

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420081

研究課題名(和文) 基本形状配置による機械部品の製造性・安全性などの高速な評価

研究課題名(英文) Fast Producibility and Safety Evaluation of Products by Placing Geometric Primitives

研究代表者

乾 正知 (Inui, Masatomo)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90203215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：日本の製造業は、機械製品を低コストで供給する必要に迫られている。多種多様な製品を迅速に市場に投入するためには、製品の製造性などをできるだけ早い時期に評価し、製造が容易な製品を、手戻りの無駄なく設計する仕組みが重要となる。製品の製造性に関する条件の多くは、球や円筒などの基本形状を、製品の立体モデルの内部や周囲に配置する問題として統一的に評価できる。本研究では、この考え方に基づいて製品の製造性などを高速に評価する並列処理アルゴリズムの開発と、GPU(Graphics Processing Unit)を用いた処理プログラムの実装を行った。開発したプログラムを企業に提供し、実際的な性能評価も行った。

研究成果の概要(英文)：Japanese manufacturing industry is strongly requested to produce products with sufficient functions in a reasonable price for new customers in emerging markets. For manufacturing such products, evaluation of their producibility in early design stage is indispensable, otherwise problems are detected in the late manufacturing preparation stages and costly re-works become necessary. We found that most of the constraints relating to the producibility can be evaluated in a uniformed manner by placing simple geometric objects such as spheres, cylinders and cones in the internal side or external side of the geometric model of the products. In this research work, we developed new parallel algorithms for evaluating the producibility based on the concept mentioned above. We also developed parallel processing software systems using graphics processing unit (GPU). Developed software is provided to some leading manufactures in Japan for evaluating their functions with real products.

研究分野：CAD/CAM工学

キーワード：CAD CAM 図形処理 加工性評価 安全性評価 GPU 並列処理

## 1. 研究開始当初の背景

日本の製造業は、先進国向けのハイエンド製品だけでなく、新興国の中間所得者層向けに、機能を絞り込んだ製品を安価に供給する必要に迫られている。ハイエンド製品からローコスト製品まで、多種多様な製品を迅速に市場に投入するために、わが国の企業は製造プロセスの徹底した効率化を進めている。そのためには、コンカレント・エンジニアリングの考え方に基づいて、設計時に部品の機能だけでなく部品の製造性（製造しやすさ）や安全性などを評価し、製造プロセス下流で問

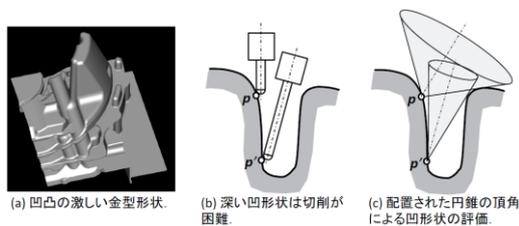


図1 円錐の配置による凹形状の評価。

題や手戻りの無駄が生じない製品を、確実に設計する仕組みが重要となる。

設計段階では、製品の詳細や加工法が未定なことが多く、製造性や安全性の精密なシミュレーションは困難である。また時間を要するシミュレーションは、設計者の集中を阻害し業務の妨げになってしまう。そのため部品の形状情報だけから、その部品の製造しやすさなどを定量的に評価する指標が求められている。申請者は、多くのメーカーと製造支援ソフトウェアに関する共同研究を進める過程で、このような指標の一つとして、部品内部や周囲の空間への球や円錐などの基本形状の配置のしやすさや、配置された形状間の特徴量の比較が有効であることを発見した。

例えば金型の製作では、深い凹形状は切削加工が困難なため、コストと時間を要する放電加工を用いることになる（図 1(a, b)参照）。この凹形状の深さの度合いは、金型表面にそ

の頂点を接するように配置された円錐の頂角の大きさを評価できる。図 1(c)に示すように、より大きな頂角の円錐が配置できる部分ほど、言い方を替えれば円錐が配置しやすい部分ほど、凹みが浅く切削加工しやすい形状と見なせる。射出成形におけるプラスチック部品の成形性や自動車内装部品の安全性なども、部品の内外に多数の球や円筒、円錐を配置することで評価できる。

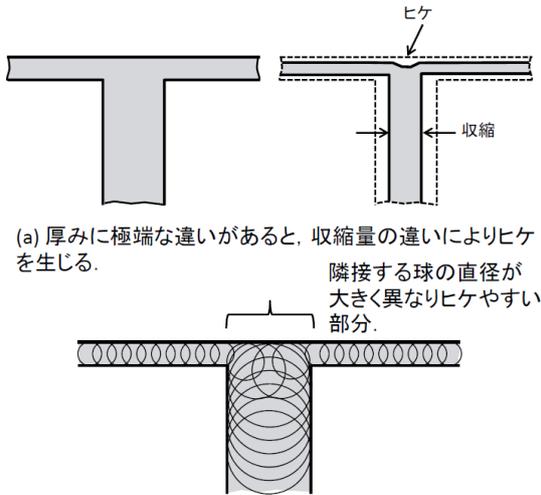
## 2. 研究の目的

本研究の目的は、球や円筒、円錐などの基本形状の配置という統一的な手法を用いて、製品の製造性や安全性などを高速に評価する並列処理アルゴリズムの開発と、GPUを用いた処理プログラムの実装、そして開発したプログラムの実的な性能評価を行うことである。具体的には、以下に示す3つの技術の開発と実用性評価を行う。

(1) 基本形状の配置により製造性や安全性が評価できる事例の収集

既にこれまでの研究で、上述した切削加工のしやすさ以外にも、射出成形におけるプラスチック部品の成形性→部品内部への球の配置、自動車内装部品の安全性→部品外部へのφ165mmの球の配置、機械製品のメンテナンス性→部品外部への円筒の配置、自動車部品の吸音性→部品内部への球の配置など、基本形状の配置により評価可能な事例がかなり収集されている。図 2 には、球の配置によりプラスチック部品の成形性を評価した例を示す。プラスチックの冷却時の収縮量は厚みに比例するため、極端に厚みの異なる部分が隣接していると、その部分にヒケと呼ばれる凹みが

生じてしまう。部品の厚みは内接球の直径と



(b) 部品に内接する球による厚み評価とヒケの検出。

図2 内接球による成形性(ヒケ)の評価。

一致するので、ヒケの生じやすい形状は、隣接する球の直径が極端に異なる部分として抽出できる。同様の事例はまだ多数あると思われる。企業への聞き取り調査などを行い、基本形状の配置で製造性や安全性などが評価できるケースをさらに収集する。

(2) 配置アルゴリズムの開発と GPU を用いた実装

設計者がストレスを感じることなく製造性や安全性を評価するためには、処理プログラムが十分に高速な必要がある。コンピュータ技術は、GPU のようなメニーコアのハードウェアを用いて、並列処理により高速化する方向へ進歩している。上述した切削加工性の評価や成形性評価の事例からも分かるように、本研究の提案する手法では、立体モデル表面の多数の点に、内接する最大径の球や最大頂角の円錐を配置する処理が繰り返し行われる。この処理は個々の点について独立に行われるので、GPU を用いて並列処理することで、通常の CPU 処理と比較して 10~20 倍程度の高速化が期待できる。そこで本研究では、基本

形状の配置を並列処理するアルゴリズムの設計と、それを GPU で実行するプログラムの作成を行う。

(3) 配置された基本形状の特徴量の表示と出力

配置された基本図形を表示するだけでは、部品の製造性や安全性の直感的な理解は難しい。そこで基本図形の特徴量を部品の立体モデル表面にマップすることで、製造性や安全性に問題がある形状を設計者が即座に判断できるようにする。上述した加工性評価の事例では、立体表面の各点を、そこに頂点を接する円錐の頂角に応じた色で塗り分けることで、凹形状の度合いを直感的に把握できる。またプラスチック成形品の場合には、やはり各点を内接球の直径に応じた色で塗り分ければ、急激な厚み変化が生じておりヒケが発生しやすい箇所を、設計者が容易に理解できる。同様の表示技術を (1) で収集した各事例について検討する。

### 3. 研究の方法

図 3 に本研究の概要とスケジュール・役割分担を示した。研究内容は図中の (1)~(3) の 3 つに大別され、研究はほぼこの順序で進行する(具体的な内容は後述する)。研究の進展とともに研究内容は随時見直しを行う。

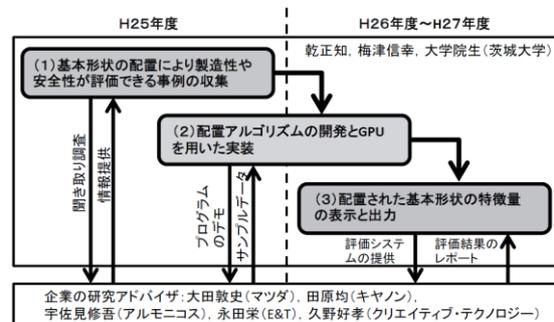


図3 本研究の概要とスケジュール・役割分担。

平成 25 年度は、基本形状の配置により製

造性や安全性を評価できる事例の収集と、各事例について基本図形を配置する並列処理アルゴリズムの開発と GPU を用いて処理を行うプログラムの実装を中心に研究を進める。企業の研究アドバイザーの力を借りて、徹底した聞き取り調査を実施し、同様の手法で解析可能な性質をできるだけ収集したいと考えている。平成25年度後半から、配置アルゴリズムの開発とプログラムの実装に着手する。既に定式化の終了している切削加工性評価（円錐の配置）、成形性評価（球の配置）、安全性評価（球の配置）から、アルゴリズム開発とプログラミングを開始することを予定している。本研究の提案する手法は、球や円錐などの単純な形状を多数配置するというものであり、本質的に並列処理と相性がよい。特に近年発展と普及が目覚ましい GPU を利用して並列処理を行うと、通常の CPU を用いる場合よりも処理を格段に高速化できる。なおプログラム作成の際に必要なサンプルデータについては、研究アドバイザーの所属企業から提供を受ける。

残り2年間の前半は、引き続き配置アルゴリズムの開発と GPU を用いたプログラムの実装を中心に研究を行う。特に前年度に収集された新しい事例について集中的に作業を進める。その後は、配置された基本形状の特徴量の表示と出力に研究の主軸を移す。機械設計に用いる CAD システムでは、CAE 解析の結果を CAD モデル表面のポリゴンにレンダリングすることが一般的となっている。そこで本研究でも、製造性や安全性などを評価した結果、問題ありと認識された部分の周囲のポリゴンを色分け表示することを予定している。図4には、表示のイメージとして、準備研究で作成したプログラムを用いて凹形状を

抽出し、その周囲のポリゴンを色分け表示した様子を示す。また図5には、立体の厚み評価を行い、一定値より厚みが多い形状を抽出し、その周囲のポリゴンを色分け表示した結果を示す。

#### 4. 研究成果

(1) 平成25年度は、基本形状の配置により製造性や安全性を評価できる事例の収集と、各事例について、基本図形を配置する並列処理アルゴリズムの開発と GPU を用いて処理を行うプログラムの実装を中心に研究を行った。平成25年度前半には、企業の研究アドバイザーの力を借りて、さらに徹底した聞き取り調査を実施し、同様の手法で解析可能な性質の収集を行った。具体的には、工程設計における工具選択、機械部品の組み立て性評価、切削シミュレーション中の切削負荷の解析が、同一形状を多数配置する手法やその拡張で処理可能なことが判明した。年度後半には、配置アルゴリズムの開発とプログラムの実装を行った。既に定式化の終了している切削加工性の評価（円錐形の配置）、成形性評価（球の配置）、安全性の評価（球の配置）から、アルゴリズム開発とプログラミングを開始した。本研究の提案する手法は、球や円錐形などの単純形状を多数配置するというものであり、本質的に並列処理と相性がよい。幾つかの事例について GPU を用いて実装し性能評価したところ、処理速度を10倍程度向上させることに成功した。

(2) 平成26年度は、基本形状の配置により製造性や安全性を評価するプログラムの開発と、それらを企業に持ち込んでの実用性評価を中心に研究を行った。昨年度開発したアルゴリズムに基づいて、以下の3種類のプ

プログラムの実装を行った。

①機械部品内部の厚みや外部の隙間を評価するプログラム：立体の内部や外部に球を配置し、厚みや隙間量を評価するプログラムを実装した。

②機械部品のシャープなエッジを検出するプログラム：立体の各辺に微小な楔形状の配置を試み、配置の可否に基づいてシャープエッジを判別するプログラムを実装した。

③自動車内装部品の安全性基準の一つであるECE-21を評価するプログラム：立体表面に球や円筒形、正三角形を配置しそれらの和形状を算出するプログラムを実装した。開発したプログラムは研究室内でテストするだけでなく、研究成果に興味を持つ企業に積極的に貸し出し、実務の場において性能評価を行った。

(3) 平成27年度は、昨年度に引き続き、基本形状の配置により製造性や安全性を評価するアルゴリズムの開発とGPUによる並列処理を用いたプログラム化、そしてそれらを企業に持ち込んでの実用性評価を中心に研究を行った。具体的には以下のアルゴリズムを実現した。

①自動車の安全性評価アルゴリズム：インストルメントパネルの表面において、ドライバーの膝が衝突する部分を高速に検出するアルゴリズムを開発した。

②立体内部の厚み解析アルゴリズム：立体内部に多数の最大内接球を配置する問題を高速に解決するアルゴリズムを開発した。またこの手法を改良し立体モデルの薄肉部を可視化するアルゴリズムを開発した。

③金型形状における薄壁形状の検出アルゴリズム：プラスチック部品の成形では、材料を高圧で金型内部に射出するため、薄い壁は変形して成型不良を起こしてしまう。部品形状

の外部の距離場を解析することで、金型の薄壁に相当する部品上の狭い溝を検出するアルゴリズムを開発した。

④砥粒加工のシミュレーションアルゴリズム：砥粒加工は多数の微小な球が部品表面を削り取る処理と見なすことができる。この考え方に基づいて、ウェハー表面の研削結果を高速に可視化するアルゴリズムを開発した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7件)

- ① **Nobuyuki Umezu, Kazuki Asai, and Masatomo Inui**, 『Wavelet Transform Data Compression with an Error Level Guarantee for Z-Map Models』, International Journal of Automation Technology, pages 201-208, doi:10.20965/ijat.2016.p0201, 2015, 査読有
- ② **Masatomo Inui, Nobuyuki Umezu, and Ryohei Shimane**, 『Shrinking sphere: A parallel algorithm for computing the thickness of 3D objects』, Computer-Aided Design & Applications, pages 199-207, doi:10.1080/16864360.2015.1084186, 2015, 査読有
- ③ **Masatomo Inui, Nobuyuki Umezu, Kazuma Wakasaki, and Shunsuke Sato**, 『Thickness and clearance visualization based on distance field of 3D objects』, Journal of Computational Design and Engineering, Volume 2, pages 183-194, doi:10.1016/j.jcde.2015.04.001, 2015, 査読有
- ④ **Masatomo Inui, Nobuyuki Umezu, and Yuuki Kitamura**, 『Visualizing sphere-contacting areas on automobile parts for ECE inspection』, Journal of Computational Design and Engineering, Volume 2, pages 55-

66, doi:10.1016/j.jcde.2014.11.006, 2014, 査読有

- ⑤ Masatomo Inui, Nobuyuki Umezū, and Hidekazu Kamei, 『Automatic detection of the optimal ejecting direction based on a discrete Gauss map』, Journal of Computational Design and Engineering, Volume.1, pages 48-54, doi:10.7315/j.jcde.2014.005, 2014, 査読有
- ⑥ Masatomo Inui and Nobuyuki Umezū, 『Fast Detection of Head Colliding Shapes on Automobile Parts』, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Volume.7, pages 818-826, doi.org/10.1299/jamdsm.7.818, 2013, 査読有
- ⑦ Masatomo Inui, Nobuyuki Umezū, and Yuuki Shinozuka, 『A Comparison of Two Methods for Geometric Milling Simulation Accelerated by GPU』, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Volume 26, pages 95-102, doi.org/10.5687/iscie.26.95, 2013, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Masatomo Inui, Nobuyuki Umezū, and Masahiko Tadaki, 『Thinning Algorithm of Front Grille Part Shape for Air Flow Analysis』, Asian Conference on Design and Digital Engineering, ACDDE 2015, November 4-6, 2015, Kitakyushu International Conference Center (Kitakyushu, Fukuoka, Japan), 査読有
- ② Masatomo Inui, 『Data Conversion From Dixel Model to B-reps Solid Model』, Best Paper Award, 15th International Conference on Precision Engineering, ICPE 2014, July

23-25, 2014, Hotel Nikko

Kanazawa( Kanazawa, Ishikawa, Japan), 査読有

- ③ Masatomo Inui, Nobuyuki Umezū, and Koudai Kobayashi, 『Parallel Distance Field Computation with GPU and Its Application for Evaluating Part Thickness』, ISCIE/ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation, ISFA2014, July 14-16, Awaji Yumebutai International Conference Center (Awaji-Island, Hyogo, Japan), 査読有

[図書] (計 1 件)

- ① 乾 正知, 技術評論社, 『GPU 並列図形処理入門』, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

乾 正知 (Inui Masatomo)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：9 0 2 0 3 2 1 5

### (2) 研究分担者

梅津 信幸 (Umezū Nobuyuki)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：3 0 3 1 2 7 7 1

### (3) 連携研究者

無し

### (4) 研究協力者

無し