最短経路問題の解法を利用した 加工工程設計支援システムの開発(第1報)*

—最短加工時間を与える加工順序の解析—

笠原 和夫** 石森 茂*** 池上 敦子†

Study on Supporting System for Process Planning Using an Algorithm of Shortest Path Problem (1st Report)

—Analysis of Machining Sequence for Shortest Machining Time—

Kazuo KASAHARA, Shigeru ISHIMORI and Atsuko Ikegami

In machining of products in which a large number of cutting tools and machining processes are required, the sequence in which a workpiece is machined has an effect not only on factors relating to productivity such as machining time, machining cost, and power consumption, but also on the machining error and quality of the machined surface. However, the number of combinations of processing sequences for machining of such products is extremely large, and it is therefore difficult to design an optimal machining process within a short time. In this study, an algorithm for solving the shortest path problem is used to develop a process planning support system that takes into account the various above-mentioned factors in machining using a machining center. The system incorporates various functions such as prevention of interference between the tool and the workpiece resulting from the machining sequence, prevention of processes in which previous machining is invalidated, and integration of processes performed using a same tool. Machining times based on NC data are calculated, and the shortest machining time for a product requiring 15 processes (using 9 tools) is analyzed. A comparison of results obtained using the proposed system with machining times required for processes designed by operators confirmed that the analytical results are valid.

Key words: process planning, machining time, optimal machining process, process integration, shortest path problem, Dijkstra's algorithm

1. 緒 言

近年、多軸制御マシニングセンタや複合型工作機械の開発が進み、完成までに多数の工具と工程を必要とする工作物の加工が1台の工作機械で実施できるようになってきた。このような工作物の機械加工では、加工時間、加工コスト、切削抵抗および消費動力（電力）などの生産性や力学に関連する諸量のみならず、仕上げ面品位に関わる加工誤差や仕上げ面粗さも加工順序の影響を受けることがある¹⁾。そして工具、工程数の増大に伴って加工順序の組み合わせは急増し、生産性や仕上げ面品位を考慮して最適な工程設計を短時間でこなすことは困難となる²⁾³⁾ことから、この状況に対応可能でより合理的な工程設計を支援できる手法やシステムの構築が求められてきた⁴⁾。

以上を背景として、これまでに単位時間あたりの材料の排除体積に着目し、この最大化が考慮された工程設計システムが開発されている⁵⁾。また知識ベースによる工程設計とスケジューリングを統合し、生産過程に必要な費用の最小化を図れるもの⁶⁾や加工フィーチャの組み合わせと加工順序を考慮することで、最短加工時間を与える工程設計が可能なシステムも提案されている⁷⁾。しかしながら、上記のような生産性や仕上げ面の品位に関わる複数の要因を目的関数として扱うことができ、この目的関数を選択することで、それに応じた工程設計ができるものは未だ少ないようである⁸⁾。

そこで本研究では多数の工具と工程を必要とする工作物をマシニングセンタで加工する場合を対象としてとりあげ、加工時間のみならず、切削抵抗や消費動力（電力）などの力学的諸量や仕上げ面品位に関わる要因についても、それらの予測モデルを組み込むことで取扱うことを可能にした加工工程設計支援システムの開発を試みることにした。解の探索に際しては、最短経路問題として扱うことにより探索時間の短縮を図った。この第1報では、システムの構成と加工順序を入れ替えることができない部分の取扱い、工具と工作物間の幾何学的干渉、前加工が無効になるような加工順序の生成の回避ならびに同一工具で異なる部位を加工する場合の工程集約などを考慮した最短加工時間を与える加工順序の探索方法について述べる。次いで具体的適用事例として9本の工具で15工程を必要とする工作物への適用結果を示し、この結果と工作機械オペレータの判断による工程設計結果との比較をとおしてシステムの有効性を検証する。

2. システムの概要

All sequence of machining

Fig.1 Existence of shortest machining time

* 原稿受付 平成21年12月8日

** 正会員 成蹊大学理工学部（武蔵野市吉祥寺北町3-3-1）

*** 学生会員 成蹊大学大学院工学研究科

† 成蹊大学理工学部

さらに最短加工時間を与える加工順序はこの実施可能な加工順序の集合の中に存在する．これは順序の入れ換えが不可能な工程や前加工が無効になる加工順序の生成を回避すること，工具交換などで生じる非切削時間を極力短くすることを考慮する必要があることを示している．

図2は上記の状況をふまえ、本研究で提案したシステムの構成を示したものである。システムへの入力を平行四辺形で、出力を角丸の四角形で示す。このシステムの特徴のひとつは加工時間以外に消費動力（電力）や加工誤差といった諸量の予測モデルを組み込むことで、複数の要因を目的関数として扱うことができるようにしていることである。ここではシステムの構成、機能および目的関数に加工時間をとった場合の加工時間に関するデータ処理の流れについて簡単に述べる。

本システムでは、後述の中間製品ネットワークを生成する過程で、以下の3つの機能が考慮されている。

①「ドリル加工」→「ねじ立て」のように加工順序を入れ換えることができない（前加工による拘束と呼ぶ）部分，加工部位の深さによって工具と工作物との干渉を生じる可能性が高い加工順序の生成の回避（これらを加工の拘束条件と呼ぶこととする）

②前加工が無効になる加工順序（前加工の無効化と呼ぶ）
の生成の回避

③同一工具で異なる部位を加工する場合の工程集約
そして指定された工作物形状，使用工具，切削条件下で得られる NC データに基づき算出された加工時間を用いて中間製品ネットワークが生成され，それを最短経路問題として解くことによって最短加工時間を与える加工順序を短時間で求めることができるようにしている．

図3は後述するモデルA（必要工具本数は5本である）の加工過程の中間製品ネットワーク⁹⁾の一部を示したものである。四角い枠で囲まれた工作物は中間製品を、枠内左上の丸付の数字は中間製品番号を、そして枠外の右横に書かれた数字は終わった工程を示す。また中間製品同士を結ぶ矢印（エッジと呼ぶ）は個々の工程の実施を意味し、さらにこのエッジ上に記された数字は工程番号を、エッジ先端部の数字は加工時間（同図では単位をminで表示している）を表わす。

図4は図3の中間製品ネットワークを本システムで扱うために数値データ化した状態を示す。中間製品群の左側の数字は中間製品番号、右側の数字は中間製品である。例えば中間製品番号7の「3400000」は工程3と工程4を終えた中間製品を表

Objective function	1. Machining time
Constraint conditions	1. Rotational speed, Feed
	2. Depth of cut
	3. Tool path (X,Y axis)
Control variable	1. Sequence of machining
	2. Tool path (Z axis)

Machine tool	Vertical machining center (3 axis)
Number of the machine tool	1
Workpiece geometry	Unrestricted
Number of workpiece	1 or plural
Number of machining surface	1
Number of cutting tool	Plural
Kind of tool	Unrestricted

Fig.5 Workpiece model

わす. 中間製品の数値化したデータの扱いについては $a[N][M]$ のように 2 次元配列を用いている. 上記の工程 3 と 4 を終えた中間製品番号 7 の工作物は, $a[7][0]$ に 3 が, $a[7][1]$ に 4 が格納されており, モデル B における工程 3 と 12 を終えた中間製品番号 25 の工作物は $a[25][0]$ に 3 が, $a[25][1]$ に 12 が格納される形で扱われる. また中間製品ネットワークでの各エッジの左側の数字は加工前の中間製品の番号, 右側の数字は加工後の中間製品の番号を表す. 例えば「1 4」であれば, 番号 1 の中間製品「1000000」（工程 1 のみが行われている中間製品）から番号 4 の中間製品「1200000」（工程 1 と 2 が行われた中間製品）への加工が一度の工具交換のみで実施可能であることを示す. このエッジは中間製品の終えた工程の情報を比較し, 一方の中間製品から単一工程, もしくは同一工具による集約された工程を実施することにより, もう一方の中間製品の状態に至るかどうかを判断することで生成される. そしてこのエッジの情報から実施された工程を判断し, 後述の加工時間算出プログラムより加工時間を求めて, この時間をエッジの重みとしている.

表 1 に最短加工時間を与える加工順序を求める際に用いた諸条件を示す. 本報告では既述のように目的関数を加工時間とし, 同一工具による同一部位の加工に対しては加工順序に関わらず回転数や送り, 切り込み量は一定とした場合を扱う. またテーブルの運動に対応する X, Y 軸方向の工具経路も変更させないものとする. これらの条件のもとで, 加工順序の違いによって Z 軸方向の主軸頭の移動量や運動様式および工具交換回数を変えることで最短加工時間を与える加工順序を求めた.

表 2 は本システムの適用条件¹⁰⁾を示したものである. 同表に示されるように, 本報告では工作機械（制御軸は 3 軸である）は 1 台のみを用いることとし, また工作物の形状は限定せず, 工作物数は 1, 加工面は上面の 1 面, 工具の種類は限定しない場合を対象として議論する.

3. 加工時間の算出方法とその検討

図 5 に本報告でとりあげた工作物の形状を, また表 3 に同図(a)のモデル A を加工する際に用いた工具と加工条件および NC データ内の主な指令コードを示す.

3.1 加工時間の算出方法

3.1.1 運動方向が変化する場合の取扱い

穴や溝部の多い工作物の加工では, 主軸頭やテーブルの加速・減速を伴う位置決め動作が頻繁に行なわれる. このため加工時間の算出に際してはこの加速・減速部の影響を考慮できるようにしておくことが必要¹¹⁾であるが, 同時間は個々の工作機械の運動性能に依存する. そこで本研究で使ったマシン

Table 3 Tool, machining conditions and NC code used in analysis (model A)

Tools number	Tools (mm)	NC code	Feed mm/min
			Rotational speed rpm
1	Face mill (150)	G01	250
			1000
2	Square end mill (20)	G01, G02, G83	150 or 120
			1200
3	Center drill (5)	G81	80
			2000
4	Drill (13.9)	G83	150
			1200
5	Tap (16)	G84	200
			100

Fig.6 Estimative model of machining time in acceleration and deceleration processes

Fig.7 Spindle motion in code G83

Table 4 Difference of cycle time caused in G83. Machining conditions same as in Table 3

	Time min	Difference min	Difference %
Measured	0.64	-	-
System	0.64	0.00	0%
Simply addition	0.65	0.01	2%
No consideration	0.51	0.14	22%

グセンタが実際に加工をしている場面をビデオ撮影し, その動画をコマ送りして解析することにより, 主軸頭やテーブル, 主軸が停止した状態から指定速度に達するまでの時間, 指定速度から停止するまでの時間を計測し, 加速・減速部を以下のように取扱い, 工作機械の運動性能を考慮できる加工時間算出プログラムを作成して用いた.

図 6 は主軸頭やテーブルの加速・減速の影響を考慮するために用いた, 時間と速度変化との関係を示す模式図である. 同図の実線は速度が一定となる移動過程を含む場合, 破線は移動

Fig.8 Variation of acceleration time and deceleration time with rotational speed of spindle

距離が短く速度が一定となる移動過程が生じない場合である。同図に示されるように加速・減速区間の速度変化は直線で近似し、その傾きを求めることによって同区間で生じる時間 C_1 , C_2 を評価できるようにした。このような速度の変化は、深穴固定サイクル (G83 指令) の実施過程で多く生じるから、ここではこの指令を用いた場合について述べる。

図 7 に G83 指令による主軸頭の運動様式を示す。実線の矢印は早送り、破線の矢印は指定された送り速度で運動する部分である。また Q は 1 回の切削深さ、 d は切削送りに移行した位置から 1 ステップ前の工具の到達深さまでの距離を示す。表 4 は G83 指令によって図 5 (a) に示したモデル A の中央部の穴を加工する場合の実加工時間と各条件での計算値を比較したものである。ただし、同表の結果を含め以下に示す加工時間の測定結果は、立形マシニングセンタ (MCV-410, 大阪機工) を用いて得られている。

図 6 の破線で示した速度が一定となる移動過程が生じない場合も考慮した、本システムを用いて得られた加工時間の計算結果は実加工時間とほぼ一致した。一方単に移動距離を移動速度で割った時間に加速・減速時間を足し合わせた場合には両者の間に 0.01min (2%) の差が生じた。このような 1 つの穴加工で生じる差は小さいが、穴数が多数ある場合にはこの差は無視できないものになる。さらに加速・減速の影響を全く考慮しなかった場合は 0.14min (22%) の差が生じ、この結果から加工時間の算出に際しては加速・減速の影響を考慮する必要があることと、以上で述べた取扱いが妥当であることが確認される。

3.1.2 主軸の起動・停止時の影響

工具交換を行うときには主軸の回転が停止した状態での工具と工作物との接触を避けるために、通常主軸頭を原点復帰させた後に主軸の回転を停止させる。また工具交換後に続く工程での位置決め過程では、主軸を回転させてからテーブルの運動を開始させる。このように主軸の停止状態からの起動や、回転状態からの停止が行なわれる場合には、以下のように扱った。

図 8 は無負荷運転時における主軸の回転命令 (M03) および停止命令 (M05) の直前の指令の実行終了時点から、これに続く次の指令が開始されるまでの時間を計測し、これより得られた主軸回転数 N と主軸加速時間 T_a (停止状態から指定回転数に達するまでの時間) および主軸減速時間 T_d (指定回転数から停止に至るまでの時間) の関係を示したものである。 T_a , T_d ともに破線で示される 700rpm 付近で低速と高速ギヤの組み換えに伴い計測値を結ぶ実線 (最小二乗法で近似した 2 次曲線である) に段差が生じているものの、どちらの速度域においても回転数による変化は図示の 2 次曲線で表現可能である。そこでこの計測値を結ぶ実線を用いて、主軸の起動および停止時間を

Fig.9 Comparison between measured and calculated machining time (model A). machining conditions same as in Table3

Fig.10 An example of non-exchange process

評価した。

3.1.3 加工時間の算出

以上で述べた各要因を考慮し、マシニングセンタの総稼働時間 T_{total} を次式により算出した。

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n [(T1_i + T2_i) + T_{ATC} + T_{p_i}] + 2 \cdot T_{ATC} \quad (1)$$

ただし、 n は全工程の数、 $T1$ は指定速度に達した部分の移動時間の合計、 $T2$ は達しない部分の移動時間の合計、 T_{ATC} は ATC アームの作動時間、 T_p は次の動作開始までの待機時間ならびに主軸の加速・減速時間などの合計である。

3.2 算出結果の検討

上記の加工時間算出プログラムは現状ではまだ適用できる工作物形状に制約があり、さらなる改良が必要である。しかし工作物の大きさ、溝や穴の深さ、数などの変化に対しては、数値データの変更のみで対応可能なものとなっている。

図 9 はモデル A を既述の立形マシニングセンタを用いて加工した場合の実加工時間と、上記の加工時間算出プログラムにより得られた加工時間の計算値とを比較したものである。ただし、同図は表 3 の工具番号 2 のエンドミルによる溝部と中央の穴上部の座ぐりの工程を分け、炭素鋼 S45C を被削材料として標準の切削条件で加工した場合の結果である。▲印とそれらを結ぶ破線は主軸頭やテーブル、主軸の加速・減速、次の動作開始までの待機時間の影響を無視したときの計算値であり、同図に見られるように全工程完了段階で●印とそれらを結ぶ実線で示す実加工時間との間にかなりの差 (11%) が生じている。一方個々の加工およびそれらを累積した実加工時間と加工時間算出プログラムにより得られた加工時間の計算値とは良好な一致が得られた。

この結果から、以上で述べた加工時間の算出方法が妥当であり、その算出は十分可能であると言える。

4. 工程設計の機能と諸条件

4.1 加工の拘束条件とその取扱い

工具交換機能を有するマシニングセンタを対象とした工程設計システムでは、前加工による拘束の考慮や工具あるいは工具保持部と工作物との干渉を生じる可能性の高い加工順序の生成を回避させる機能をもたせることが必要不可欠である。本報告では上述のようにそれらを加工の拘束条件と呼び、以下のように取扱った。ただしこの自動化については今後の課題とし、ここではこれら実施不可能な加工順序の情報は、予め人が判断し入力しておくものとする。

4.1.1 前加工による拘束の取扱い

図10に示すねじ立ての場合には当該加工の実施に際して、通常「センタドリル」→「下穴ドリル」といった2つの工具による前加工がなされる。本システムでは中間製品の生成過程においてこれを判断している。すなわちねじ立てが行われる中間製品には、必ずセンタ穴および下穴ドリルの加工が行われているようになっており、ねじ立てのみが行われているような中間製品は除かれる。

加工を行う際に n 個の前加工が必要となる拘束条件がある場合には、中間製品数の減少率 D は次式のようになる。

$$D = \frac{n+2}{2^{n+1}} \quad (2)$$

すなわち上記のねじ立てのように、2つの前加工が必要な工程を含む場合は、中間製品数は50%に減少する。さらにサイズの異なるねじ立てを含む場合にはさらに50%減少し、前加工による拘束を受けなかった場合に対して中間製品数は25%に減少する。この中間製品数の減少は、後述するダイクストラ法による解の探索時間の短縮に寄与することになる。

4.1.2 工具と工作物との干渉を生じる可能性の高い加工順序の生成の回避

モデルAの中央部のように、座ぐりのある穴部ではセンタドリル加工の前に座ぐり加工が実施されると、座ぐり部の直径と深さによっては工具保持部と工作物との干渉が生じる。本システムではエッジの生成過程において、加工する前の中間製品の状態と使用する工具の情報を基に干渉の有無を判断し、干渉を生じる可能性がある場合にはエッジの生成を行わないようにしてその発生を回避できるようにしている。

4.2 前加工の無効化の生成の回避

図11は前加工の無効化が生じる場合の一例を示したものである。センタドリル加工を行なった後に正面フライス（上面）やエンドミル加工（溝部）を行なうと、既に加工されたセンタ穴が消滅し無効になってしまう。そこでこのような状況がどのような場合に起こるかを予め人が判断しておき、エッジの生成過程において、加工する前の中間製品の状態と加工内容からその状況を判別し、エッジの生成を行わないようにして前加工の無効化が起こらないようにした。

4.3 工程集約機能の付与

同一工具で複数の工程を実施する場合、それらの工程を連続させれば工具の交換回数を少なくすることができる。本システムではこのような工程集約をエッジの生成過程において考慮できるようにした。すなわち中間製品同士を比較し、一方の中間製品に集約された工程を実施することによって、もう一方の中間製品の状態に至るようならば、中間製品間に工程集約したエッジを生成できるようにして、工程集約機能を付与している。ただし加工の拘束条件の場合と同様に、予め人が工程集約できる工程の情報を入力しておくものとする。

(a) Spot drilling → Face milling (b) Spot drilling → Slot milling

Fig.11 An example of invalid machining

Table 5 Values of quantities used in analysis and obtained result (model B)

Number of machining process	15
Number of cutting tool	9
Number of semi-products	2496
Number of edge	11384
Number of tool changing	11
Shortest machining time min	53.71
Maximum reduction rate %	13.0

Fig.12 Comparison of machining times obtained by the system and operator's design

Table 6 Process (model A)

Process number	Process	Tools number
P1	Face milling	1
P2	Slot milling	2
P3	Spot drilling	3
P4	Drilling	4
P5	Tapping	5
P6	Spot facing	2

Table 7 Machining sequence obtained by the system and operator a

System	Operator a
P1	P1
P3	P2
P4	P3
P2, 6	P4
P5	P5
—	P6

5. 最短加工時間の探索

完全列挙法により解を探索した場合には、工程数が13以上になると計算時間が急激に増大してしまう。すなわちモデルB（工具本数は9、工程数は15である）の場合、加工順序の組み合わせは15!（約1兆3000億）通りとなり、完全列挙法で解を求めることは困難になる。そこで本研究では、既述のようにこの加工順序決定の問題を最短経路問題として扱うことで解の探索時間の短縮を試みた。

解の探索には動的計画法のひとつで、最短経路問題を効率良く解くことが可能なアルゴリズムであるダイクストラ法を用いた。このダイクストラ法で加工の拘束条件や工程集約を考慮せずに解を求めた場合、完全列挙法では10分以上かかる

った12工程では0.8秒、13および14工程においても、それぞれ2.1、6.4秒（クロック周波数2.33GHzのCPUを搭載したパソコンによる）と解の探索時間を大幅に短縮できることが確認された。

6. 結果と検討

以上の加工工程設計支援システムを用いて得られた結果と工作機械オペレータや機械加工熟練者の判断による結果との比較をとおり、本システムの有効性を検証する。ここでは工程数が多いモデルBをとりあげ検討する。

表5はBの最短加工時間を与える加工順序についての諸数値である。このBでは加工の拘束条件や前加工による拘束、工程集約を考慮しなかった場合、中間製品数は約33000、エッジ数は約246000、加工順序の組み合わせは15!通り存在する。従って加工の拘束条件等を考慮したことにより、中間製品数は約92%、エッジ数は95%、また加工順序の組み合わせに関しては99.98%減少した。つまり加工の拘束条件等を考慮することで、実施不可能な加工順序の除去だけでなく、中間製品ネットワークの規模の縮小による最短経路探索時間の短縮もなされることになる。結果的に中間製品ネットワークの生成に要した時間は約6秒、ダイクストラ法による解の探索時間は1秒未満であり、加工順序の入れ替えによって加工時間は最大で13%短縮された。

またモデルAにおいて、溝部の深さを10mmから15mmに変更することによって、最短加工時間を与える加工順序が表7のシステムを用いて得られた加工順序からオペレータaの判断により得られた加工順序と同じものへと変わった。またその溝深さのまま工具材種を高速度工具鋼から超硬合金に変更すると、切削条件が変わり、それに伴い各工程の加工時間が変化し、最短加工時間を与える加工順序が表7のシステムを用いて得られた加工順序になった。このように工作物形状が類似であっても寸法や加工条件の変更に応じて適宜最短加工時間を与える加工順序を見出すことができた。

図12はモデルAとBについて、本システムを用いて得られた加工順序での加工時間および工程設計時間と、工作機械オペレータおよび機械加工熟練者（以下ではこれらをオペレータと略記する）の判断により得られたそれとを比較したものである。また表6はモデルAの各工程、表7はシステムを用いて得られた加工順序とオペレータaの判断により得られたそれである。表7におけるP2、6は第2工程と第6工程を集約した工程を意味する。工程数の少ないモデルAではオペレータによって工程設計時間に差は見られるものの、本システムとオペレータの判断によるものとオペレータeを除けばほぼ同一の結果が導かれている。このオペレータeの差はエンドミルによる溝部と中央の穴上部の座ぐりの工程を集約するか否かによって生じたものである。しかしモデルBのように工程数が増えると、当然のことではあるが工程設計に費やす時間は増大し、オペレータcにおいては実施不可能な順序を求めてしまっているなど、オペレータによって設計された加工順序での加工時間と工程設計時間の両方に大きな差が認められる。そして本システムを適用して得た加工順序による加工時間とオペレータcを除く他のオペレータにより設計された加工順序による加工時間には約1.4～2.1min（2.5～3.8%に相当する）の差異が生じた。

以上の結果から、工程数の増大に伴って加工の拘束条件や工程集約を考慮した工程設計の実施に際し、本システムは有効であることが確認された。

7. 結 言

多数の工具と工程を必要とする工作物をマシニングセンタで加工する場合を対象として、設計の目的に応じて加工時間、加工コスト、消費動力などの生産性や力学に関わる諸量および、加工誤差、仕上げ面粗さなどの仕上げ面品位に関わる複数の目的関数を扱うことができる加工工程設計支援システムの開発を試みた。このシステムでは前加工による拘束の考慮や工具と工作物との干渉を生じる可能性が高い加工順序の生成の回避、前加工の無効化の生成の回避ならびに同一工具で異なる部位を加工する場合の工程集約の機能を考慮することによって、中間製品ネットワークの規模を縮小し解の探索時間の短縮が図られている。本報告では目的関数に加工時間をとった場合を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 工作機械（立形マシニングセンタ）のテーブルおよび主軸頭の加速・減速の影響をビデオの撮影画像を用いて数値化し、運動性能を考慮した加工時間の算出が可能な加工時間算出プログラムを作成した。そしてこのプログラムで得られる加工時間の算出結果と実機による加工時間との比較をとおり、加工時間算出方法の妥当性を示した。
- (2) 9本の工具と15の工程を必要とする工作物について最短加工時間を与える加工順序の解析を行なった結果、最短経路問題として扱うことで最短加工時間を与える加工順序が求まり、解の探索時間は完全列挙法を用いた場合と比べて大幅に短縮されることを示した。
- (3) 開発したシステムを用いて得られた加工順序での加工時間および解の探索時間とオペレータによる設計結果との比較から、システムの有効性を検証した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、本学理工学部小方博之教授に最適化手法に関する多くの助言をいただいた。また加工工程設計時間の調査においては、（株）田中機械工作田中浩氏、（有）酒井製作所後藤田哲朗氏、本学理工学部大久保雅文助手、堀口淳司助手、佐藤道憲技術員の諸氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 杉村延広：工程設計システムの現状と将来、精密工学会誌、72,2(2006)165.
- 2) 井原透，小川操，伊東誼：直感型工程設計システムにおける加工困難さの同定、精密工学会誌、59,3(1993)435.
- 3) 小池稔，八十川貴子，妻屋彰，若松英史，荒井栄司：製品の機能や要求精度を考慮した自動工程設計システム、精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(2006)17.
- 4) 橋本公一：工程設計における機能概念の導入に関する研究、日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集、(2007)73.
- 5) 岸浪建史，吉田竹利，斉藤勝政：多段機械加工システムにおける加工手順の決定、精密機械、41,6(1976)527.
- 6) 岩田一明，福田好朗：多種極少量生産のための動的工程設計の提案、精密工学会誌、54,12(1988)2340.
- 7) 韓 剛，白瀬敏一，若松英史，妻屋彰，荒井栄司：切削加工の目的や環境の変動に柔軟に対応できる工程設計支援システムの開発、日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、(2004)299.
- 8) W. Grzesik: Advanced Machining Process of Metallic Materials, elsevier, (2008).
- 9) 水上裕登ほか：旋削自動プログラミングにおける同時加工順序のプランニング、精密工学会誌、60,8(1994)1169.
- 10) 岩田一明：機械加工条件の最適化、精密機械、42,2(1976)2.
- 11) 閻喜仁，白瀬敏一，川端裕，平尾政利，安井武司：マシニングセンタの生産性向上に関する研究（第1報）、精密工学会誌、63,7(1997)1044.