

博士学位論文審査要旨

2014年1月7日

論文題目： 工具カタログからのデータマイニングに支援された
ものづくりシステムに関する研究

学位申請者： 児玉 紘幸

審査委員：

主査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	青山 栄一
副査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	辻内 伸好
副査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	廣垣 俊樹

要 旨：

現在のCAMシステムは工具軌跡データ生成のみの支援であり、切削条件の選定は作業者に任されている。切削条件は製造コストや納期、品質などに与える影響が大きいため極めて重要であるが、その決定は未だ熟練技能者の経験に頼る部分が多いため、CAMシステムに組み込めない背景がある。本論文では切削条件の選定を支援できるCAMシステムの開発を目的に、工具メーカーの長年の知識や経験が含まれている工具カタログにデータマイニング手法を適用することを試みている。

本論文は全8章で構成され、第1章において本研究の背景と目的について述べている。第2章ではスクエアエンドミルを取上げ、工具形状の分類には工具剛性に関する有効径を導入して非階層型クラスタ分析を行うのが有効であり、切削条件決定に重要なパラメータ抽出には階層型クラスタ分析が有効であることを示している。第3章では複数メーカーの工具カタログを取上げ、最も重要なパラメータを固定して本手法を適用することで、各メーカーの工具カタログが工具寿命と加工能率のどちらを重視した切削条件であるかを明確にできることを示している。第4章では粗加工用ラジアスエンドミルを取上げ、本手法を粗加工用の工具データに適用することで加工工程別に切削条件決定式を導出できることを示している。第5章では環境負荷への影響を取上げ、環境負荷を考慮する場合には工具寿命を優先した本手法の適用が有効であることを示している。第6、7章では不等リード・ピッチエンドミルとボールエンドミルを取上げ、切削に関与する刃部形状から適切な有効刃長をそれぞれ導入することで、本手法の適用が可能であることを示している。第8章では本研究により得られた知見を総括し、今後の展望について述べている。工具カタログにデータマイニング手法を適用することにより、これまで熟練技能者に頼っていた切削条件の選定を支援できるシステムの構築が可能であることを明らかにしており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2014年1月7日

論文題目： 工具カタログからのデータマイニングに支援された
ものづくりシステムに関する研究

学位申請者： 児玉 紘幸

審査委員：

主査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	青山 栄一
副査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	辻内 伸好
副査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	廣垣 俊樹

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2011年3月に修了し、2011年4月に同博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、砥粒加工学会誌 Vol.55, No.1, pp.42-47, Vol.56, No.3, pp.173-178, Vol.56, No.12, pp.824-829, International Journal of Automation Technology Vol.6, No.1, pp.61-74, International Journal of Advanced Materials and Research Vol.325, pp.345-350, Vol.565, pp.427-477, Vol.797, pp.177-182, 同志社大学理工学研究報告 Vol.53, No.2, pp.19-25, International Journal of Key Engineering Materials Vol.523-524, pp.386-391, 精密工学会誌 Vol.79, No.10, pp.964-969 に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2013年12月26日午後3時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語に関しては本学理工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 工具カタログからのデータマイニングに支援されたものづくりシステムに関する研究

氏名： 児玉 紘幸

要旨：

顧客の要望を満足するため、工業製品はその形状や使用目的、材質など多岐にわたり、それにとまってより複雑な設計がなされているのが現状である。多くの工業製品は CAD (Computer Aided Design) によって寸法形状が設計され、CAM (Computer Aided Manufacturing) によって所望の寸法形状を創生するまでの工具パスが NC (Numerical Control) プログラムとして出力される。日本の現場技術において、これらのプロセスは熟練技能者でなくてもある程度の知見があれば比較的簡単にかつ自動的に実行される。近年の CAM システムでは、非熟練技能者でも比較的簡単に NC プログラムとして工具パスが作成できるように進化してきたことは前述したが、加工に使用する工具の切削条件は自動決定できない。さらに、日本国内の熟練技能者の数は、少子高齢化や他国企業への引き抜きなどに伴い、年々減少しているという問題もある。また、切削時の工作機械や工具の製造、廃棄にとまなう消費電力などを考慮すると製造に伴う環境負荷にも大きな影響を与える。そのことから、環境負荷も含めたこれら各条件を考慮した最適な切削条件や工具形状、加工方法の決定が次世代のものづくり技術発展に寄与する重要な課題である。特に、切削に関する知見の浅い非熟練技能者にとって、最適な切削条件の決定は難しく、それらの決定には試行錯誤的な切削実験を要する場合が多く、相当な時間や被削材料、工具、労働力を無駄にってしまうことの解決が不可欠である。したがって、工具や切削条件の決定を支援するシステムを構築していくことで設計から製造までのプロセスを合理化することができると考えられる。ここで、非熟練技能者は、工具カタログに記載されている切削条件推奨条件表をもとに、条件設定を行なうことが多い。しかしながら、カタログは工具メーカーの工具に対する膨大な知識を集めた加工技術に関する大規模データであるため、工具形状や被削材によって条件が多岐に渡ることから、条件設定に時間がかかり非効率である。またそのようなデータベースを単に参照データとして用いるのではなく、熟練技術者の有する、暗黙知的な切削条件決定に関する知識が集約された情報源として扱うことで、そこから切削条件決定に有意な知見を抽出していくことが可能であると考えられる。

そこで本研究では、工具メーカーの長年の知識や経験が含まれた膨大な情報を有する工具カタログデータに注目し、データマイニング手法を適用することを試みた。ひとつのデータマイニングシステムとして、これまで気付かなかった切削条件決定に関する新しい知識を発掘するカタログマイニングシステムを提唱することによって、切削加工の中でも代表的に用いられるスクエアエンドミル、ボールエンドミルに対して、金型鋼や他の推奨条件の導出し難い未知材料、難削材料でも非熟練技能者にとってある程度指針となる切削条件が決定可能な支援システムを構築する。さらに提案するカタログマイニングシステムの適用による製造工程における地球環境への影響評価も遂行する。

第1章では、前述のとおり、研究の背景を述べるとともに、切削条件決定に関する現状と課題、データマイニングシステムの成り立ちと応用例および論文の構成を述べた。

第2章では、工具カタログデータに対して、非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたデータマイニング手法を適用し、切削条件を導出できるシステムについて考察した。非階層クラスタリングによって、全体の工具カタログデータを特徴的な工具形状や切削能力の観点からクラ

スタ分けすることができた。また階層クラスタリングによって、変数間の相関関係をビジュアル化でき、解析者によるパラメータ選択を容易にした。特に非階層クラスタリングである K-means 法において、単に工具形状パラメータをクラスタ分けの変数として使用するのではなく、切削能力に関係するスクエアエンドミル刃部の工具形状を表すパラメータとして、相当径 D_e を導入する手法を開発した。その結果、非熟練技能者を支援できるシステムとして、工具カタログデータに非階層・階層クラスタリング手法を適用することは、切削の初期段階で目安となる切削条件の導出に有効であることがわかった。

第3章では、新しいデータマイニングの使用法として、切削条件決定の際に重要なパラメータとして選択されることが自明であると考えられる変数を固定（工具外径 D を $\phi 10$ ）する手法を試みた。その結果、自明な変数を説明変数から除外することにより、切削工具メーカーごとの切削条件設定の特徴を抽出することが容易となることがわかった。カタログマイニングにより導出された切削条件決定式は単にカタログ値を予測する精度が重要ではなく、工具寿命重視または加工効率重視など、切削条件を変更しようとする際に重要な指針となることがわかった。さらにその目安を示す可視化線図を提案できた。また、目的変数の中で、速度の次元を有する変数が重要で、その中でもとくに切削速度の導出が困難であり、切削条件決定において重要になることがわかった。

第4章では、提案する手法により、金型鋼の高速粗加工に適したラジラスエンドミルの切削条件を導出した。導出されたマイニング条件とカタログ条件、エキスパート条件（複数名の熟練技能者の試行錯誤的な現場の実験によって導かれた条件）について、材料除去率と加工面粗さの観点から比較検証した結果、カタログマイニングシステムによって導出された粗加工用切削条件は、最適な切削条件決定に至るまでの指標として実用的であることがわかった。

第5章では、カタログマイニングによって導出された切削条件決定式の特徴を考察するため、実験計画法にもとづいて工具寿命実験、消費電力測定実験を行い、その実験結果から環境への影響を定量的に評価する手法である LCA（Life Cycle Assessment）を用い、本システムの有効性を検討した。従来は考慮されることのなかった工具の消耗に起因する環境負荷を考察した。その結果、累積環境負荷の低減を目的とした最適条件を得ることができた。また、切削効率 MRR （Material Removable Rate）が大きくなるほど寿命係数は大きくなり、消費電力量は小さくなった。累積環境負荷を抑えるには工具に起因する環境負荷を抑えることが重要であり、加えて工作機械の消費電力量も考慮する必要があることがわかった。さらに習熟曲線を考慮することにより、マイニング条件を用いることで初期段階の時間や工具、電力消費を削減できる有効性が示された。また、カタログには正確に切削条件が記載されていない溝加工においては、マイニング条件を用いることで明確な切削条件を得ることもできた。

第6章では、難削材加工用の工具カタログに対して、カタログマイニング手法を適用することにより、切削条件決定式の導出を行い、切削温度のモニタリングの観点から、マイニング条件の有用性を評価した。また不等リード・ピッチエンドミルを考慮するための新たな変数として、刃のねじれ角の差に着目した有効刃長 l_e を非階層クラスタリングに導入しカタログマイニングを遂行した。さらに、切削条件決定式の導出に2次の応答曲面法を適用することによって、速度成分因子である切削速度や送り量の条件式の精度が向上できた。その結果、相当刃長 l_e を K-means 法において導入することにより、効果的に不等ピッチ・リードエンドミルと汎用エンドミルをクラスタ分けすることが可能になった。他社の工具カタログにおいても、提案する手法の有用性を示せたことから、その提案手法の一般性を確認できた。また切削速度に関しても予測式に2次の応答曲面法を用いることで、各難削材ごとに指針となる切削条件を定量化できた。

第7章では、工具カタログデータの複雑な組み合わせで決定されるボールエンドミルの条件設定に対して考察した。その結果、非階層クラスタリングにおいて、新たにエンドミルボール部（R部）の特徴を定量化する相当刃長 l_e' を導入することで、切削条件決定の導出式に有意なクラスタ

を導くことができることがわかった。カタログ推奨値と導出式の値（マイニング推奨条件値）を比較することで、切削条件の変数間において、使用可能な変数の範囲の目安を明確化できた。カタログマイニングシステムによって工具カタログデータから抽出された切削条件決定に有意な変数で構成される切削条件決定式を用いることによって、カタログに記載されていない推奨条件が未知の材料でも、迅速かつ効率的に実用的な切削条件の導出が可能となった。

第8章では、本研究で得られた知見および結論を総括した。

以上、工具カタログデータに対して、非階層・階層型のクラスタリング手法を適用したカタログマイニングを適用した結果、金型加工の工程設計において粗加工から中粗加工までを内包した、非熟練技能者にとって指針となるスクエアエンドミルおよびボールエンドミルの切削条件の導出が可能となった。スクエアエンドミルを対象とした粗加工においては、カタログマイニングによって導出される推奨条件を用いることにより、切削の初期段階で行われる試行錯誤的な実験を削減できるため、環境影響負荷を低減することが可能になることが示せた。またカタログマイニングの結果、金型鋼以外にも、超耐熱合金などに代表される難削材料に関して、切削の初期段階で実用的な切削条件の導出が可能となることが示せた。