

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「短時間5軸加工法案を導出するための切削形状解析と
自動工程設計の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 神戸大学支援合同会社

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 製造現場における工程設計の実際	11
2-3 研究開発の経緯	13
2-3-1 平成22年度におけるソフトウェアの研究開発	13
2-3-2 平成23年度におけるソフトウェアの実務検証と実用化改良	13
2-4 テーマA：除去領域算出アルゴリズムの研究および検証	14
2-4-1 アルゴリズムの研究	14
2-4-2 アルゴリズムの検証	16
2-4-3 アルゴリズムの改良	18
2-5 テーマB：工具姿勢決定および工具選定アルゴリズムの研究および検証	19
2-5-1 アルゴリズムの研究	19
2-5-2 アルゴリズムの検証	21
2-5-3 アルゴリズムの改良	22
2-6 実務検証-1	23
2-6-1 検証	23
2-6-2 人の作業工数削減に関する考察1	24
2-7 実務検証-2	25
2-7-1 検証	25
2-7-2 人の作業工数削減に関する考察2	26
2-8 新方式（Zマップ方式）のソフトウェア開発	27
最終章 全体総括	28
<参考文献一覧>	29

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

加工工程の設計は、未だシステム化されておらず、人の技能に依存している。

【パターンが無限に存在】

- ①工具選定は膨大にある工具組合せの中から人が経験を頼りに行っている。
- ②工具姿勢の決定は無限に存在するパターンの中から人が経験を頼りに行っている。熟練技能者が決定した工具・工具姿勢が、加工時間が最短となる最適な加工法案であるかどうかは検証できない。一般的に、無限にある加工法案を労力をかけて作成し、確認されることはない。→最適な加工法案は不明。

(2) 研究の概要

5軸加工ではCAMシステムの高度な機能の使いこなしが求められるが、その入力情報となる加工工程の設計は、未だ人の技能に依存しており、5軸加工のメリットを十分に引き出せていない。本提案では、工程設計を自動化して加工時間が最短となる加工法案を導出するため、①体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定、②除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定の研究開発を行う。

(3) 研究の目的

【目標とするシステム】

一体化部品・複雑形状の工程設計における人の作業工数を従来と比較して50%以上削減する。

【利用する技術シーズ】

神戸大学 論文：5軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発（第1報）
—ボクセルモデルを利用した除去領域の算出と工具経路の生成による工具姿勢の決定—
—（第2報）—3+2軸制御荒加工における工具姿勢の決定方法—
試作プログラムにより3+2軸加工における最適な工具姿勢を決定できることが確認されている。これをベースに製品化開発が可能。

【解決方法の提案】

- 5軸加工での自動工程設計は業界初となる。
- 5軸加工の中でも汎用的な加工である3+2軸加工を対象として研究開発を行う。

《総称：5軸加工向け工程設計自動化ツール》

- ①体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定プログラムの開発
- ②除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定プログラムの開発

(4) 平成 22 年度の実績および 23 年度の目標

平成 22 年度は、①体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定、②除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定の研究サブテーマの内、ソフトウェアの研究開発に関する項目を実施する。

平成 23 年度は、ソフトウェアの検証および実工程設計・実加工検証・ドキュメント作成に関する項目を実施する。この中で、本研究の目的である人の作業工数 50%削減に向けた実務検証と実用化改良を行う。また、検証と改良の過程で、市場における仕様検討および検証を行い、将来の製品化に向けた改良対策を行う。

(5) 実施内容

【平成 22 年度実施項目】

①体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定

「①-1 工具選定ソフトウェアの仕様設計」、「①-2 製品形状・被削材形状・工具形状の単一サイズボクセル表現」、「①-3 単一サイズボクセルによる除去可能領域の検出」、「①-4 体積速度による加工時間算出および工具選定の評価」

②除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定

「②-1 工具姿勢決定ソフトウェアの仕様設計」、「②-2 製品形状・被削材形状を Octree 構造ボクセルで表現」、「②-3 ツーリングの送り方向への掃引形状を表現」、「②-4 ツーリングの掃引形状とボクセルの干渉チェックおよび除去領域の算出」、「②-5 ②-4 を用いて 1 つの工具の最適姿勢の探索」、「②-6 ボクセルを利用した工具経路生成と加工時間算出および工具姿勢の評価」

【平成 23 年度実施項目】

①体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定

「①-5 工具選定ソフトウェアモジュールの統合・検証」

②除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定

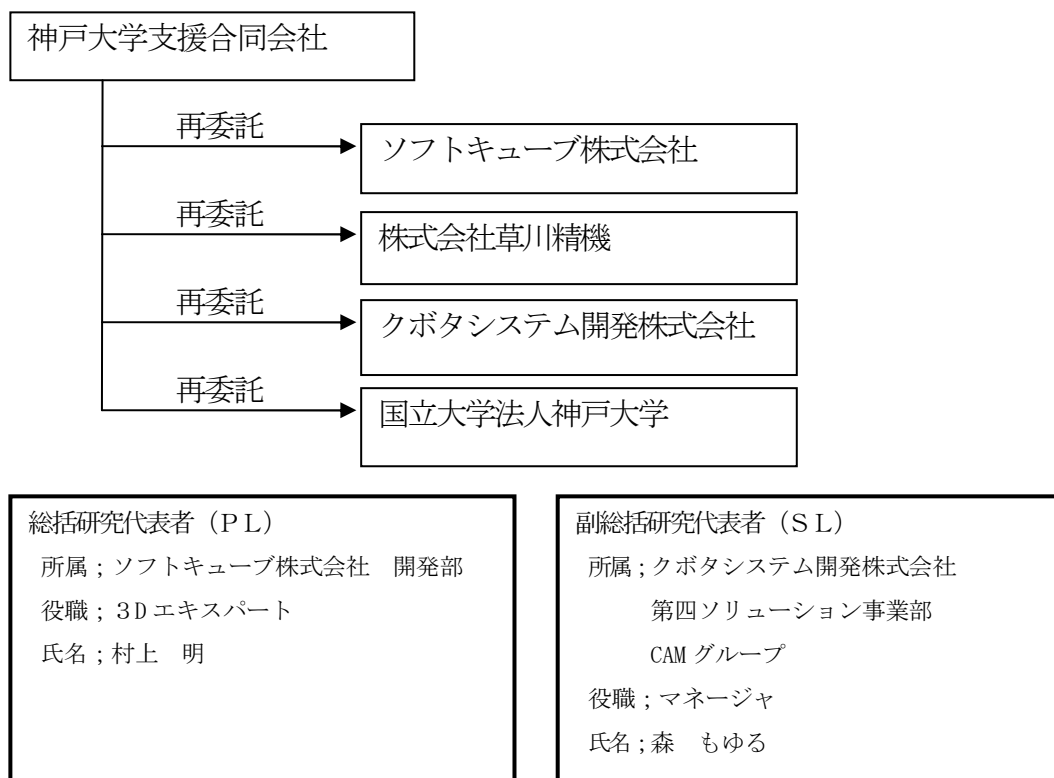
「②-7 工具姿勢決定ソフトウェアモジュールの統合・検証」、「②-8 実工程設計・実加工検証、ドキュメント作成」

《詳細計画および詳細スケジュール》

平成 23 年度は、全体スケジュールを 9 月で前半と後半に分け、9 月を計画の中間見直しフェーズとする。前半は、人の作業工数 50%削減と市場による仕様検討を中心とした 2 ヶ月程度のタームを 2 サイクル実施する。中間では、1 ヶ月程度をかけ、最終ゴールを明確にし、プログラムの改良方針を立て、後半のスケジュールを練り直す。ここで実用化に向けた方向性、性能アップの方向性などを決定する。後半は、中間見直しの方針に則って、最初にプログラム改良に 2 ヶ月程度かけ、実務検証および市場検証を中心とした 2 ヶ月程度のタームを 2 サイクル実施する。

1-2 研究体制

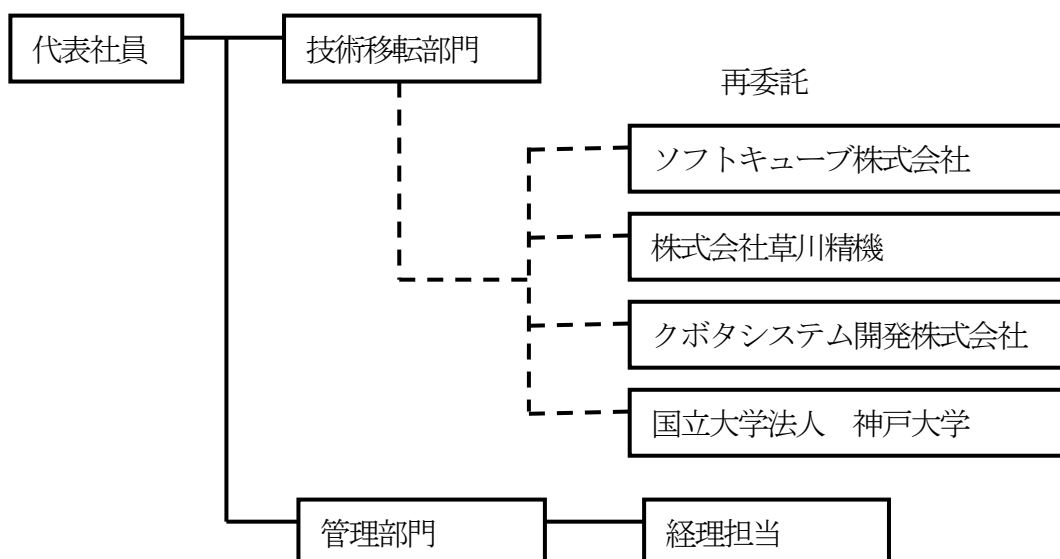
(1) 研究組織 (全体)



(2) 管理体制

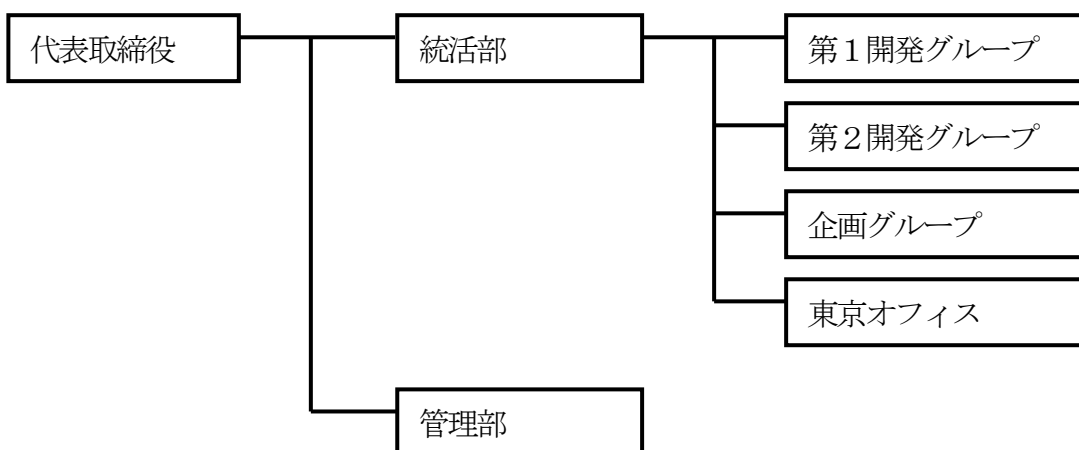
①事業管理機関

[神戸大学支援合同会社]

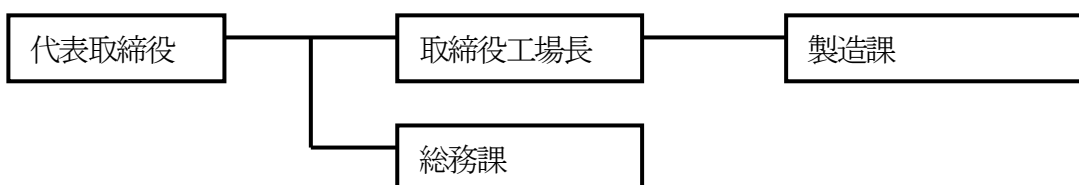


②再委託先

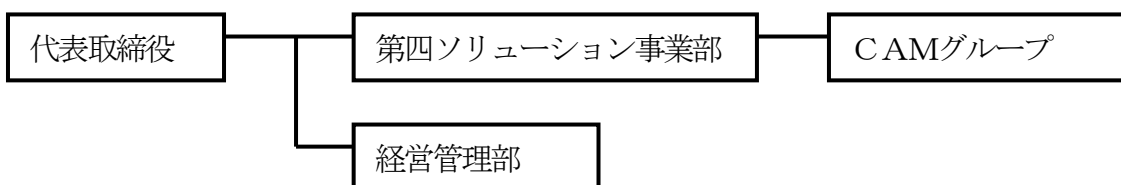
[ソフトキューブ株式会社]



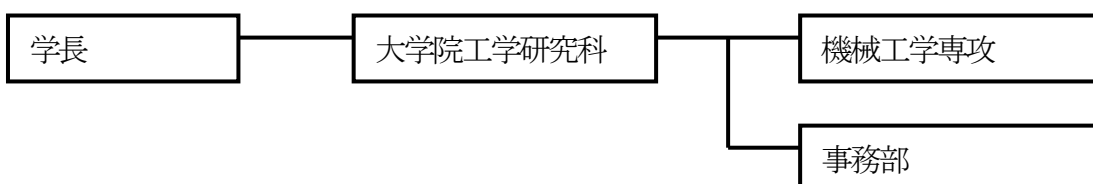
[株式会社草川精機]



[クボタシステム開発株式会社]



[国立大学法人 神戸大学]



(3) 管理員及び研究員

[神戸大学支援合同会社]

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
石井 昭三	管理部門 管理部門長 (業務執行社員)	③
河口 範夫	技術移転部門 産学連携アドバイザー	③
荒谷 典利	技術移転部門 産学連携アドバイザー	③
山東 良子	技術移転部門 産学連携アドバイザー	③
石井 道信	管理部門 経理担当職員	③

[ソフトキューブ株式会社]

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
村上 明	統括部 第1開発グループ 3Dエキスパート	①-5、②-7、②-8
山崎 謙次郎	統括部 第1開発グループ サブチーフ	①-5、②-7、②-8
上地 登	統括部 第2開発グループ チーフ	②-8
永谷 啓介	統括部 第2開発グループ サブチーフ	①-5、②-7、②-8
永田 陽一	統括部 第1開発グループ	②-8
山下 大輔	統括部 第1開発グループ チーフ	①-5、②-7、②-8
早川 裕治	統括部 企画グループ アシスタントマネージャ	①-5、②-7、②-8
加納 裕	統括部 東京オフィス 3Dエキスパート	①-5、②-7、②-8

[株式会社草川精機]

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
草川 雅史	取締役工場長	①-5、②-7、②-8
寺藪 智明	製造課リーダー	①-5、②-7、②-8
木崎 大吾	製造課	①-5、②-7、②-8

[クボタシステム開発株式会社]

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
森 もゆる	第四ソリューション事業部CAMグループ マネージャ	①-5、②-7、②-8
佐藤 智明	第四ソリューション事業部CAMグループ	①-5、②-7、②-8
窪田 章宏	第四ソリューション事業部CAMグループ	①-5、②-7、②-8
樗木 浩	第四ソリューション事業部CAMグループ	①-5、②-7、②-8

[国立大学法人 神戸大学]

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
白瀬 敬一	大学院工学研究科 教授	①-5、②-7、②-8

1-3 成果概要

(1) 平成22年度

研究開発項目	できたこと	できなかったこと
①-1 工具選定ソフトウェアの仕様設計	【体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定プログラムの開発】 1. 工具選定ソフトウェアの仕様設計を完成した。 2. 製品形状・被削材形状・工具形状の単一サイズボクセルによる除去領域検出アルゴリズムを実現した。 3. 体積速度による加工時間算出および工具選定の評価アルゴリズムを実現した。	本研究の当初の目論見に対して、できなかったことは特になかった。但し、本研究の目標を上回る新たなニーズが浮上しており、将来の研究テーマとなりえる。 例) 1500本の工具候補について寸法精度1mm以内で10分程度処理時間で結果を出したい。
①-2 製品形状・被削材形状・工具形状の単一サイズボクセル表現		
①-3 単一サイズボクセルによる除去可能領域の検出		
①-4 体積速度による加工時間算出および工具選定の評価		
①-5 工具選定ソフトウェアモジュールの統合・検証		
②-1 工具姿勢決定ソフトウェアの仕様設計	【除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定プログラムの開発】 1. 工具姿勢決定ソフトウェアの仕様設計を完成した。 2. 製品形状・被削材形状のOctree構造ボクセルおよびツリーリングの掃引形状の干渉チェックおよび除去領域算出アルゴリズムを実現した。 3. 1つの工具の最適姿勢の探索アルゴリズムを実現した。 4. ボクセルを利用した加工時間算出および工具姿勢の評価アルゴリズムを実現した。	本研究の当初の目論見に対して、できなかったことは特になかった。但し、本研究の目標を上回る新たなニーズが浮上しており、将来の研究テーマとなりえる。 例) 工具姿勢($\alpha \cdot \beta$)をより高精細に細分化し、寸法精度1mm以内で10分程度処理時間で結果を出したい。
②-2 製品形状・被削材形状をOctree構造ボクセルで表現		
②-3 ツリーリングの送り方向への掃引形状を表現		
②-4 ツリーリングの掃引形状とボクセルの干渉チェックおよび除去領域の算出		
②-5 ②-4を用いて1つの工具の最適姿勢の探索		
②-6 ボクセルを利用した工具経路生成と加工時間算出および工具姿勢の評価		
②-7 工具姿勢決定ソフトウェアモジュールの統合・検証		
②-8 実工程設計・実加工検証、ドキュメント作成	平成23年度の研究項目	

(2) 平成23年度

研究開発項目	できたこと	できなかったこと
①-5 工具選定ソフトウェアモジュールの統合・検証	体積速度による加工時間近似計算に基づく工具選定支援ソフトウェアの検証と改良を繰り返し、実証システムを開発した。	加工除去体積計算の1回の処理時間短縮と高解像度化が最大の課題であった。本研究では現段階では最大限の成果を得たが、ユーザーニーズを満足するには更なる性能改善が必要である。
②-7 工具姿勢決定ソフトウェアモジュールの統合・検証	加工除去体積の計算にボクセルモデルを用いた工具姿勢決定支援ソフトウェアの検証と改良を繰り返し、実証システムを開発した。	加工除去体積計算の計算回数を減らすため、姿勢探索における候補姿勢の絞込み手法を検討した。その結果、加工モデルの形状解析による手法などが挙げたが、工程および費用の都合により、本研究での実現は断念した。代わりに人手による絞込みを行なうユーザインターフェイスを開発した。
②-8 実工程設計・実加工検証、ドキュメント作成	検証用の検証モデルを例に実証システムを用いた工程設計と従来の技能者による工程設計による所要時間を比較し、作業時間が50%以上短縮できることが分かった。	当初方式（ボクセル方式）の検証で浮き彫りになった問題点を解決するため、新方式（Zマップ方式）を開発した。しかし、工程および費用の都合により実工程設計・実加工での検証の時間が確保できなかった。
《詳細計画》		
1) 全体工程計画（方向性の明確化）	人の工数50%削減、市場評価、製品化に向けて、検証と改良の短いサイクルを可能な限り繰り返すこと、途中で全体工程計画の見直しを行なうことなどを当初計画に盛り込んだ。	特になし。
2) サイクル1（実用化改良および市場評価、人の工数50%削減）	草川精機、クボタシステム開発による実証システムの検証を行い、多数の問題点を浮き彫りにした。その結果、本サイクルの工程を2～3ヶ月で予定していたが、4ヶ月程度まで延長することになった	クボタシステム開発の取引先による市場評価を目論んでしたが、その前に実証システムの問題点の解決が優先課題となった。そのため取引先からは本研究の構想に対する意見をヒアリングするに止まった。

3) サイクル2 (実用化改良 および市場評価、人の工数 50%削減)	サイクル1の期間延長の影響 で、全体工程計画見直しの 後、本サイクル2を実施する ことになった。結果として、 当初方式(ボクセル方式)を 改良することにより、目標で ある人の工数50%削減を実現 することができた。	目標である人の工数50%削 減の目途が工程の終盤まで立 たなかったため、市場評価が 十分にできなかった。
4) 全体工程計画見直し(最 終ゴールの明確化)	中間での計画見直しを盛り込 んだことで、効果的な軌道修 正ができた。	特になし。
5) サイクル3 (製品化改良 又は基礎技術改良)	当初方式(ボクセル方式)の 検証で浮き彫りになった問題 点を解決するため、新方式(Z マップ方式)を開発した。	工程および費用の都合により 実工程设计・実加工での検証 の時間が確保できなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

神戸大学支援合同会社

氏名：河川 範夫

電話：078-881-6826 FAX：078-881-6826

E-mail：kawaguchi@kobe-u-llc.co.jp

第2章 本論

2-1 製造現場における工程設計の実際

(1) 製造現場での課題

製造現場では、限られたインフラと人員、そして限られた時間の中で、図面の要求事項を満たすことに加えて、各顧客特有の要求を満たさなければならない。それを前提に、利益を上げることが必須である。また、今般の製品サイクルのスピード化に伴い、短納期での製作が余儀なくされている現状があり、益々、製造工程の技術研究や技術開発に対して時間をかけることが困難になっている。よって現状のCAM工程（加工プログラム作成工程）では、CAMオペレータの個々の保有能力（刃物の熟知度、加工工程設計技術、効率性、発想力、創造力など）に頼り、その能力の差により、製品品質や加工時間が左右され、製造技術として安定しない状況がある。

特に5軸機械の加工は、自由度が高く、複雑な形状の加工が可能であるため、CAMプログラム作成においては、刃物選択、傾斜角度、回転角度などの選択肢が多い。選択肢が多い分、CAMオペレーターによって作成されるプログラムは、同じような製品でもそのデータは多数となる。CAMオペレーターの経験値や能力に、製品の完成度と時間効率が、より左右される。また、その多様性は、最良の加工モデルに行き着くために、幾度もテストや修正を繰り返さなければならないことを示す。そのためには、多くの時間が費やさねばならないことになる。それは前記に述べた製造現場の現状に矛盾することになる。

(2) CAMオペレーターのデータ作成手順

現状の5軸加工モデルを作成する手順は、まず、オペレーターが最良の工程設計を目指して、最適と思われる工具や角度を選択し、データ化し、サンプルデータを作成する。その時点では、それが最良のプログラムであるかという測定、判断は不可能である。そのサンプルのデータで、CAMシミュレーションで計算された加工時間を検証する。その結果をみて、より最良に近づけるために、工具、角度の再選択し直し、最良と思われる条件を模索していくという手順で、個人が最良と思うプログラムにしていく。何通りもある選択肢の中から、手探りで模索しているような現状があり、実際の製品を切削する加工時間よりプログラムの考案、検証時間の方が長かったということも稀でない。

(3) 工具データベースの活用について

現在、工具は、工具と工具情報をデータベースに登録することにより、管理を行っている。登録した工具は、有無、所在地、寿命、性質などがわかるようになっており、工具の選択が以前に比べて、効率的に行えるようになった。オペレーターが選択した工具に対して情報は明確であるので、プログラムを作成するにあたり、工具情報が直接プログラムの数値として入力され、また、工具有無や寿命が明確なために、すぐにプログラムに必要な工具を決定できるということでは有効である。

しかし、工具の選択は、あくまでもオペレーターが行い、前述の通り、オペレーターの能力や経験により、バラつきがある。また、その工具は、その切削加工に最適であるかということは明白ではない。そこで、現在あるデータベースに登録されてい

る全ての工具に対してシミュレーションが可能であれば、自動的に工具の選択ができるのではないかという課題が生まれる。

(4) 今後期待される課題

人的な要因による製品品質、完成度、時間の効率のバラつきを防ぎ、プログラム作成工程の時間短縮を図るだけでなく、一番有効的で効率的な製造工程を実現する「プログラム」の作成を行うことが課題である。

そのためには、登録された全て工具でのシミュレーションを可能したうえで、最適な工具の決定をシステムが行えるようにする必要がある。

また、ワークの最適な角度や切削条件を割り出し、シミュレーションし、標準化することにより、加工方法、加工条件の決定をシステムが行えることが必要である。

2-3 研究開発の経緯

2-3-1 平成22年度におけるソフトウェアの研究開発

当初から実施計画書では、研究テーマの大項目として、(1)体積速度による加工時間近似計算に基づく工具の自動選定プログラムの開発（工具選定）、(2)除去領域算出および工具経路生成による加工時間予測に基づく工具姿勢の自動決定プログラムの開発（工具姿勢決定）、の2つのテーマを上げている。但し、実際のスケジュールは、実施計画書策定時のサブテーマを更に詳細化した詳細計画を策定し、これに基づいて管理している。

(1) 詳細サブテーマの策定

研究スケジュールの詳細化の為、詳細サブテーマおよび実施スケジュールを定める詳細計画の策定を進め、次のような内容とした。

- ・テーマA：除去領域算出アルゴリズムの研究、
- ・テーマB：工具姿勢決定および工具選定アルゴリズムの研究、

(2) 開発の進め方

複数の短期開発サイクルを想定したスパイラル方式を採用する。すなわち、幾何学的問題、加工方法、評価指標等が関連しあう複雑な問題に取り組むに当り、諸条件を単純化して短期間でプロトタイプシステムを開発し、その結果明らかになった問題点および改善案を踏まえて、次期プロトタイプに反映させることにより、改良を積み上げ、最終的には実務上有用なシステムを開発することを目指す。

2-3-2 平成23年度におけるソフトウェアの実務検証と実用化改良

本年度の全体スケジュールを9月の中間見直しで、前半と後半に分け、前半の目標を「人の作業工数50%削減と市場による仕様検討」として進めた。しかし、1サイクル目で多数の問題点が発生したため、原因究明および改良方法の検討に前半を費やした。よって前半の目標は達成されなかった。

中間見直しでは、1ヶ月程度をかけ、改良案の選定・最終ゴールの明確化・スケジュールの見直しを行なった。

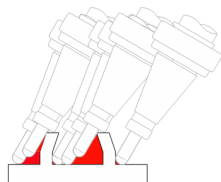
後半は、サイクル2の目標を「当初方式（ボクセル方式）による人の作業工数50%削減」、サイクル3の目標を「新方式（Zマップ方式）による製品化改良と基礎技術改良」、サイクル4はサイクル3に集約、として進めた。

最終結果として、サイクル2の「人の作業工数50%削減」は、いくつかの実証結果をもって目標の達成が確認された。また、サイクル3の「新方式（Zマップ方式）」についても性能とユーザインターフェイスが改善された工具姿勢決定支援ソフトウェア開発され、今後の製品化に繋がる成果が得られた。

2-4 テーマA：除去領域算出アルゴリズムの研究および検証

2-4-1 アルゴリズムの研究

(1) 基本的な考え方



製品形状、ワーク形状、工具およびホルダ形状が与えられたとき、指定された工具姿勢による除去領域を求める。

【問題へのアプローチ】

カッターパスによる方法：カッターパスを求め、切削をシミュレートする。②集合演算的方法：反転工具形状、補集合、ミンコフスキー和による。とくにミンコフスキー和の計算負荷が大きい。本研究では、②集合演算的方法を採用した。

【処理の流れ】

一定の処理単位の間、ワーク形状は変化しないものと仮定し、処理終了後にワーク形状を更新して、次の処理単位に移行する。(図1)

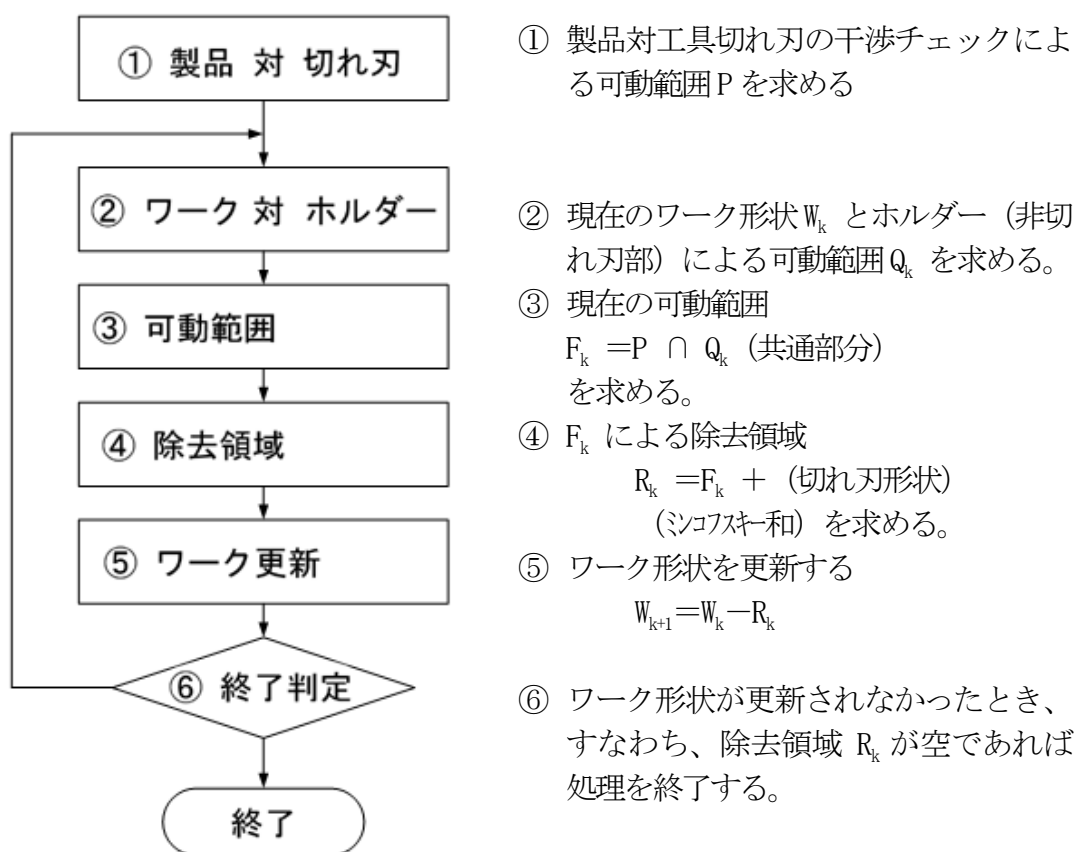


図1：テーマA 処理の流れ

【本処理方式の特徴】

- ①ミンコフスキー和、点対称反転、集合演算（ \cap 、 U 、 $-$ ）のみで構成されている。
- ②形状の表現形式（多面体かボクセルかZマップか）に依存しない

③末端処理に条件分岐を含まず、並列処理には有利と思われる。

④ミンコフスキー和は集合の特性関数（含まれるとき1、含まれないとき0）の相互相関関数が0にならない点の集合である。したがって、ボクセル表現の場合にはFFT等の手法が適用可能である。

(2) 形状表現

形状の表現方法として、①多面体、②ボクセル、③Z マップなどがあるが、本研究では、②ボクセル、③Z マップを採用した。

(3) 集合演算的方法による除去可能領域の計算 (図2)

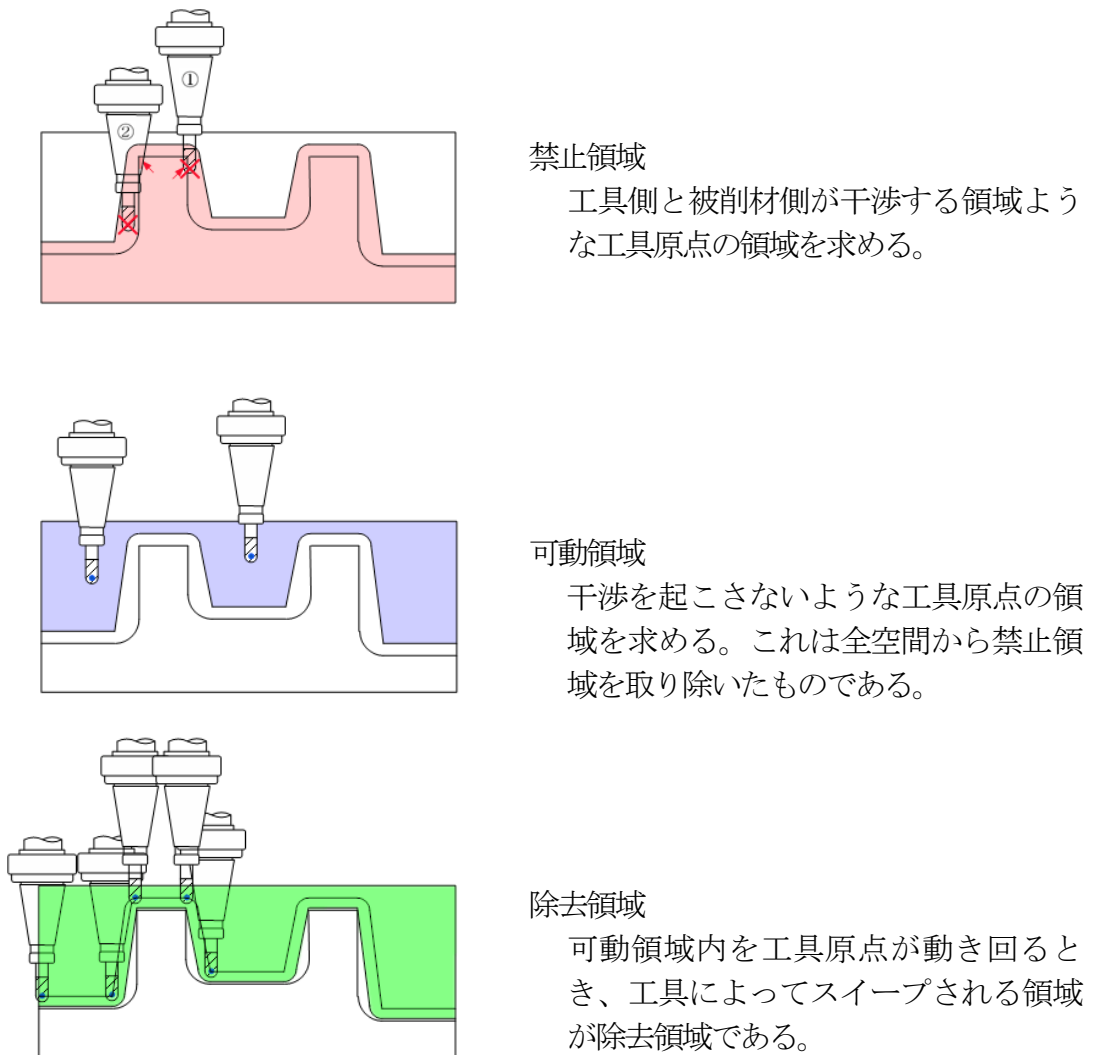
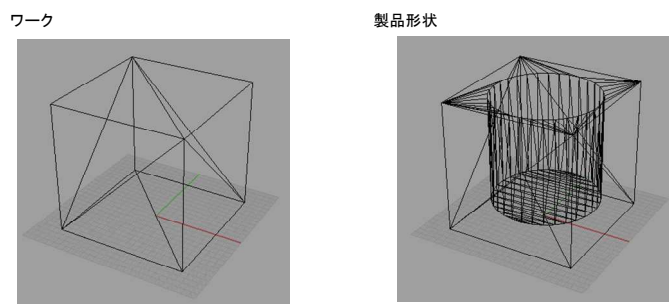


図2：除去領域の考え方

2-4-2 アルゴリズムの検証

(1) ボクセルモデルによる除去領域計算 及び 工具姿勢比較

実証システムでは $\alpha \cdot \beta$ の角度分だけ傾いた工具で切削を行う。ここではボクセルモデルを用いたミンコフスキー和によって、角度による切削の違いが見られるかどうかの検証を行った。ワーク、製品形状は下記のものを使用し、 $\alpha \cdot \beta$ の角度はそれぞれ60度から90度までを対象とした。(図3)



計算方法	FFT	工具形状
出力結果		
ボクセルサイズ	33 × 33 × 33	ホルダーボクセルサイズ
工具角度 $\alpha \cdot \beta$	60, 60	26 × 27 × 26
計算速度 [sec]	12.9	カッターボクセルサイズ
倍率		19 × 21 × 19
処理全体 [sec]	40.0	

計算方法	FFT	工具形状
出力結果		
ボクセルサイズ	33 × 33 × 33	ホルダーボクセルサイズ
工具角度 $\alpha \cdot \beta$	70, 70	25 × 27 × 26
計算速度 [sec]	13.6	カッターボクセルサイズ
倍率		19 × 21 × 19
処理全体 [sec]	42.1	

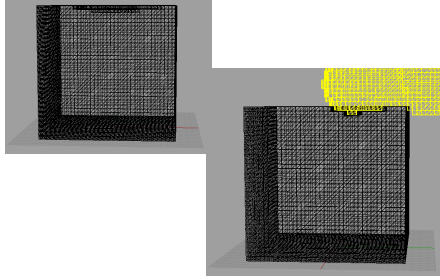
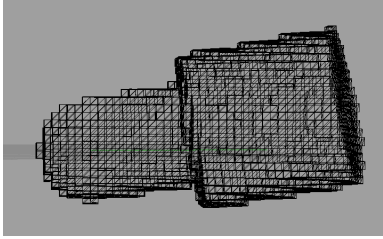
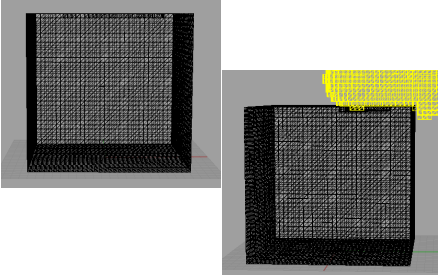
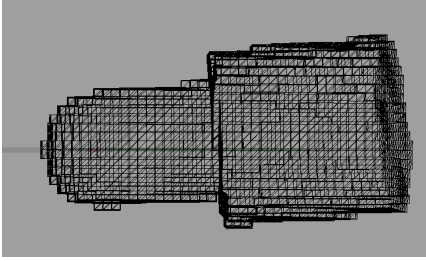
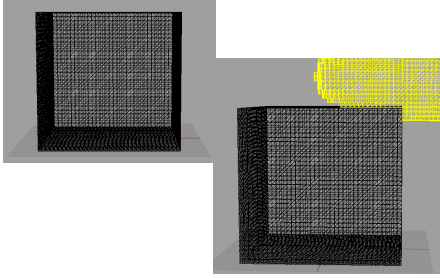
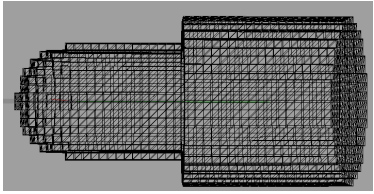
計算方法	FFT	工具形状
出力結果		
ボクセルサイズ	33 × 33 × 33	ホルダーボクセルサイズ
工具角度 α, β	80, 80	24 × 22 × 24
計算速度 [sec]	12.9	カッターボクセルサイズ
倍率		16 × 21 × 16
処理全体 [sec]	41.0	
計算方法	FFT	工具形状
出力結果		
ボクセルサイズ	33 × 33 × 33	ホルダーボクセルサイズ
工具角度 α, β	85, 85	22 × 22 × 22
計算速度 [sec]	8.9	カッターボクセルサイズ
倍率		15 × 21 × 15
処理全体 [sec]	30.6	
計算方法	FFT	工具形状
出力結果		
ボクセルサイズ	33 × 33 × 33	ホルダーボクセルサイズ
工具角度 α, β	90, 90	20 × 20 × 20
計算速度 [sec]	4.7	カッターボクセルサイズ
倍率		14 × 20 × 14
処理全体 [sec]	16.9	

図3：ボクセルモデルによる除去領域計算

予想としては、製品形状が四角形のワークに穴をあけた形状のため、工具の α を60度から徐々に傾けていくことによって工具が水平になり、切削できなくなると考えられる。実際に、検証結果を見てみると、 α が90度になった時点で、切削不可能となった。結果から、80度では切削できていたため、85度の場合も検証を行ったが、工具はほぼ水平を保っているが、工具の側面部分がかすかにワークに接触していることによって、少し切削できるという結果となった。この結果は、出力結果から見ても妥当であると考えられる。

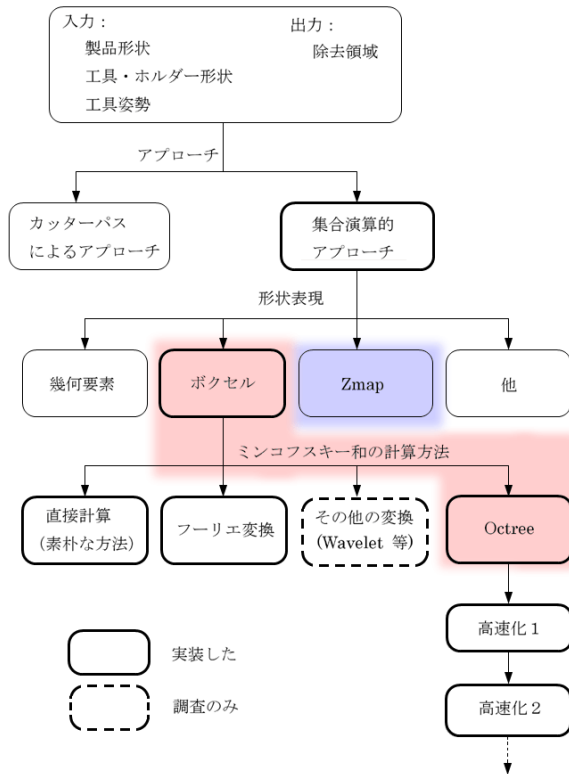
2-4-3 アルゴリズムの改良

(1) 処理カーネルの精度・速度改善策 (Z マップ方式の考案)

①除去領域の計算に関する基本的な問題点

- ・処理速度が遅い
- ・精度が悪い

ミンコフスキー和による方法の限界か？ (図4) ミンコフスキー和による方法 (ボクセル) から Z マップに転向したときの利点と課題。



利点：

- ・形状表現精度が向上する。
- ・処理速度が向上する。

課題：

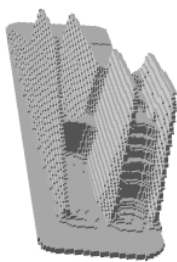
- ・Z マップの Z 軸は各工具姿勢の工具軸となるが、互いに傾きをもつ Z マップのブーリアン演算をどのように行なうか？
- ・次工程へのワークの引渡しは、どのような形状モデルで行なうべきか？

図4：テーマA 研究経緯

②Z マップ方式の形状表現精度 (図5)

当初方式 (ボクセル方式)

1 mm × 1 mm × 1 mm



新方式 (Z マップ方式)

0.5 mm × 0.5 mm

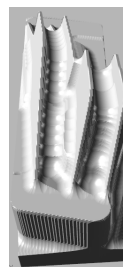


図5：Z マップによる表現

③新方式 (Z マップ方式) での複数姿勢の除去領域のブーリアン演算

2 姿勢目以降は複数の除去領域のブーリアン演算が必要である。下記の案により Z マップどうしのブーリアン演算を実現する。

案1) Z マップをボクセルに変換し、ボクセルどうしのブーリアン演算を行う。

問題点：第1工程の第1工具姿勢以外は精度が悪くなってしまう。

案2) Z マップ方式の精度を生かしたままブーリアン演算を行なう。

Z マップ⇒陰関数による表現⇒グリッドの内分比と法線ベクトルによる表現

Dual Contouring 法により、形状を Octree で表現する。

2-5 テーマB : 工具姿勢決定および工具選定アルゴリズムの研究および検証

2-5-1 アルゴリズムの研究

(1) 基本的な考え方

工具候補、工具姿勢候補を予め用意し、全ての工具、全ての工具姿勢の除去領域を計算する。(図6)

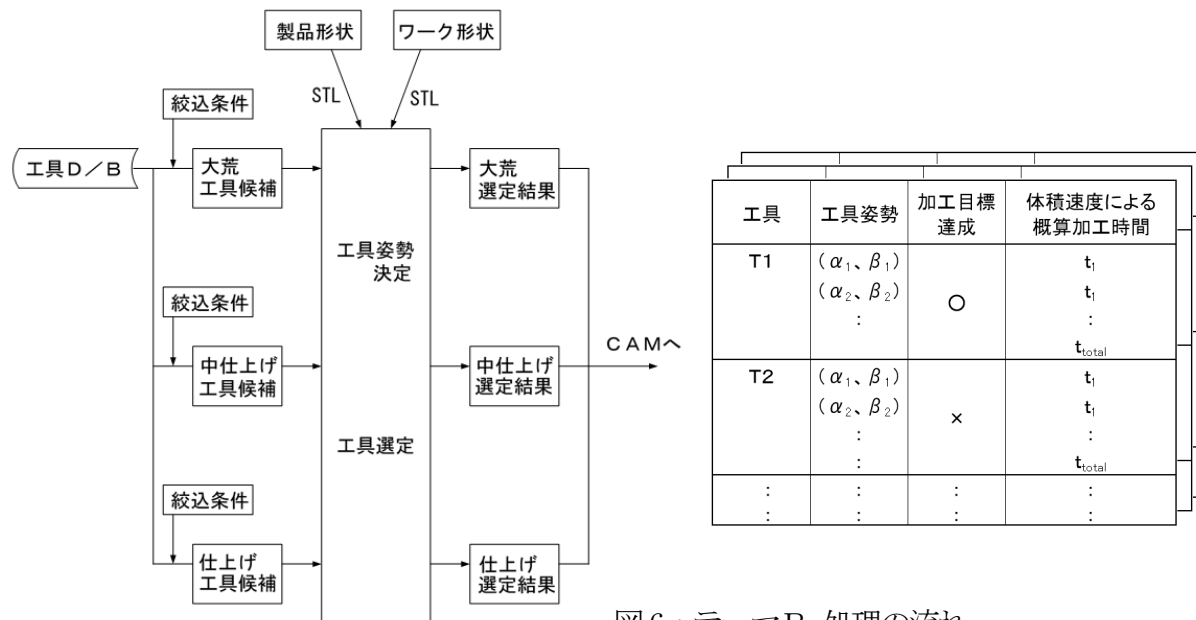


図6 : テーマB 処理の流れ

【重なりマップでの処理の流れ】

①切削目標

切削禁止領域 (=製品+次工程削り代=must not) と 切削目標領域 (=製品+追い込み厚さ=must) を製品からのオフセット量により定める。

②除去領域

各工具姿勢候補 (α_i, β_j) ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) の除去領域を求める。

③重なりマップ方式 (後に 除去体積優先方式へ変更)

上記除去領域の重なり回数のマップを作成する。

④工具姿勢選定

重なり回数の小さいものを領域に対する工具姿勢を優先的に採用する。

⑤工具選定

目標達成可能な工具を評価指標 (加工時間) の順にリストする。

【除去体積優先方式での処理の流れ】

①切削目標 : 上記と同様。

②除去領域 : 上記と同様。

③除去体積優先方式

上記除去領域の除去体積を計算。

④工具姿勢選定

上記除去領域の除去体積 (除去ボクセル数) が大きいものを優先的に採用する。

⑤工具選定 : 上記と同様。

(2) 重なりマップ方式

【問題】

(α 、 β) に対する除去領域が全て (例えば 10° 刻みで) 計算されたとして、これらの組み合わせ

(α_i 、 β_i) ($i=1, 2, \dots, n$)

でなるべく小さい n で除去目標領域全体をカバーできるものを求める。ただし、除去目標領域は製品形状を追い込み厚さだけ外側へオフセットしたものの補集合とし、製品形状は次工程への削り残り厚さを考慮したものとする。

【アルゴリズム案】

①各工具姿勢による除去領域をボクセルで表現する。(図7)

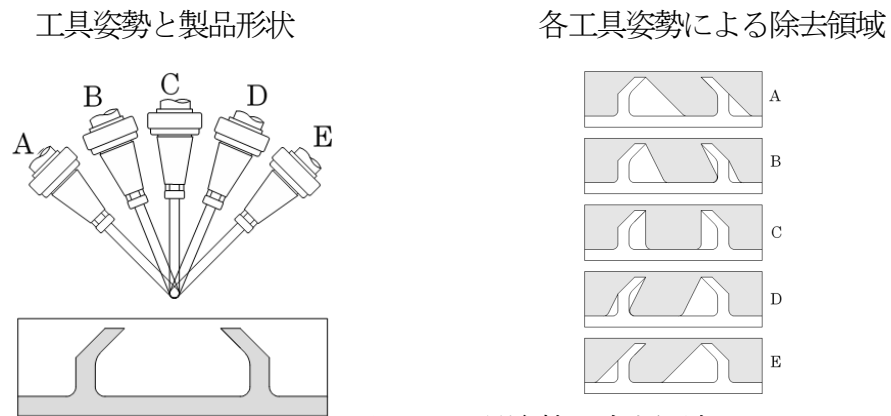


図7：工具姿勢と除去領域

②除去領域を重ね合わせて重なり回数を求める。(図8)

除去領域の重ね合わせ

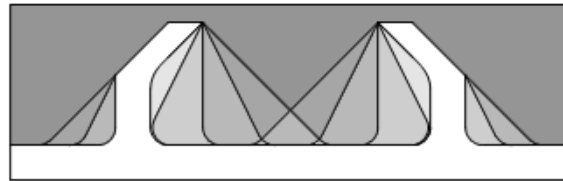


図8：除去領域の重ね合わせ

(3) 除去体積優先方式

【工具姿勢採用基準の重なりマップ方式の問題点】

重なり回数が2以上のボクセルが多数残るが、これらの中から選択する際の適正な基準が不明である。現状は見つかった順に選択している。その結果、多数の α 、 β の組が選択されてしまっている。

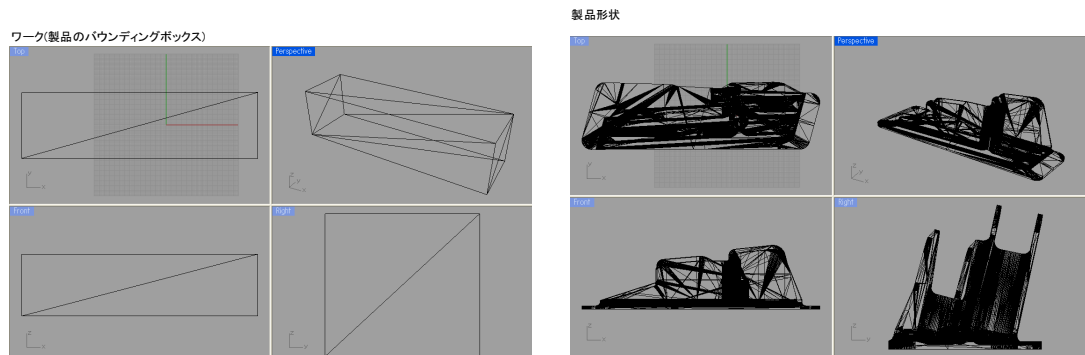
【改善案 (除去体積優先方式)】

そこで、除去体積 (除去ボクセル数) が大きいものを優先的に採用する方式に改めた。

2-5-2 アルゴリズムの検証

(1) 除去体積優先方式と重なりマップの比較検証 (図9)

重なりマップの問題点の改善案として、別の手法である除去体積優先方式がある。この新方式の有効性を検証するため、2つの手法の比較検証を行った。ワークと製品形状は下記のものを使用した。



ワーク → 製品形状のバウンディングボックス
干渉有り

ボクセルサイズ 1 must 1 must_not 0

	Step	From	to
α ピッチ	1	0	90
β ピッチ	45	0	360

新方式 (除去体積優先)

	1	2
α	13	35
β	90	135
切削体積 (全体:803380)	803333 (残り47)	47 (残り0)

※体積: 切削必須領域の体積

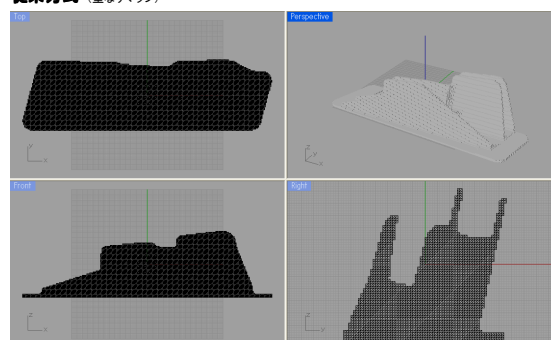
全体処理時間(s) 2706

従来方式 (重なりマップ)

	1	2	3
α	11	13	14
β	90	90	90

全体処理時間(s) 2842

従来方式 (重なりマップ)



新方式 (除去体積優先)

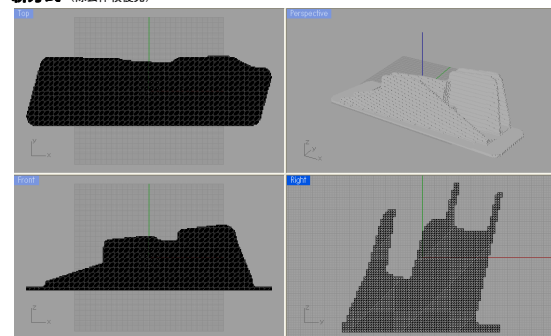


図9: 除去体積優先方式と重なりマップの比較

結果、全体の処理時間にはあまり差がないが、得られる $\alpha \cdot \beta$ の組み合わせの数が減少した。得られた角度を確認しても、新方式のほうが効率よく切削が行えていることが確認できる。出力結果を見ても、形状にほとんど差がないため、新方式である除去体積優先方式は、有効性があると考えられる。

2-5-3 アルゴリズムの改良

(1) 工具の比較処理の改良

①前提条件

一つの工程を処理の単位とする。すなわち、直前の工程の加工結果が与えられたとして、当該工程での使用を想定される複数の候補工具の比較検討を行うことを目的とする。工程をまたがる最適化は対象外とする。

②工具姿勢の決定 (図 10)

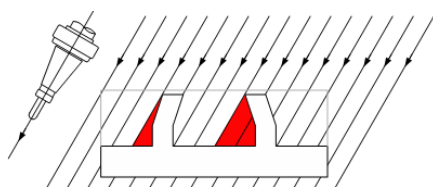


図 10：工具姿勢と工具径

工具半径は0、突き出し長は無量大であるとして、製品形状を切削できる工具姿勢の組 $(\alpha_i, \beta_i) \ i=1, n$ を決定する。(現状システムで処理するためには、少なくともボクセルサイズの1.5倍の工具直径が必要である。) 最も除去体積の大きい姿勢を優先的に採用し、2番目以降の姿勢では先行する加工による削り残しからの除去体積の大きいものを優先的に採用する。

③工具姿勢追加処理の終了条件 (図 11)

各姿勢 (α, β) に対し、未加工ワークから切削したと仮定して除去ボリュームを求める。

入力：



- ・製品形状 (仕上げ厚さを含む)
- ・未加工ワーク形状
- ・ α, β の範囲とピッチ

出力：

- ・各姿勢 (α_i, β_j) に対する切削ボリューム R_{ij} (ボクセル)

	β_1	β_2	...	β_n
α_1				
α_2				
⋮				
α_m				

これが、以降のすべての処理の基礎データとなる。

例1) 除去体積が最大の姿勢を求める。Volume(R_{ij}) が最大の ij を求めればよい。

例2) (α_1, β_1) で切削後のワークに対する除去体積が最大の姿勢を求める。

$$\begin{array}{c}
 \text{Diagram of } R_{ij} \\
 R_{ij}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{c}
 \text{Diagram of } R_{11} \\
 R_{11}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{Diagram of } R_{ij} - R_{11} \\
 R_{ij} - R_{11}
 \end{array}$$

$(R_{ij} - R_{11}) \ (i=1, \dots, m, j=1, \dots, n)$ のうち、Volume($R_{ij} - R_{11}$) が最大のものを求めればよい。

図 11：終了条件の考え方

2-6 実務検証-1

2-6-1 検証

(1) 実証システムの実加工検証

【検証内容】

検証モデル2 における、設定条件1 の検証
(実証システム改良後の荒工程の工具姿勢・取り残し部分・仕上げ工具の有効性)



図 12 : 検証モデル2

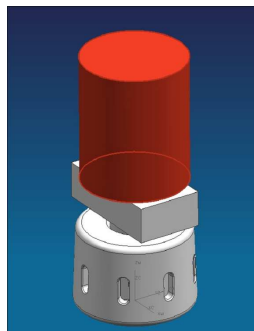


図 13 : 検証モデル2 の素材

【設定条件1】

①荒工程1

α ピッチ 15 / b ピッチ 45 / 工具姿勢数 5 /
 $\phi 20$ ロングエンドミル / 突出し長さ 85mm

②中荒加工

α ピッチ 15 / b ピッチ 45 / 工具姿勢数 5 /
 $\phi 13$ フラットエンドミル / 突出し長さ 40mm

③中荒2

α ピッチ 2 / b ピッチ 15 / 工具姿勢数 5 /
 $\phi 10R2$ ラジアスエンドミル / 突出し長さ 40mm

④仕上げ

α ピッチ 2 / b ピッチ 15 / 工具姿勢数 5 /
 $\phi 4$ ボールエンドミル / 突出し長さ 16mm

【実加工検証】

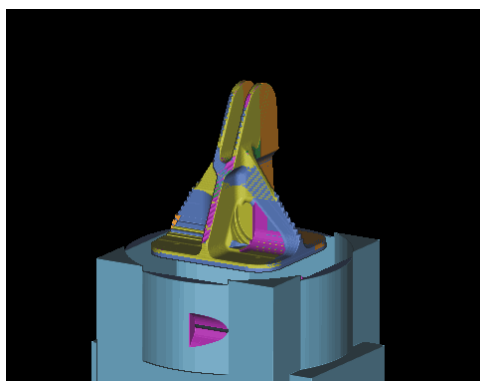


図 14 : CAM オペレーションによるレンダリング

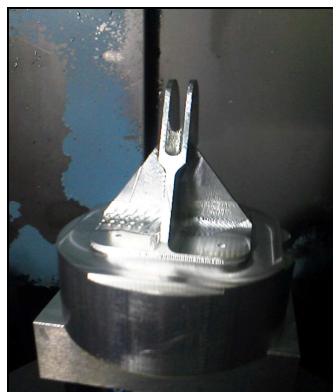


図 15 : 実加工後の形状

2-6-2 人の作業工数削減に関する考察1

(1) 検証モデル2において、実証システムあり／なしでの工程設計から実加工の比較。

①工程設計の所要時間

実証システムなし			実証システムあり		
工程設計	1h	やり直しあり	工程設計	1h	やり直しあり
角度の探索	2h	やり直しあり	角度の探索	自動	やり直しなし
工具選択	1h	やり直しあり	工具選択	0.1h	やり直しなし
加工深さ設定	0.5h	やり直しあり	加工深さ設定	自動	やり直しなし
シミュレーション	0.3h	やり直しあり	シミュレーション	0.3h	やり直しなし

角度の探索・加工深さ設定では人の作業がゼロ、工具選択でも人の作業を削減

②割り出し角度の比較

実証システムなし		実証システムあり	
荒工程 1		荒工程 1	
割り出し角度	4	割り出し角度	3
中荒加工		中荒加工	
割り出し角度	4	割り出し角度	3
中荒2		中荒2	
割り出し角度	4	割り出し角度	1
仕上げ		仕上げ	
割り出し角度	5	割り出し角度	5

効率のよい割り出し角度（工具姿勢）を算出し、工程の削減=加工時間の削減。

③加工時間の比較

実証システムなし		実証システムあり	
荒工程1		荒工程1	
加工時間	21分	加工時間	20分
中荒加工		中荒加工	
加工時間	42分	加工時間	27分
中荒2		中荒2	
加工時間	31分	加工時間	10分
仕上げ		仕上げ	
加工時間	180分	加工時間	195分
合計	274分	合計	252分

中荒加工・中荒の加工時間は大幅に削減したが、仕上げで増加しており、全体で10%削減

(2) まとめ

実証システムありの場合、工程設計にかかる時間が大幅に削減が可能である。実証システムなしの場合、デバック（やり直し）が発生するため、時間を要す。実証システムありでは、デバックがないため効率よく作業が進行することができた。

さらに中荒工程の割り出し角度については、人的に考えるよりも、効率のよい除去体積を考える実証システムのほうが有利で、工具姿勢数を減らせたことで、時間短縮につながっていると考える。

改善する点として、削ることが出来ない工具についてなんらかの表示または警告が必要と思われる。

2-7 実務検証-2

2-7-1 検証

(1) 実証システムの実加工検証

【検証内容】

検証モデル3の実加工

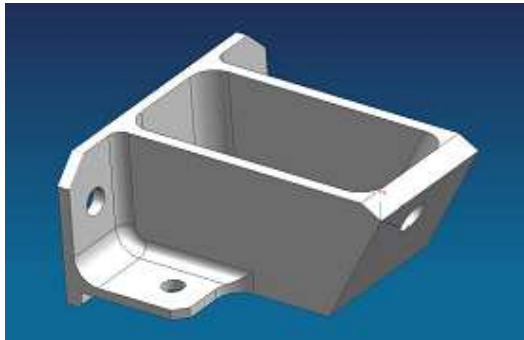


図16：検証モデル3

【実加工検証】



図17：検証モデル3の実加工結果
取残し無く、良好な仕上がり。

【検証モデル3の実証システムの計算作業】

● 刃物選択/パラメータ設定

加工情報

プロジェクト名: リボインモ子14
 製品データファイル: C:\MSAP\IN\project3\TLVSAFCOR_3.dtl
 ツールデータファイル: C:\MSAP\IN\project3\TLVSAFCOR_3_E14.dtl

材料: AL

α角度: 0 度 → 15 度
 β角度: 0 度 → 45 度

加工追加 加工削除 工程設定地 工程設定保存 加工内容変更

加工工程: 1 | 中程 | 仕上げ

仕上げ厚さ: 0 αピッチ: 15 βピッチ: 45 加工名設定

使用工具: 工具候補追加 工具候補削除 面往復動に切り替える

目標除去体積: 100 加工工具候補を絞り込む 全量加工あり ヒーリング値: 1

最大工具は数値: 5 面指定加工情報の補正オフセット値: 1

加工情報ファイル: 参照 表示 印刷

標準角度	工具番号	工具名称	工具種類ID	工具直径	コーナー半径	工具長	突出量	刃数
2115	2065	エンドミル	2	18	0	121	0	2
2188	2188	面ファインダ	2	18	0	100	0	8
2685	2685	エンドミル	2	18	0	155	0	2

処理開始 処理中

処理結果

ツール1 | ツール2 | ツール3 | ツール4

工具番号: 2065 回転数: 10000 αピッチ: 15
 工具名称: エンドミル 送り速度: 2000 βピッチ: 45
 指定加工時間: 1898.78 (秒) = 11分38秒 流速: 0

加工形状表示 工具実装表示

α角度	β角度	目標除去体積	基準回転X	基準回転Y	基準回転Z	Z最大値	Z最小値
0	0	87.120742	0	0	0	114.511	119.500
90	270	97.618222	0	0	0	57.212	-66.788
90	180	98.871682	0	0	0	45.811	-5.000
90	0	99.892803	0	0	0	45.811	5.000
90	270	99.896524	0	0	0	182.158	91.720

工具候補選択 工具候補選択: 2065 指定後算加工時間: 1898.78 決定(加工工程)

図18：ボクセル版メイン画面

2-7-2 人の作業工数削減に関する考察2

(1) 検証モデル3において、実証システムあり／なしでの工程設計から実加工の比較。

①作業時間の計測結果

作業計測の対象は、工程設計からCAD/CAM作業、実加工までとし、実証システムを利用した場合としない場合の「人による作業」の時間の比較を行なった。

実証システム	加工考案	実用的な工具選択	CAD/CAM作業	修正	実加工
	人による作業：5.75h				機械による作業
なし	1h	1.5h	2.5h	0.75h	1.5h
あり	0.5h	0.5h	1.5h		1.5h
	人による作業：2.5h				機械による作業

約50%程度の時間短縮

実証システムを利用しなかった場合の人による作業時間は 5.75時間 に対し、利用した場合の作業時間は 2.5時間 で、約56%の時間短縮 が為された。

②作業時間が短縮できた主な要素

- ・CAMオペレーションの 作業のやり直し作業が無い ため、格段に効率が計られている。
- ・CAMオペレーターの 考案（刃物選定や加工深さなど）に要する時間（作業しない時間）が無くなり、CAD/CAM作業が40%程度短縮 できている。
- ・修正作業がゼロ である。

(2) まとめ

実証システム（自動工程設計）を用いることにより、作業時間の短縮が可能 となるだけでなく、従来の加工ノウハウの蓄積（経験や人的スキル）とは違う、今後の企業ノウハウの新しい蓄積の形 となりうる。CAD/CAM作業は、実証システム（自動工程設計）から算出されたパラメータを入力する作業に置き換わり、未経験者でも、CAMオペレーター要員の養成が可能 となると考えられる。すなわち、コストパフォーマンス を追求する上で実証システム（自動工程設計）は強力なアイテムとなる。

2-8 新方式 (Zマップ方式) のソフトウェア開発

(1) 工程コントロール画面

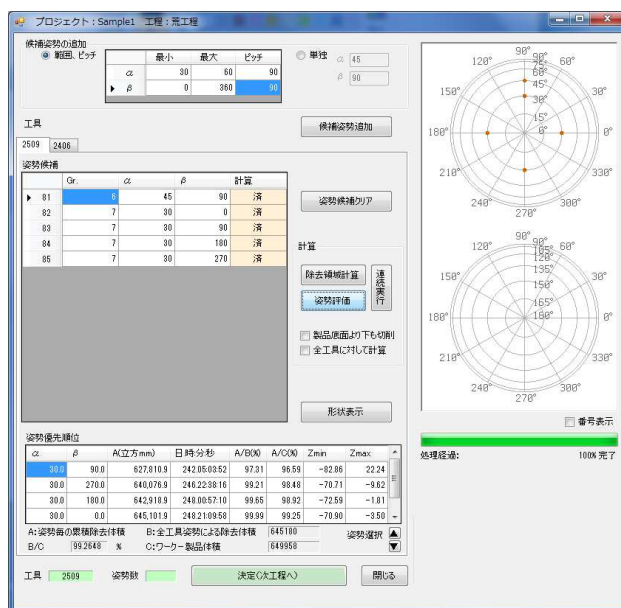


図 19 : 工程コントロール画面

(2) ビューワー

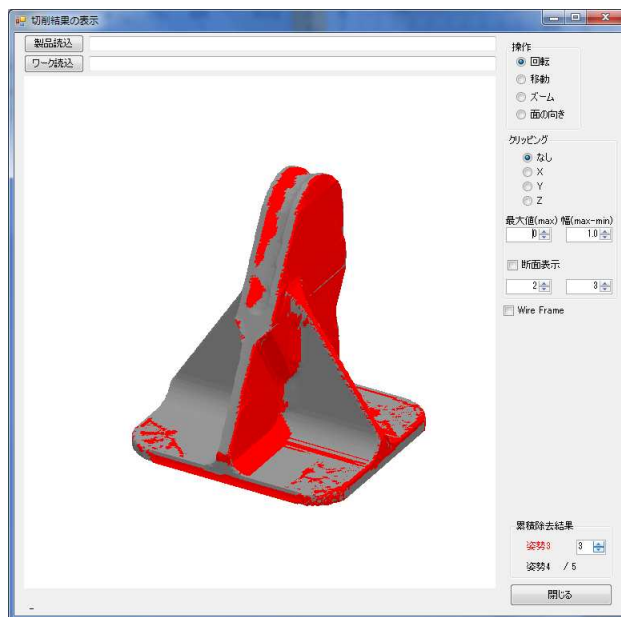


図 20 : ビューワー画面

①候補姿勢指定

[候補姿勢追加] ボタンにより、候補姿勢リストに追加する。単独姿勢の追加も可能。

②除去領域計算

[除去領域計算] ボタンにより、除去領域計算を実行する。この時点で[候補姿勢追加]を行なうと、未処理の姿勢としてリストに追加される。再度、[除去領域計算]を実行すると、未処理の姿勢のみ計算が行なわれる。計算は、現在選択されているタブの工具に対して行なわれる。[全工具に対して計算]をチェックすると、全工具に対して行なわれる。

②姿勢評価

[姿勢評価] ボタンにより、姿勢評価：累積除去体積の計算と順位の決定を実行する。累積除去体積の大きいものから順に、[姿勢優先順位] リストに表示される。

③加工後形状確認

[形状表示] ボタンにより、ビューワー (加工後確認) を呼び出し、切削後形状を表示することができる。リスト上で隣接する2姿勢の結果が同時表示される。Up Down ボタンにより、上位姿勢⇔下位姿勢の切替を行なう。

最終章 全体総括

工作機械の多軸化は機械加工の高度化をもたらしたが、一方で NC プログラムを作成する準備作業を難しくしている。特に、膨大な組み合わせの中から加工に使用する工具を選定し、削り残しのない工具姿勢を決定することが技能者に任されており、満足する結果が得られるまで試行錯誤を繰り返さなければならず、多大な時間と労力を要している。このため、本研究開発支援事業では、素材と加工形状の 3 次元 CAD データからシミュレーション技術を駆使して加工に使用する工具の選定と工具姿勢の決定を支援する自動工程設計システムを開発した。

平成 22, 23 年度の 2 年間に、15 回の検討委員会で一般的な議論を進めながら 15 回の分科会で専門的な課題の検討を行い、開発するソフトウェアの検証と改良を繰り返した。得られた成果は以下のように纏められる。

1. 体積速度による加工時間近似計算に基づく工具選定支援ソフトウェアを開発した。
2. 加工除去体積の計算にボクセルモデルを用いた工具姿勢決定支援ソフトウェアを開発した。
3. 計算時間の短縮、計算精度の改善を目的に、加工除去体積の計算に Z マップを用いた工具姿勢決定支援ソフトウェアを開発した。
4. 工具選定支援ソフトウェアおよび工具姿勢決定支援ソフトウェアの検証と改良を繰り返し、実証システムを開発した。
5. 検証用の検証モデルを例に実証システムを用いた工程設計と従来の技能者による工程設計による所要時間を比較し、作業時間が 50%以上短縮できることが分かった。

作業時間が短縮できた要因は、①使用する工具や工具突出し量など、技能者が考案する時間が不要になり、NC プログラムを作成する CAM 作業時間が短縮できた。②工具選定支援ソフトウェアが選定した工具と工具姿勢決定支援ソフトウェアが決定した工具姿勢により満足する加工結果が得られ、試行錯誤による CAM 作業のやり直しが不要となった。の 2 点である。

研究開発当初は完全自動の工程設計システムを目標としたが、膨大な組み合わせに対してシミュレーションを行って工具選定や工具姿勢決定を行うため、膨大な計算時間を要することが分かった。計算時間の短縮は今後の課題であるが、対話形式で技能者が利用する形態でも作業時間の短縮に大きな効果があることが分かった。

最後に本事業の支援に謝意を表するとともに、本事業で開発したソフトウェアが我が国の加工技術の国際競争力の維持・強化に貢献できるように、今後は、製品化に向けた計算時間の短縮とユーザインタフェースの改良を継続していく。

<参考文献一覧>

※1 :

5軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発 (第1報)
—ボクセルモデルを利用した除去領域の算出と工具経路の生成による工具姿勢の決定—

中本圭一 稲岡孝彬 白瀬敬一 森脇俊道

※2 :

5軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発 (第2報)
—3+2軸制御荒加工における工具姿勢の決定方法—

中本圭一 角田充 白瀬敬一