

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360069

研究課題名(和文)高付加価値を創出する巧妙加工の研究

研究課題名(英文)Study on dexterous machining to create high value-added products

研究代表者

竹内 芳美 (TAKEUCHI, Yoshimi)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：50107546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：高精度で低価格の製品を作る従来の方法を異なり、工芸品や芸術品のような高付加価値をもつ製品を創成するという新たなアプローチを確立することは重要である。そこで、本研究は、機械加工に基づいて多軸制御複合加工機や多軸制御マシニングセンタを活用し、芸術品のような形状創成を初めて試みるものである。加工法を工夫してこのような高付加価値製品を創成する概念を「巧妙加工」と名付ける。本研究では、「巧妙加工」をいくつかの領域に分類し、形状加工を実施する。その結果、「巧妙加工」の概念は高付加価値製品の創成に可能性を有することが実験的に確認された。

研究成果の概要(英文)： It is important to establish a new approach of creating such value-added products as craftworks or applied arts, different from traditional way of achieving products with high quality and low price. Thus, the study deals with the first trial of creating artistic product shapes by means of multi-axis controlled multi-tasking machine tools or multi-axis controlled machining centers on the basis of mechanical cutting technology. The concept of creating high value-added products by devising cutting ways is named as Dexterous Machining. In the study, Dexterous Machining is classified into several areas and demonstrated. As a result, it is experimentally found that the concept of Dexterous Machining has the potential of creating high value-added products.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：巧妙加工 複合加工機 複雑形状 柔軟材 CAM

1. 研究開始当初の背景

世の中には昔から技能者による非常に巧妙に作られた形状がある。例えば、故宮博物館にあるようないくつも入れ子になった鳥籠を見ると、どうやって作るのか想像もできない。このような技能や経験を駆使した加工は、近代の機械加工技術から追いやられ、現代は基本形状や単純形状の組み合わせを基にしたものづくりの様式になっている。そこで本研究では、複合加工機による工程集約型の高能率生産を念頭に置きながら、技能やノウハウなどの暗黙知をシステム化可能な形式知に変換しながら職人並の加工（これを巧妙加工と呼ぶことにする）を追究することを計画した。

そのため、3次元 CAD 上で定義した素材形状と複雑形状から、干渉回避を考慮した上で、旋削とフライス加工を併用して、超難加工形状などを処理するための工程計画ならびに自動加工プログラム生成のできる5軸制御 CAM システムの開発を行い、複合加工機による巧妙加工を実現する。

2. 研究の目的

本研究は、今まで試みられたことのない難加工形状を、あたかも技能者やエキスパートのように加工できるシステム開発を目指すものである。3次元 CAD 上で定義された素材形状と難加工形状から、複合加工機を駆使して自動加工できるという特徴をもつシステムである。複合加工機による旋削・フライス加工を自在に行える加工プログラムが簡単に生成できれば、難加工形状の3次元 CAD データからダイレクトに複合加工機の運転が可能になるという特色が生まれる。

そこで、加工法を把握し、工具経路の自動算出を行い、まず3軸制御加工システムを作り上げ、さらに同時5軸制御加工までシステムを拡張する。ここまでできればかなりのレベルの特長あるシステムになるがさらに、独自のアイデアを盛り込み、2主軸把持方向換え作業や複数の工具台を処理できる CAM システム開発によって、芸術の域にまで達するような巧妙加工という独創的なシステムを構築する。

このシステムにより、難加工形状を誰でも容易に行うことができる。5軸加工を活用し、干渉を気にせずに複雑形状を自動加工できる画期的なシステムは、ものづくりの深化に大きく寄与できる。

3. 研究の方法

巧妙加工の研究の初年度（H23 年度）は、5軸制御複合加工機を用い、1主軸で旋削加工とフライス加工をできるシステムを研究し、その例として曲り円柱からなる複雑形状の削り出しを行う。さらにこれを展開し、5軸制御化と2主軸による把持方向取換え作業ができるようにシステムの拡張を行い、立方体の中に球をもつ入れ子形状の創成と鎖

形状の加工法を開発する。

2年度（H24 年度）では3軸制御加工を5軸制御化することと、2主軸による把持方向取換え作業のできるシステムにして拡張を図る。いちおうの成果が得られたなら超精密マイクロ加工の分野でも巧妙加工を試みる。通常では非常に加工の困難なメビウス輪の創成を手掛ける計画である。超硬マイクロボールエンドミル工具の側面切れ刃とボール部切れ刃を巧みに使い分け、時間短縮を図りながら複雑な形状創成を行うことを目指す。

さらに、形状の複雑性に加え、ウレタンゴムなど柔らかくて把持することの難しい材料に対する加工法を追究し、巧妙加工を試みる。これらは最終年度（H25 年度）に研究をする予定であったが、前倒して実施できたために研究計画を進んだ方向に変更する。

最終年度（H25 年度）では、予定にはなかった超柔軟材としてスポンジの5軸制御加工によるインペラ形状の創成に挑戦する。また、複雑形状の一種と考えられるアスペクト比が大きく、先端部に大きな質量をもつ形状の加工も実施する。このような形状は加工に伴う切削力で破損しやすく、不安定形状として位置付けられ、普通は設計をしてはいけない形状と考えられるが、加工できれば巧妙加工の一つになり得ると考え、研究に着手する。

4. 研究成果

巧妙加工に関する3年間の研究成果をまとめるにあたり、巧妙加工を分類したものを図1に示す。

難加工形状	超複雑形状
	入れ子形状
	不安定形状
	固定部の無い形状
難加工材料	超硬度材
	超柔難材
難保持・難把持形状	

図1 巧妙加工の分類

この分類にしたがって加工法の研究開発の概要を説明するとともに加工例を示す。

(1) 超複雑形状の加工として複数の曲がった円柱から構成される複雑形状を創成する。この対象形状では荒加工すべき除去体積が大きくなる。そのため、旋削加工を可能な限り行うことで加工時間の短縮を図る。旋削加工のあと、ターンミリングを行う。ターンミリングとは、旋削加工と同じように被削材を回転させながら、回転工具によるフライス加工を行う方法である。旋削加工でもフライス加工でも加工できない部分に関しては、2つの曲り円柱には含まれた領域のうちから干

渉が起こらないものを選択し、被削材の中心軸から曲り円柱に対して生成した接線と平行になるような工具姿勢で切削を行う。

仕上げ加工では、曲り円柱の軸方向に沿った工具経路を生成する。その際、干渉回避のための工具姿勢の修正方向を、あらかじめ曲り円柱の軸方向と周方向に限定することで回避処理時間の短縮を図っている。

開発したCAMシステムを用い、3つの曲り円柱と4つの曲り円柱からなる形状に対して工具経路を生成し、ケミカルウッドで加工実験を行った。図2には良好に加工された曲り円柱を示す

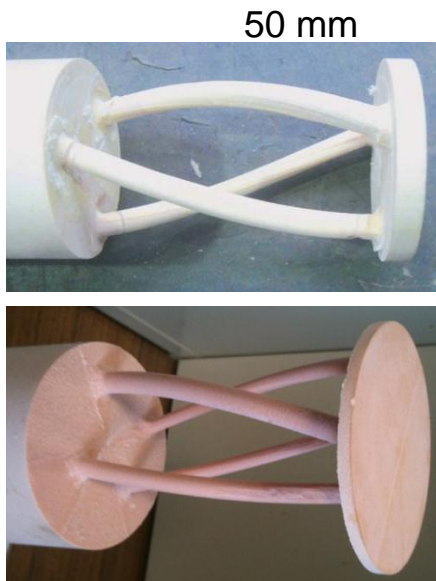
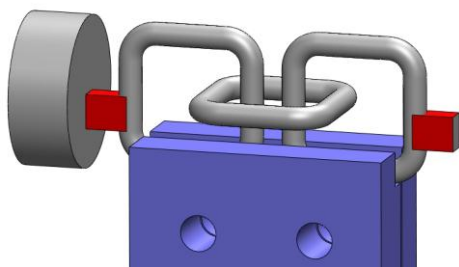


図2 加工された曲り円柱の2例

(2) 一つの部材からリング形状を創成した事例を説明する。リングの数は3つであり、真ん中のリングは最後の切り離しで宙吊りの状態になることを考慮しなければならない。そこで、治具を用意する必要がある。

加工順序であるが、まず3つのリングを結合したままで荒加工を行う。次に、リングの円形外周を仕上げながら干渉を回避しつつ中央リングを切り離す。左右のリングを図のように治具で保持しながら素材から分離させる。この加工の要点はリングの把持法にあり、順序を工夫して創成することにある。中央リングはこのときには自由に動かせる状態になっている。

完成したリング形状は図3のように得られ、1つの素材から創成できた。



(a) 治具によるリングの把持



(b) 加工されたリング形状

図3 リング形状の創成

(3) 入れ子形状の創成を取り上げる。入れ子をもつとは、ある物体の内側に異なる物体が存在し、内側の物体が取出し不可の状態をいう。ただし、外側形状には複数の穴があり、穴はそこから工具を内部に侵入させることができる程度の大きさを有するものとする。図4にその一例を示すが、立方体の中に球を含む形状である。

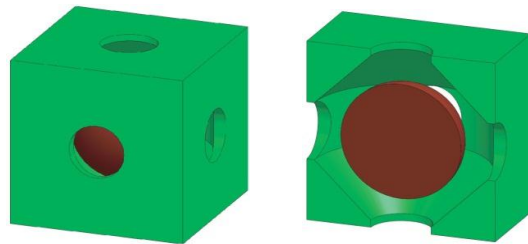


図4 立方体内部に球をもつ入れ子形状

一つの素材から切削加工で入れ子をもつ形状を創成するには以下の点が重要となる。

- ・内側形状と外側形状とを切り離すとき、片側形状を固定する治具の用意
- ・工具と被削材の干渉や機械同士の自己干渉を避けた工具経路の生成法

これらのことを考慮し、治具の設計、加工方法および加工手順の考案、CAMシステムの構築を行った。

考案した加工方法では特殊な工具を用いず、主にボールエンドミルの使用を想定している。加工手順は、まず円柱形状の工作物先端を目標形状の概略に加工し、そのあと、円柱と繋がる主軸側の面以外の5面に穴を開け、その穴から工具を進入させて内側を荒加工する。このとき、内側の形状と円柱工作物とを繋ぐ柱「支持柱」を残す。これは工作物を球と立方体の2つの物体に分離した後、球を独立して回転させることを可能にするもので、仕上げ加工の工具経路を滑らかにできる。仕上げ加工では加工面の精度に影響するため、工具経路の工夫が重要となる。

次に、立方体の主軸側側面に溝入れをすることで球と立方体を分離する。こうすることで支持柱の径を小さくする必要がなくなる。また、このとき主軸から切り離される立方体を固定しておく必要があるため、円柱の先に立方体に合わせたポケットを有し、球と立方体の両方を固定できる治具を用意する。この治具を複合加工機の第2主軸に取り付け、立方体の片端をねじで固定する。

続いて、球の仕上げ加工を行う。球を回転

させることで、一つの穴から加工できる領域が広がり、全ての穴から工具を進入させる必要がなくなり、工具経路の生成が容易となる。さらに、第2主軸がZ軸と平行なA軸をもつことから、立方体をスライドさせることができる。そこで、球と穴の相対的な位置を工具の姿勢に合わせて変化させることで、工具がB軸方向に取りうる姿勢の角度範囲を広げられ、姿勢変化を抑えた工具経路が得られる。最後に治具のポケットに立方体を納め、両形状を固定したあと支持柱を切断し、球の残りの面を仕上げる。

加工実験は、一辺が50mmの立方体で、半径8mmもしくは10mmの穴が5面に開いている形状である。内側の目標形状は半径16mmの球である。工具は荒加工にφ6のスクエアエンドミルを、仕上げ加工にφ4のボールエンドミルを使用した。加工結果を図5に示す。



図5 巧妙に創成された入れ子形状

(4) 不安定形状の加工はこれから加工要求が増えると考えられるが、一般には切削に伴う力によって破損、破壊が生じる。そこで、新しい加工法を考える必要がある。不安定形状の例として図6に細長い柱の先に重い物体をのせたような形状があげられる。



図6 不安定形状の例

切削加工は除去加工であるにも拘らず、支持のためのサポータを付け加えて配置し、不安定状態を解消して所望の形状を、干渉を考えながら加工し、最後にサポータを取り除くという工程で解決するものである。このとき、サポータの大きさと本数などを変えながら構造解析システムを適用し、適切なものを選定する。

不安定形状には様々なものが考えられるが、まだ一般的な解法は得られておらず、最

終年度から手掛けたので、今後、本研究を継続して実施してゆく計画である。図7にはサポータを3本配置して加工した形状と加工後に除去して得た最終形状を示す。



図7 不安定形状の加工例

(5) 難把持・難保持物として柔軟材をあげることができる。柔軟材は把持や保持の難しい材料であり、一般的な金属やプラスチックであれば簡単な加工も、ゴムなどの柔軟物や複雑形状を有する難把持・難保持物となると格段に難しくなる。そこで、簡便で低コストに複雑形状の柔軟材を切削加工する手法を確立することを目的とする。

ゴムなどの柔軟材は、工業部品から日用品に至るまで幅広く利用されている。これらは金型で成形されるのが一般的であるが、多品種少量生産においては非効率である。これに対して、切削加工は様々な材質の工作物を取り扱えるだけでなく、創成できる形状の自由度も高いため、リードタイムが重要となる試作などでの活用が期待できる。しかし、工作物の把持力や切削力に起因する変形や大きな誤差が生じやすいため、これらの柔軟材に関する切削加工特有の問題を解消することが、高精度加工の達成には欠かせない。

ここでは、酢酸ナトリウム水溶液の過冷却状態からの急速な凝固現象を利用し、ウレタンゴムのような柔軟材を適切に把持し、切削加工時の剛性を確保することによって目標形状通りの高精度加工を達成する手法を提案する。酢酸ナトリウム水溶液の中にウレタンゴムを入れ、自然冷却で固化することによって保持する。これを5軸制御のマシニングセンタによって順序を考えながら切削加工を実施する。

図8は加工対象としたワイングラス形状である。ウレタンゴムの素材を固化した酢酸

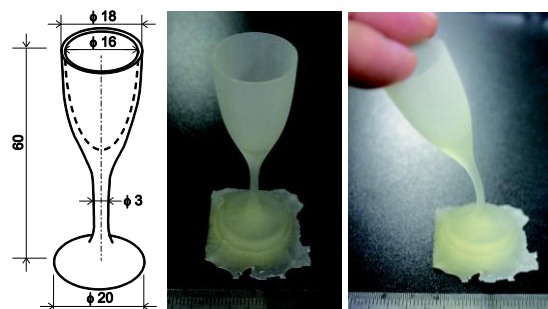


図8 ウレタンゴムのワイングラス加工

ナトリウムで囲み、それを5軸制御マシニングセンタのテーブルに固定し、外部形状を加工する。次に、その周りに酢酸ナトリウム水溶液を注ぎ、固化したうえで内部を切削加工して形状を仕上げる。加工されたガラスは容易に変形することが見てとれる。

ウレタンゴムは柔らかいけれども中身の詰まった固体である。一方、スポンジのように素材の内部に空間をもつような超柔軟材料の加工はさらに困難が伴う。現在、この課題に挑戦している最中である。

以上をまとめると、巧妙加工という新しい分野を提唱し、開発した加工法を説明するとともに実施した加工例を紹介した。巧妙加工を取り込んだ製品は、高機能で高付加価値の工芸的なものになると考える。低価格競争に晒されている昨今の「ものづくり」分野に、別の切り口で新しい息吹を吹き込める可能性があると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① 中本 圭一、植地 亮太、竹内 芳美、把持の難しい柔軟工作物の巧妙加工、日本機械学会論文集 (C編)、査読有、79巻808号(2013) 4535-454
- ② 夏目矩行、中本圭一、石田 徹、竹内芳美：スクエアエンドミルを用いた同時5軸制御加工による中仕上げ加工の高効率化、日本機械学会論文集 (C編)、査読有、78-793 (2012) 3305-3316
- ③ 西山 諒、中本圭一、石田 徹、竹内芳美：マイクロ複雑形状の超精密巧妙加工、日本機械学会論文集 (C編)、査読有、78-792 (2012) 3085-3092
- ④ 濱田大地、中本圭一、石田 徹、竹内芳美：複合加工機用CAPPシステムの開発、日本機械学会論文集 (C編)、査読有、78-791 (2012) 2698-2709
- ⑤ 夏目矩行、中本圭一、石田 徹、竹内芳美：複数の曲がり円柱からなる複雑形状の巧妙加工、日本機械学会論文集 (C編)、査読有、78-786(2012) 697-706

[学会発表] (計6件)

- ① K. Nakamoto, D. Hamada, Y. Takeuchi, Development of CAPP System for Multi-tasking Machining of Complex Shapes, Proc. of 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Matsushima (2013. 11. 8) D018, SD-Card, 527-530

- ② K. Nakamoto, R. Nishiyama, T. Ishida, Y. Takeuchi, 5-Axis Control Ultra-precision Dexterous Micromachining of Möbius Ring, Proc. of 13th EUSPEN Int. Conf., Berlin, Germany (2013. 5. 29) Vol. 2, 64-67
- ③ K. Nakamoto, K. Kubota, T. Ishida, Y. Takeuchi, Development of 5-axis Control CAM System for Multi-tasking Machine Tools, Proc. of 45st CIRP Conf. on Manufacturing Systems (CIRP-CMS2012), Athens, Greece (2012. 5. 17) 266-270
- ④ Y. Takeuchi, Dexterous Machining to Produce Highly value-added workpieces, AIM-HI Symposium (ICAM2012), Jiaoxi, Taiwan (2012. 3. 6) Invited speech
- ⑤ K. Nakamoto, T. Fujimoto, Y. Kawaguchi, T. Ishida, Y. Takeuchi, Dexterous Machining of Chain-Shapes by Employing a Multi-Tasking Machine Tool, Proc. of 15th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT2011), Melbourne, Australia (2011. 12. 1) CD-ROM, 59-62
- ⑥ N. Natsume, K. Nakamoto, Y. Takeuchi: Efficient Tool Path Generation for Five-Axis Controlled Machining by Use of Square End Mill, Proc. of 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Saitama (2011. 11. 9) No. 3282, CD-ROM, 1-4

[図書] (計1件)

- ① 竹内芳美(単著)、多軸・複合加工用CAM、日刊工業新聞社、2013、327ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 芳美 (TAKEUCHI, Yoshimi)
中部大学・工学部・教授
研究者番号：50107546

(2) 研究分担者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)
東京農工大学・工学研究科・准教授
研究者番号：90379339

(3) 研究分担者

石田 徹 (ISHIDA, Tohru)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス部・教授
研究者番号：20313421