

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06075

研究課題名(和文) 超高解像度の格子ベース表現モデリングの実現

研究課題名(英文) Realization of Ultra High Resolution Grid-Based Shape Modeling

研究代表者

乾 正知 (Inui, Masatomo)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：90203215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：機械製造の分野で、立体形状を空間に配置された直交格子に基づく微小な立方体(ボクセル)や直方体(デクセル)群で表現する、格子ベース表現モデリングの利用が増加している。格子ベース表現では、格子の解像度を上げるほど高精度な処理が可能になるが、現状では縦横1万×1万の解像度の格子を用いたデクセルモデルが限界となっている。本研究の目的は、解像度を桁違いに向上させた、超高精度なデクセルモデリングを実現することにある。本研究が成功すれば、処理が安定かつ高速なデクセルモデリングを、精度が要求される計算でも利用できることになり、図形処理ソフトウェアの現状を大きく変える可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立体モデリングは、製造支援だけでなく、医療や映像制作等でも多用される基盤的な情報処理技術だが、現在最も普及している境界表現法は、位相要素間の複雑な接続関係の管理が必要なため並列化が難しく、処理も不安定になりがちなため常に利用者を悩ませてきた。超高解像度の格子に基づく処理が実現できれば、処理が安定かつ高速なデクセルモデリングを、あらゆる図形計算で利用できることになる。「ものづくり」を経済基盤とする日本にとって、製造支援ソフトウェアは重要な産業ツールと言える。本研究により超高解像度なデクセルモデリングが実現できれば、製造支援ソフトウェアの技術動向に変化が生じ、日本企業の参入機会の増加が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the field of machine manufacturing, the use of grid-based shape representation, in which a solid shape is represented by a group of small cubes (voxels) or rectangular parallelepiped (dexels) based on an orthogonal grid arranged in space, is increasing. In the grid-based representation, the higher the resolution of the grid, the higher the representation accuracy of the shape becomes possible, but at present, the dixel model based on a grid of the resolution of 10,000 × 10,000 is a limit. The purpose of this study is to realize the accurate dixel modeling using much higher resolution grid. If this research is successful, stable and fast dixel modeling can be used even in computations where accuracy is required, which may greatly change the present state of geometric processing software.

研究分野：生産システム工学

キーワード：立体モデリング 格子ベース表現 並列処理

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

立体形状の生成・変形などの処理を行う立体モデリングは、機械製品の製造支援ソフトウェアの基盤技術と言える。立体モデリングの主流は、表面を覆う面・辺・頂点などの位相要素の接続を記録・管理する境界表現法 (B-reps) だが、近年、立体内部を微小な立方体 (ボクセル) や直方体 (デクセル) 群で表現する手法の研究や利用が増加している。ボクセルやデクセルは座標空間中の直交格子に基づいて定義されるため、以降ではこれらを「格子ベース表現」と総称する。

格子ベース表現は境界表現法と比べて処理が安定しており、並列処理による高速化が期待できるため、今後さらに利用が増えると予想される。われわれは 1990 年代から格子ベース表現モデリングの研究を開始し、デクセルを利用した切削加工シミュレータや工程設計支援システムなどの成果で高い評価を得てきた。国外ではノースカロライナ大学、UC バークレー、香港科技大学において、活発な研究が行われている。

この手法では、格子の解像度を上げるほど高精度な処理が可能になるが、現状では縦横 1 万×1 万の解像度の格子を用いたデクセルモデルが限界となっている。このような状況を踏まえ、解像度を桁違いに向上させた、超高解像度の格子ベース表現の立体モデリングを実現するために必要な基礎技術を確立することが、本研究の最終的な狙いである。仮に解像度 100 万×100 万の格子に基づくデクセルモデルが実現できれば、1m 四方の広がりを持つ立体を 1 μ m 単位で表現でき、立体モデリングのほとんど全ての用途を、格子ベース表現で扱えることになる。

2. 研究の目的

格子ベース表現のうち、立体を直方体の集合で表現するデクセルモデルには、ボクセルモデルと等価な形状を、より少ないメモリーで記録できるという特徴がある。デクセルを通常の Z 軸方向だけでなく、X 軸や Y 軸方向にも用意する 3 方向デクセルを用いると、形状をさらに高精度に表現できる。このような理由から、今回は処理対象をデクセルモデルに限定する。立体を解像度 $n \times n$ のデクセルモデルで表現すると、必要なメモリー量は kn^2 に比例する。ここで k は 1 格子あたりのデクセル数を表しており、通常 $k \approx 10$ である。形状の記録には、1 デクセルあたり 2 個の数値が必要なので、 $n = 1$ 万のとき必要なメモリー量は 8GB 程度となる。ところが解像度を 1 桁向上させ $n = 10$ 万にすると、デクセル数は 100 倍となり必要なメモリー量も 800GB に跳ね上がるため、処理の手間と必要なメモリー量の両面で処理は格段に難しくなる。そこで本研究では、超高解像度なデクセルモデリングへの第一ステップとして、実用的な時間で 10 万×10 万を超える解像度のデクセルモデルを処理できるシステムを、3 年間で実現することを目指した。

3. 研究の方法

このようなデクセルモデリングの実現には、マルチコア CPU やメニーコア GPU、PC クラスタによる並列処理が前提となるが、さらに以下に示す 2 つの技術が必要と考えた。

(1) データ圧縮の併用: 現状では、800GB ものデータをメモリー上に保持できない。そのためモデルを常に圧縮した状態で保持し、必要な部分のみ展開して処理を行い、その後再圧縮する仕組みが必要となる。データ圧縮は、モデルをハードディスクに保存する際や、PC 間でモデルをやり取りする際にも必須となる。超高解像度なデクセルモデルでは、隣り合った 2 つの格子におけるデクセルの配置は非常に似たものとなる。われわれはこのデクセル間の類似性 (コヒーレンス) に基づいて、Wavelet 変換を利用した精度保証付きの圧縮アルゴリズムを開発しており、形状の劣化を防ぎつつサイズを 1% 以下まで縮小できる。今回はこの圧縮アルゴリズムをデクセルモデルの集合演算に組み込み、部分的にモデルを展開しては処理を行い、その後再圧縮して保存するソフトウェアの実現を目指した。

(2) コンパクトな表面抽出: 立体モデリングの主流は境界表現法なので、デクセルモデリングを既存システムと併用するには、境界表現モデルからデクセルを得る処理と、逆にデクセルモデルから立体表面を抽出する処理が必要となる。デクセルモデルでは回転や平行移動が困難なので、境界表現モデルとの相互変換は移動処理のためにも必須と言える。特に重要な立体表面の抽出に関する従来の研究は、粗い解像度の格子ベース表現モデルから高品質な境界表現モデルを生成することに主眼があった。一方、超高解像度のデクセルモデルからの表面抽出では、十分に細かい膨大なデクセルの集合から、いかにして高精度かつコンパクトな境界表現モデルを得るかが問題となる。われわれは既に Quad Pillars と呼ばれる、デクセルモデルのポリゴン化アルゴリズムを実現している。今回はデクセル間のコヒーレンスを利用して、精度を維持しつつポリゴン数を大幅に削減する改良を、このアルゴリズムに加えることにした。

4. 研究成果

上述のように、本研究は「データ圧縮を併用した処理」と「コンパクトな表面抽出」を目的にスタートしたが、以下に示す理由により、研究は途中から大きく方針を変えることとなった。

- 高精度な形状表現の新手法の考案: デクセルモデルでは、座標平面上に与えられた直交格子に基づいて定義された、X, Y, Z 軸と平行なデクセル群で立体形状を表現する。直交格子の解像度を高めることで形状の表現精度を向上させることを考え研究を開始したが、研究の過程で、デクセルの利用方法を工夫することで、解像度を上げなくても形状の表現精度が向上できることが分かってきた。この新手法の有効性を検証することは、従来の研究方針を維

- 持することよりも重要と考え、研究方針を一部変更することにした。
- デクセルモデルのアプリケーション開発：我々の提唱する GPU による並列処理機能で加速されたデクセルモデリング技術は、既に国内の様々な企業で利用されている。そのため我々は、常に企業での技術ニーズを把握しつつ研究を進めている。特に加工シミュレーション技術の高性能化については企業ニーズが高く、デクセルモデルの圧縮化よりも先に研究を進めるべき、という判断に至った。そこで 3 方向デクセルモデルを利用し、加工中の工具と工作物の接触エリアを GPU の並列処理を用いて高速かつ高精度に計算する技術を先に研究することにした。

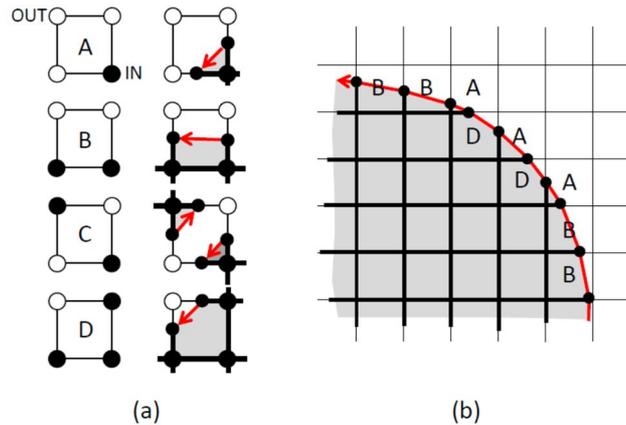


図 1 平面上の格子に基づく図形表現．4 頂点の内外判定に基づく格子の分類(a)と，分類結果に基づいて格子モデルの周囲に生成された輪郭線(b)．

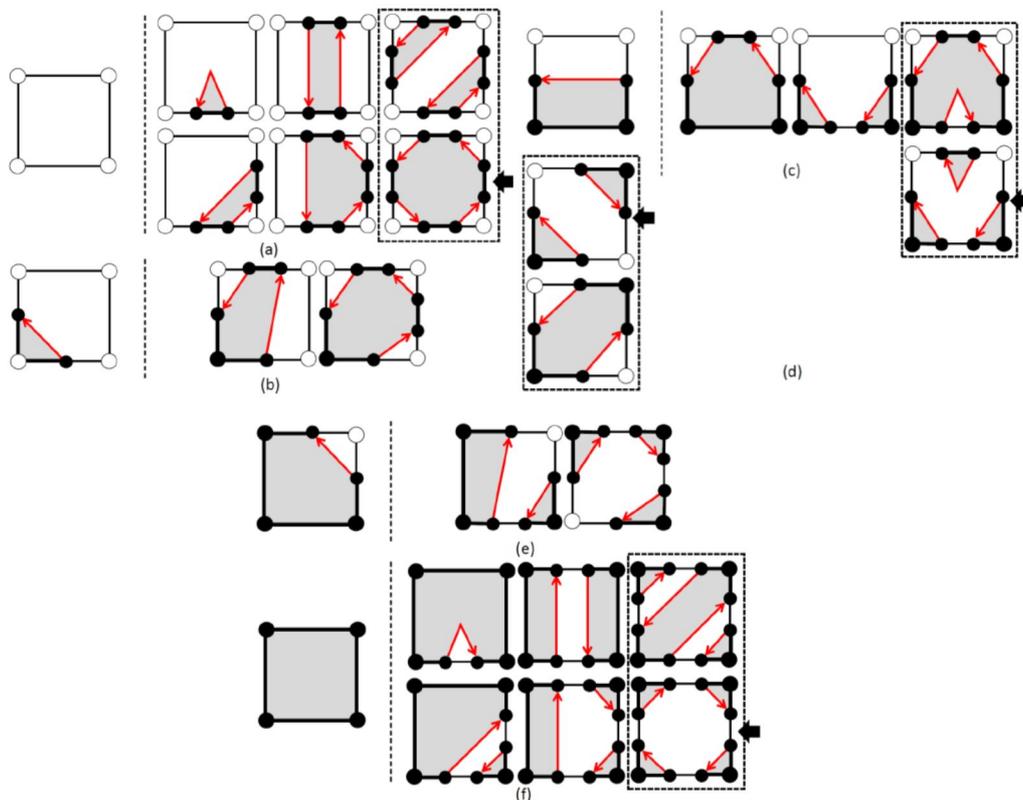


図 2 セル上の微小な辺や隙間を考慮した新しい輪郭線の生成手法。

以下、研究成果について具体的に述べる。

(1) デクセルモデルの高精度化なポリゴン化 [1]

デクセルモデルは、形状を直方体群で表現するため、そのままでは機械設計で重要となる立体の表面形状が扱えない。そこでデクセルモデルを、境界表現モデルに変換するための技術が色々と研究されてきた。従来手法では、デクセルモデルに格子構造をあてはめ、格子点の内外判定の結果に基づいて格子構造内部にポリゴンを生成することで、デクセルモデルをポリゴン群に変換する。われわれの開発した Quad Pillars アルゴリズムもその一手法と言える。このような手法では、セル上の微小なデクセルやデクセル間の隙間が無視されてしまうため、形状の微細な変化が表現できなかった。この問題を回避するためには、セルをさらに細分化する必要がある、とい

うのが当初の我々の考えであった。

我々はこの考え方を改め、従来見過ごされてきたセル上の微小な辺や隙間も考慮して形状を表現する新しい手法を考案し、まずは2次元図形の表現に適用した。図1には、平面上に配置されたX軸方向のデクセルとY軸方向のデクセルで表現された2次元図形を、従来手法でポリゴン化した様子を示した。従来手法では、デクセル群に直交格子をあてはめ、図1(a)に示したように各セルの4つの頂点の内外判定に基づいて、セル内部に線分を配置し図形を表現する。

図2には我々が導入した新しいセルの分類法と、各分類に応じた図形表現の手法を示した。この手法を用いると、メモリー量を増やすことなく図形の表現精度を向上させることができる。分類パターンが増加すると処理の組み合わせも増えることになるが、パターンの記録方法と各パターンに応じた処理の起動方法を工夫することで、処理時間が増加しないアルゴリズムを考案した。このアルゴリズムを用いて、NC加工のための等高線経路を計算するソフトウェアを実装し、幾つかの計算実験を行いその有効性を検証した。実装には VisualStudio 2017 と OepnMP を利用した。また計算実験には Core i7 (2.6GHz), 32GB メモリーを搭載した 64 ビット PC を使用した。

開発したソフトウェアを用いて、金型モデル加工用の工具経路を生成した。対象工具として、ボールエンドミル(10mm), フラットエンドミル(10mm), ラジラスエンドミル(10mm, コーナー半径2mm)を用いている。経路は等間隔に設定された250個の高さについて計算した。図3には計算された工具経路の一例を示した。計算によって得られた等高線状の工具経路を用いて、立体モデルの仮想的な切削加工を行い加工精度の測定を行った。加工結果のモデル表面に1500万~3000万個の点を配置し(点間の距離は0.1mm~0.3mm), それらの点においてシミュレーション結果と与えられたCADモデルの形状誤差を測定した。その結果, 10ミクロンを超える削り込みが生じている箇所は皆無であった。このことから我々が開発したデクセルモデルの変換手法は非常に高精度であることが分かった。

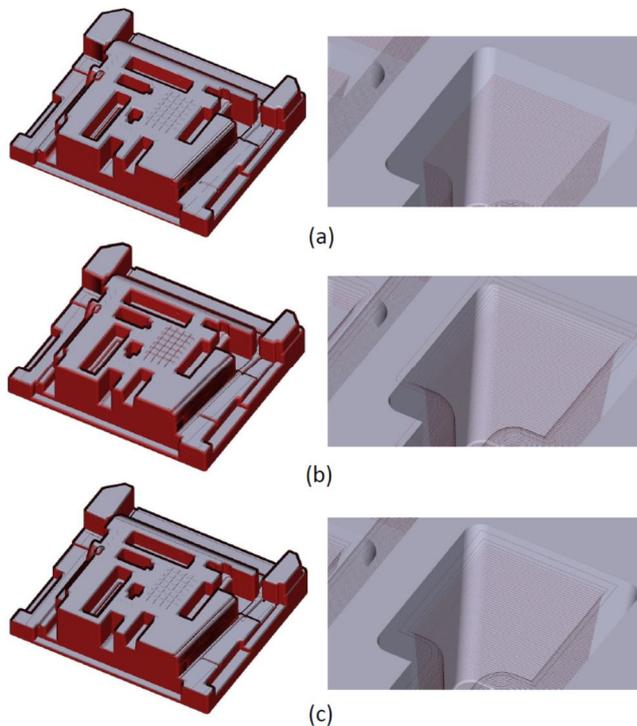


図3 新手法を用いた等高線状の工具経路の計算結果。フラットエンドミル用(a), ボールエンドミル用(b), ラジラスエンドミル用(c)。

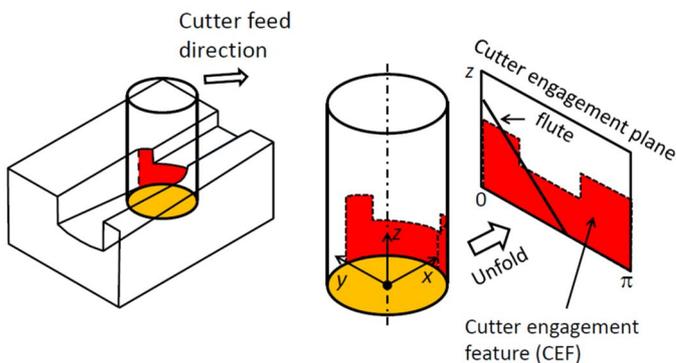


図4 工具と工作物の接触エリア。

(2) 加工シミュレーションの高性能化 [2, 3]

NC 命令の検証を目的に、実加工前に NC 切削加工のシミュレーションを行うことが一般化している。従来は削り込みやホルダー干渉の検出を目的とした幾何的なシミュレーションが一般的だったが、近年は加工中の切削力の変化や工具のたわみ量の解析などを行う、力学的なシミュレーションの利用が増加している。このような力学シミュレーションの一手法に、加工中の工具表面と工作物の接触エリア (Cutter Workpiece Engagement, CWE, 図 4) に基づく解析法がある。この手法では工具の微小移動毎に CWE を再計算する必要がある。精密な解析のためには、工具が 0.1mm 程度移動するたびに CWE を計算しなくてはならず、その膨大な計算時間がシミュレーション利用の障害となっている。

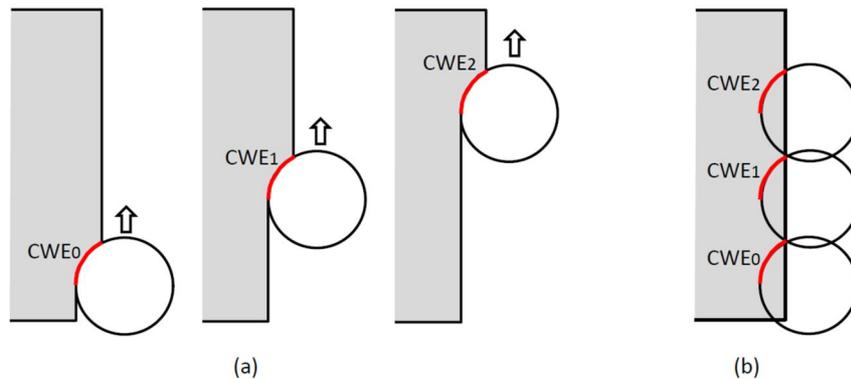


図 5 従来の逐次的な加工シミュレーションの繰り返しによる CWE 計算(a)と本研究の提案する CWE の並列計算手法(b)。

従来手法では、切削工具が移動するたびに幾何的な切削シミュレーションを実行し、工作物形状を工具移動後の状態に変更する。次に移動後の工具位置において、工具表面と工作物の接触状態を調べ、CWE を求める方法が一般的であった (図 5(a))。この方法では、工具が微小移動するたびに CWE を計算しようとする、膨大な回数の幾何的な切削シミュレーションを行う必要があり、計算コストが極端に大きくなってしまふ。この問題の解決には GPU の並列処理技術の利用が考えられるが、切削加工では、前加工の結果がその後の加工に影響を与えるので、複数個所の CWE を同時に計算する並列処理は適用が困難である。

NC 加工の工具経路は一般に折れ線状となっており、工具は直線移動を繰り返しながら加工を進める。直線移動する工具では、加工結果は常に工具の進行方向の後ろ側に生じるので、その後の CWE 計算には影響しない。したがって直線状の工具経路にそって微小間隔毎に工具形状を配置し、工具の進行方向側の表面と工作物形状の交わりを計算すれば、それが各工具配置における CWE となる (図 5(b))。この手法では、直線経路にそって配置された全工具の CWE を同時に計算できるので、並列処理が可能となる。また、切削加工の幾何的なシミュレーションは、工具の微小移動毎ではなく、工具の直線移動毎に 1 回だけ実行すれば十分なので、計算コストを大幅に低減できる。本手法では、加工前の工作物形状を用いて CWE を計算するので、従来手法 (図 5(a)) とは違って、工具表面が工作物に深く食い込んでいく (図 5(b))。そのため工具表面の接触状態を解析する際に数値誤差の影響を受けにくく、安定な計算が可能となる。

システムを実装し、荒加工、中仕上げ、仕上げ加工用の経路を用いて指定間隔毎に CWE 計算を行った。実装には Visual Studio 2010 と CUDA 8.0 を利用した。計算実験には Windows 10 PC (Intel Core i7 (4.0 GHz), 32 GB メモリー, nVIDIA GeForce GTX-1080 GPU) を用いた。実験では、工具の配置間隔を 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 mm に変化させた。工作物モデルのサイズは 150 × 70 × 20 mm の直方体状で、実験ではこのモデルを解像度 1,925 × 901 × 261 の 3 方向デクセルモデルに変換し使用した。工具として 2mm のボールエンドミルとフラットエンドミルを使用した。工具の配置間隔が 0.1mm のとき、計 900,000 個所の CWE が 230 秒で計算可能であった。一カ所あたりの計算時間は約 0.25ms である。

参考文献

- [1] M. Inui, N. Umezu, Contour-Type Cutter Path Computation Using Ultra-High Resolution Dixel Model, Computer-Aided Design and Applications, Vol. 17, No. 3, pp.621-638, 2020. doi: 10.14733/cadaps.2020.621-638
- [2] M. Inui, M. Kobayashi, and N. Umezu, Fast Extraction of Cutter Engagement Features by Using the Parallel Processing Function of a GPU, 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Xi'an, China, August 20-23, 2017, 668-673.
- [3] M. Inui, M. Kobayashi, N. Umezu: Cutter Engagement Feature Extraction Using Triple-Dixel Representation Workpiece Model and GPU Parallel Processing Function, Computer-Aided Design and Applications, Vol. 16, No.1, pp.89-102, doi: 10.14733/cadaps.2019.89-102.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 M. Inui, M. Kobayashi, N. Umezu	4. 巻 16
2. 論文標題 Cutter Engagement Feature Extraction Using Triple-Dexel Representation Workpiece Model and GPU Parallel Processing Function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 89-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14733/cadaps.2019.89-102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 蛸名 雄太郎, 前崎 智博, 周 立波, 清水 淳, 小貫 哲平, 尾島 裕隆, 乾 正知	4. 巻 84
2. 論文標題 実験とシミュレーションによる砥粒径のばらつきがウエハ研削面に与える影響の調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 640-645
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2493/jjspe.84.640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Masatomo Inui, Nobuyuki Umezu	4. 巻 17
2. 論文標題 Quad Pillars and Delta Pillars: Algorithms for Converting Dixel Models to Polyhedral Models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Computing and Information Science in Engineering	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4034737	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nobuyuki Umezu, Keisuke Yokota, Masatomo Inui	4. 巻 4
2. 論文標題 2D Wavelet Transform Data Compression with Error Level Guarantee for Z-Map Models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Computational Design and Engineering	6. 最初と最後の頁 238-247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.04.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masatomo INUI, Nobuyuki UMEZU, Masashi TSUKAHARA	4. 巻 11
2. 論文標題 Simple Offset Algorithm for Generating Workpiece Solid Model for Milling Simulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/jamdsm.2017jamdsm0042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 M. Inui, T. Fujinuma
2. 発表標題 Toward The Standardization of Digital Verification Technology, Development of Guidelines for Creating 1DCAE Models of Mechano-Electrical Products
3. 学会等名 Model Based Enterprise Summit 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Inui, M. Kobayashi, N. Umezu
2. 発表標題 Cutter Engagement Feature Extraction Using Triple-Dexel Representation Workpiece Model and GPU Parallel Processing Function
3. 学会等名 CAD Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Inui, Y. Ebina, T. Maezaki, L. Zhou
2. 発表標題 Geometric Simulation of Infeed Grinding Process of Silicon Wafer Using GPU
3. 学会等名 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S.Naganuma, M.Inui, N.Umezu
2 . 発表標題 Visualization of Thickness of 3D Object Using Reversed Distance Field
3 . 学会等名 International Conference on Precision Engineering, ICPE 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S.Nikaido, M.Inui, N.Umezu
2 . 発表標題 Detection of Sphere Colliding Step Shape in Automobile Parts
3 . 学会等名 International Conference on Precision Engineering, ICPE 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M.Inui, T.Imai, N.Umezu
2 . 発表標題 Bounded Distance Field for Assisting Interactive Layout Design of Water Circuits
3 . 学会等名 2018 Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S.Onishi, M.Inui, N.Umezu
2 . 発表標題 Shape Modeling of Possible Sink Marks on Plastic Part
3 . 学会等名 2018 Asian Conference on Design and Digital Engineering (ACDDE2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Inui, T. Fujinuma
2. 発表標題 Study on Efficient Development of 1D CAE Models of Mechano-Electrical Products
3. 学会等名 13th International Modelica Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatomo Inui, Kenta Gunji, Nobuyuki Umezu
2. 発表標題 Extraction of Sliding Collision Area of Knee-Form for Automobile Safety Inspections
3. 学会等名 25. International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision WSCG 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatomo Inui, Shinji Nagano, Nobuyuki Umezu
2. 発表標題 Fast Computation of Accessibility Cones for Assisting Process Planning of 3+2 Axis Milling
3. 学会等名 CAD Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatomo Inui, Nobuyuki Umezu
2. 発表標題 Extraction of Vertical Cylinder Contacting Area for Motorcycle Safety Verification
3. 学会等名 CAD Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatomo Inui, Masayoshi Kobayashi, Nobuyuki Umezu
2. 発表標題 Fast Extraction of Cutter Engagement Features by Using the Parallel Processing Function of a GPU
3. 学会等名 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatomo Inui, Shunsuke Ohnishi, Nobuyuki Umezu
2. 発表標題 Visualization of Possible Sink Marks using Thickness Analysis of Finely Tessellated Solid Model
3. 学会等名 Asian Conference Design and Digital Engineering, ACDDE 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Maezaki, Yutaro Ebina, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Masatomo Inui, Libo Zhou
2. 発表標題 Study on the effect of grain size variation on ground surface roughness
3. 学会等名 The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考