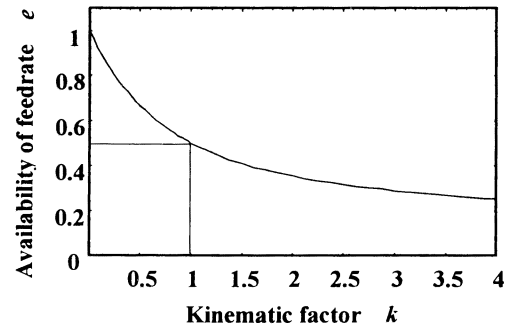


Fig. 5 Relation between availability of feedrate and kinematic factor

Table 2 Analyzed results with twice positioning feed and acceleration

Case	Positioning feed time min	Analyzed total time min	Productivity %
Normal	1.63	73.1	100
Twice positioning feed	1.62	73.1	100
Twice positioning feed acceleration	1.17	72.6	101

られる。

$$0 \leq \frac{F^2}{ad_{av}} < 1 \quad e = \frac{d_{av}}{Ft} = \frac{1}{1 + F^2/ad_{av}} \quad (18)$$

$$1 \leq \frac{F^2}{ad_{av}} \quad e = \frac{1}{2(F^2/ad_{av})^{1/2}} \quad (19)$$

これらの式を $k = F^2/ad_{av}$ としてまとめると、有効送り速度比 e は次式で定義できる。

$$e = \begin{cases} \frac{1}{1+k}, & 0 \leq k < 1 \\ \frac{1}{2\sqrt{k}}, & 1 \leq k \end{cases} \quad (20)$$

ここで、有効送り速度比 e と係数 k の関係を図5に示す。

NCプログラムの生産性という観点では、有効送り速度比は1に近いことが望ましく、そのためには係数 k の値はゼロに近いことが望ましい。これは送り速度の指令値をむやみに大きくするのではなく、工具平均移動距離を大きくすることを工夫すべきであることを示唆している。特に金型加工ではNCプログラムが微小な工具移動ブロックで構成される場合が多いが、送り速度と加工精度を考慮しながら工具平均移動距離を大きくするべきで、窪田らはCAMの中にこうした機能を実現している⁷⁾。

3.3 早送り速度および早送り加減速度による生産性評価

実加工NCプログラム(プログラム名: Conrod)を例に、早送り速度および早送り加減速度を2倍にした場合の総加工時間を解析し、その結果を表2にまとめた。

現状の工作機械がすでに高速送り対応(X, Y軸30 m/min, Z軸24 m/min)であること、早送り時間の占める割合がわずかであることから、こうしたハードウェアにかかわる改善も総加工時間の短縮には寄与しないことが分かる。

3.4 切削送り加減速度による生産性評価

同じ実加工NCプログラム(プログラム名: Conrod)を例に、切削送り加減速度を2倍にした場合の総加工時間を解析し、その結果を表3にまとめた。

Table 3 Analyzed results with twice cutting feed acceleration

Case	Analyzed total time min	Availability of feedrate	Productivity %
Normal	73.1	0.655	100
Twice cutting feed acceleration	59.0	0.784	118.8

Table 4 Analyzed results with different cutting modes

Mode	Commanded feedrate mm/min	Availability of feedrate	Analyzed total time min	Productivity %
Conventional	1 000	0.996	5.52	100
High speed	5 000	0.963	1.09	510
High speed/high precision	10 000	0.549	0.97	570

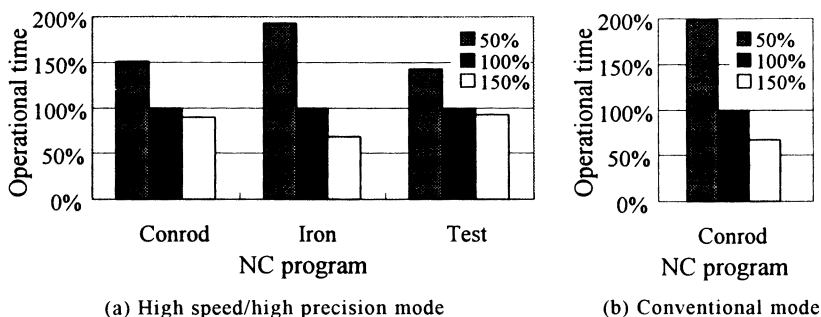


Fig. 6 Effect of cutting feed override on operational time

前述した有効送り速度比 e と係数 k の関係で示したとおり、切削送り加減速度の増加によって有効送り速度比が増加し、総加工時間の短縮に効果があることが分かる。

3.5 送り速度オーバーライドによる生産性評価

3つの実加工用 NC プログラム（プログラム名：Conrod, Iron, Test）について、送り速度オーバーライドを 50%, 150% に変化させた場合の総加工時間を解析し、その結果を図 6 (a) にまとめた。また、1つの NC プログラム（プログラム名：Conrod）を例に、送り速度を従来の加工水準に設定して、同様に送り速度オーバーライドを 50%, 150% に変化させた場合の総加工時間を解析し、その結果を図 6 (b) に比較して示す。

従来の加工水準では送り速度を高速にすることで加工時間を短縮できるのに比べ、すでに高速の送り速度を設定している場合には、加工時間短縮の効果が小さいことが分かる。ここでも前述した有効送り速度比 e と係数 k の関係から、係数 k が小さい場合に限り送り速度を高速にしても有効送り速度比が極端に減少せず、加工時間の短縮が期待できることが分かる。

3.6 加工モードと生産性の関係

加工モードによる総加工時間の違いを比較するために、1つの NC プログラム（プログラム名：Test）を例に、送り速度を従来の加工水準に設定した場合、送り速度の指令値を 5 倍に設定した場合、高速高精度加工モードで送り速度の指令値を 10 倍に設定した場合について総加工時間を解析し、その結果を表 4 にまとめた。

この場合、NC プログラム 1 ブロック当たりの平均工具移動距離が比較的長いために、送り速度の指令値を大きくすることで総加工時間が短縮されているが、工具の追従誤差に起因する加工精度の低下は免れない。一方、高速高精度加工モードでは加工精度を維持するために加工形状に応じて送り速度や加減速度を巧みに制限しながら、有効送り速度比 e が大きくなるようになっており、高速加工の実現には不可欠の機能であると言える。

4. 結 論

フライス加工用の NC プログラムを解釈して工具経路を描画しながら加工時間を正確に算出する NC プログラムシミュ

レータを開発した。また、このシミュレータで実加工用の NC プログラムを種々の観点で解析し、加工時間の観点で生産性を評価して以下の結論を得た。

- (1) 生産性を評価するための指標として、送り速度の実加工中の平均値と指令値との比（有効送り速度比）を提案し、この値が送り速度の指令値、NC プログラム 1 ブロック当たりの平均工具移動距離と切削送り加減速度で表される係数によって支配されることを示した。
- (2) 総加工時間短縮の可能性を有効送り速度比で検討し、送り速度が従来の加工水準である場合には送り速度の増加が効果的であるが、送り速度が十分に高く有効送り速度比が小さい場合には効果が期待できないことを示した。
- (3) 送り速度が十分に高く有効送り速度比が小さい場合には、NC プログラム 1 ブロック当たりの工具平均移動距離をできるだけ長くするように工具経路を生成することで総加工時間を短縮することができる。
- (4) 有効送り速度比が小さくなる高速加工では、ただ単に主軸回転数や送り速度の指令値を増加させるだけでは、加工時間の短縮は期待できず、逆に加工精度の低下を招く。このため、局所的に送り速度を制限することで加工精度を維持しながら、有効送り速度比が大きくなる高速高精度加工モードというような機能が不可欠である。

謝 辞

本研究を実施するに際し、(株)松浦機械製作所の高岡勉氏、三浦一男氏から工具移動の加減速の解析に関して貴重なご意見をいただきました。また、実加工用の NC プログラムも提供していただきました。こうしたご助力に対し感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 斎藤昭二：マシニングセンタにおける非加工時間の短縮，機械と工具，2 (1994) 43.
- 2) 広瀬敏之：5 軸制御 MC を生かす各種ソフトウェア，機械と工具，12 (1995) 22.
- 3) 領木正人：高速 3 次元 CNC，精密工学会誌，53, 7 (1987) 1018.
- 4) 白瀬敬一，平尾政利，安井武司：NC 旋盤の生産性向上に関する研究（第 1 報），精密工学会誌，60, 2 (1994) 235.
- 5) H. S. Huang and H. C. Zhang：On the Use of Knowledge-based Connectionist Models in CAPP Systems, Manufacturing Sci. Eng., ASME, 1, (1994) 65.
- 6) H. Weule and M. Klaiher：Computer-Aided Run-in of CNC Programmes, Ann. CIRP, 41, 1, (1992) 543.
- 7) 窪田 充，日笠山晴久，牟田芳喜：高速・高精度金型加工 CAM (第 2 報)，1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1996) 611.