

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656112

 研究課題名（和文） 多重解像度メッシュモデルを用いた高精度な
MEMS デバイス工程設計支援の研究

 研究課題名（英文） Accurate process planning of MEMS devices
using multi-resolution mesh models

研究代表者

金井 理 (SATOSHI KANAI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90194878

研究成果の概要（和文）： MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の製造に精通していない設計者でも、MEMS デバイスを低コストに製造可能な工程を容易に推定できるようにするため、異なる解像度の三角形集合体とソリッドモデルの融合である多重解像度メッシュモデルで MEMS デバイスの理想形状や製造誤差を含む形状を精密に表現し、これに基づき、(1)デバイスを製造可能な全工程順序の探索、(2)より製造容易なデバイス形状への修正、などを可能とする MEMS 工程設計支援システムのソフトウェアを試作した。

研究成果の概要（英文）： The objective of this study is to enable designers who are not necessarily the experts on MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) manufacturing processes to easily plan the feasible and low-cost manufacturing processes of MEMS devices. To achieve this, a prototype of the computer-aided process planning system of MEMS devices was developed where (1) all feasible process plans of the device could be searched for and (2) device shapes and structures easier to fabricate could be estimated automatically based on the multi-resolution mesh model of the devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野： CAD, 形状モデリング, 設計工学, 機械工学・生産工学

科研費の分科・細目： 機械工学, 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード： MEMS, 工程設計, 形状モデリング, ソリッドモデル, メッシュモデル

1. 研究開始当初の背景

MEMS とは、機械要素・センサ・アクチュエータ・電子回路等の機能を半導体基盤上に集積化したデバイスで、プリンタヘッド、加速度センサ、圧力センサなどとして広く普及している。今後、通信や医療分野でも需要が拡大し、2015 年までに MEMS 世界市場は 2.5 兆円にも成長すると予測されている。

これに伴い、今後、MEMS デバイスの設計と製造の分業化が予想される。しかし、MEMS デバイスは、図 1 のような材料堆積とエッチングの繰り返しにより作られるた

め、機械加工等と比べ製造できるデバイス形状が、強い幾何学的制約を持つ。このため、設計者が MEMS の製造技術に精通していない場合、実際には製造できなかつたり、製造できても工程が複雑でコスト高となるデバイスを設計してしまう可能性が高い。

従って、今後の MEMS デバイスの設計では、製造技術に精通していない設計者でも、(1)製造可能性が保証されたデバイス構造が設計できる、(2) 原設計にデバイス構造が類似し、より低コストに製造できるデバイス構造が設計できる、(3)製造誤差に起因する要

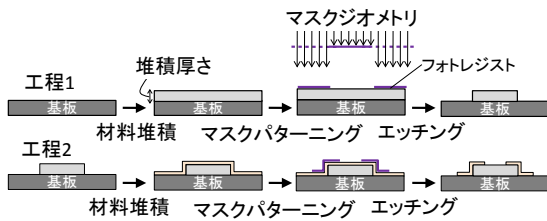


図1 MEMS デバイスの工程

求性能のバラツキを定量評価し、これを行えるだけ抑える設計ができること、といった高度な設計能力が求められるようになる。

既に MEMS 設計者向けのソフトウェアとしては、製造シミュレーションやデバイス性能解析専用の CAE システム（主に米国製）が市販されている。しかしこれらは、①デバイスの最終形状から製造工程を逆算できない、②製造が容易な類似のデバイス形状を推定できない、③製造時の形状偏差やバラツキを理想形状へ重ね合わせて表現できない、といった欠点をもつ。

従って、今後の MEMS デバイスの設計・製造の分業化に対応し、我が国のデバイスの市場競争力を確保するためには、上述の①～③に挙げる支援機能を提供できる MEMS デバイス設計者向けの工程設計ソフトウェアの開発が必要とされている。

2. 研究の目的

粗いスケールと微細スケールといった異なる解像度の三角形集合体とソリッドモデルが融合した多重解像度メッシュモデルで MEMS デバイスの理想形状や製造誤差を含む 3 次元形状を精密に表現し、このモデルに基づき、

- (1) デバイスを製造可能な全ての工程順序の探索、
- (2) より製造容易なデバイス形状への自動修正、
- (3) 高精度な性能予測のための製造誤差重畳型デバイス形状の表現、

という特徴的機能を持つ 3 次元 MEMS 工程設計支援システムを開発する。

このシステムにより、MEMS 製造工程に精通していない設計者でも、デバイスを低コストで効率的に製造可能な工程を推定できるようにしようというのが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

この目的達成のため、本研究では、図 2 に示す通り、下記(1)～(3)に示す各機能をもつ 3 次元 MEMS 工程設計支援システムのプロトタイプを開発した。また各機能の有効性と、導出する工程データの妥当性を、簡単な実デバイス製品を対象として検証した。

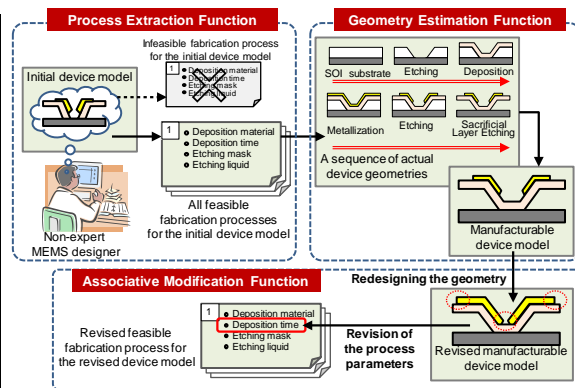


図2 本研究で開発した 3 次元 MEMS 工程設計支援システムの構造

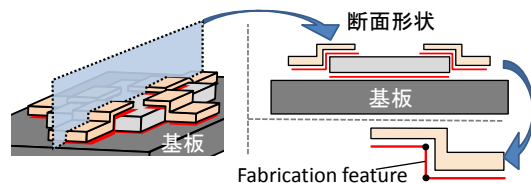


図3 Fabrication Feature

(1) 製造可能な全工程の導出機能

設計者がソリッドモデルで作成した MEMS 形状の初期デバイスモデルから、そのデバイス形状を作成可能な、製造工程の可能解を全て導出する。

(2) 実デバイスモデルの形状推定機能

上記より導出された製造工程に従って、実際に形成されると思われるデバイス形状の 3 次元モデルを推定する。

(3) デバイスープロセス連動再設計機能

設計仕様を満足するように製造工程と実デバイスモデルの情報を重畳し関連づけ、連動修正を行うことで効率的な再設計を実現する。

4. 研究成果

(1) 製造可能な全工程導出機能の開発

設計者が最初にソリッドモデルで作成したデバイス形状モデル（初期デバイスモデル）から、そのデバイスを堆積とエッチングの連続により作成可能な工程の全可能解を自動的に導出する機能である。

まず、初期デバイスモデルの各堆積層の境界面分集合である図 3 に示す Fabrication Feature をモデル内から自動認識し、Feature の幾何形状に基づいて 3 種類に分類した。さらに、図 4 のような Feature 間の基盤平面上への投影重複関係を計算し、この関係に合致する Feature 群の堆積順序の組合せをシステムが再帰的に探索することで、デバイスを製造可能な全工程順序を探索し、全工程を図 5 のような工程木構造でシンプルに表現し管理する方法を開発した。

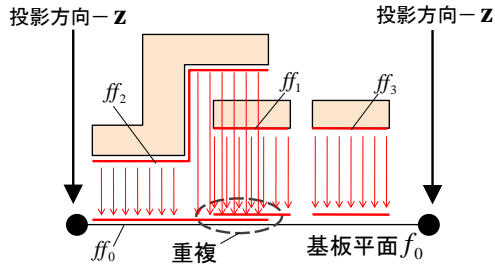


図4 Fabrication Feature 間の投影重複関係

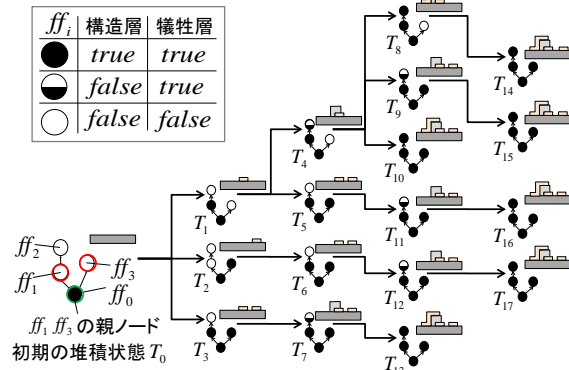


図5 工程木による全可能工程の表現

(2) 実デバイスモデルの形状推定機能

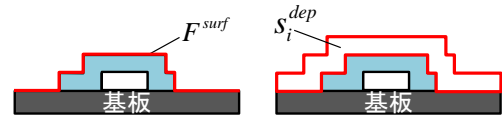
これは(1)の全工程導出機能により推定された工程の中から、設計者が選択したある工程で製造されるデバイスの最終形状や工程途中の3次元形状を、計算機に改めて推定し直させる機能である。この機能により、製造不可能なデバイスを誤って設計しても、Fabrication Feature の形状さえ製造可能であれば、「製造不可」という判定ではなく、初期設計案に形状が類似し、かつ実際に製造可能と思われるデバイス形状とその工程が導出可能となる。

この推定機能を、メッシュモデルに対するオフセット・スイープ・集合演算を活用し開発した。堆積層形状は図6-(a)のようなFabrication Feature の面オフセット和演算、エッチング後の形状は、図6-(b)のように、マスクジオメトリのスイープ領域との差演算で推定した。この処理を、基盤形状のみからなるモデルをスタートとして反復することにより、選択された工程の途中や工程完了後の仔細な3次元形状モデルを、シミュレーションにより推定可能とした。

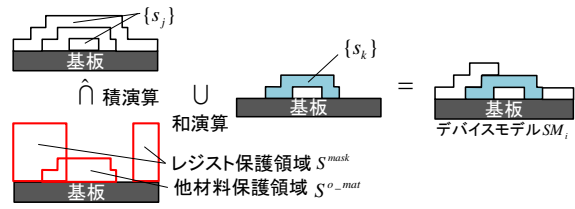
またこれらの処理と同時に、図7のように、ある工程の前形状のメッシュモデルと、次工程で堆積すべきFabrication Feature の投影形状同志の集合演算から、エッチング工程用のフォトリソマスクのパターンも自動生成できる機能を開発した。

(3) デバイス-プロセス連動再設計機能

(2)で導出された実デバイスモデルは設計

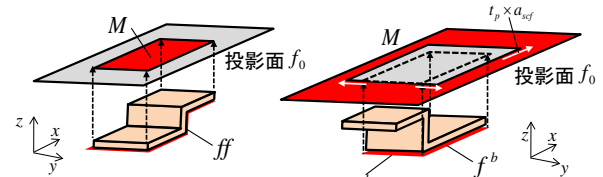


(a) 堆積層形状の推定方法



(b) エッチング後層形状の推定方法

図6 堆積層とエッチング後形状の推定方法



(a) 構造層マスク (b) 犠牲層マスク
図7 マスクパターン自動生成方法

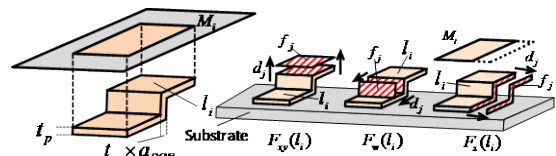


図8 実デバイスモデル面分とオフセット

したデバイスモデルと形状が異なる可能性が高いため、必ずしも設計仕様を満たした形状である保証はない。そのため、製造工程の構成パラメータと実デバイスモデルの寸法パラメータを関連付けることで、実デバイスモデルの設計変更を行うだけで、関連する製造工程が自動的に修正されるデバイスとプロセスの連動再設計機能を開発した。

ただし、製造工程の構成パラメータのうち、本研究では、下記の2パラメータのみを連動修正可能とした。

① 堆積厚さ

あるプロセスで生成するレイヤーの集合は基板鉛直方向に一律な堆積厚さを持つことがほとんどであり、蒸着時間の制御によりこの厚さはコントロール可能である。

② マスク形状

直線と曲線を境界線に持つ2次元図形であり、あるプロセスで生成されるレイヤー形状を基板平面に投影することで生成される。

本機能は、図8のように、実デバイスモデルの面分とそのオフセット距離を入力として、実デバイスモデルの面分をオフセットすることによる製造工程への影響を計算し、影

響する製造工程のパラメータを修正する。さらに変更された製造工程のパラメータが実デバイスモデルに与える影響を再計算し実デバイスモデルを更新している。

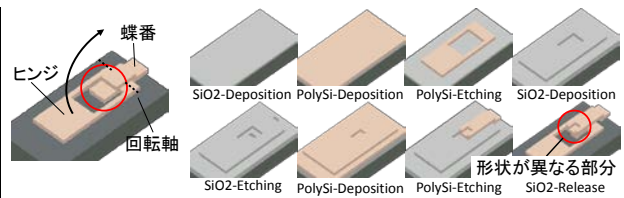
(4) システムの有効性と妥当性検証

本工程設計システムを、本研究室で開発された多重解像度メッシュモデリングカーネルおよび市販のソリッドモデリングカーネルの両者を用いて実装し、**図 9(a)**に示すマイクロ蝶番モデルの製造工程を導出し実デバイスモデルを推定した。実行時間はそれぞれ 0.4[s], 0.14[s]だった。**図 9(b)**に各工程終了後の実デバイスモデルを示す。**図 9(a)**と**(b)**の形状を比較すると、実デバイスモデルは設計したデバイスモデルに類似しているが、赤枠部分の形状が異なることも分かる。

この違いによりデバイスモデルが設計仕様を満たさなくなると仮定し、デバイスとプロセスの連動再設計を行った。**図 10(a)**に示すように工程2で生成されるヒンジ部分の寸法を回転軸方向に長くなるように実デバイスモデルを修正したところ、**図 10(b)**に示すように工程2のマスク形状が変更され、**図 10(c)**に示す修正された製造工程の実デバイスモデルが導出された。これにより、デバイスとプロセスの連動再設計が行われていることを確認した。また**図 11**に、同一デバイスに対し、回転軸を細くする設計変更を行った場合の連動修正例を示す。

次に**図 12(a)**のような複雑な層構造をもつマイクロ酸素センサモデルに関し、本システムを適用し、製造可能な全工程を導出した。**図 12(b)**は、その工程の中で堆積回数が最小となる製造工程の推定例、および**図 12(c)**はその工程での実デバイスモデルの形状変化を表す。全工程の探索には 17[s]、実デバイス形状の推定には 1[s]を要した。

この本システムで導出した製造工程と実デバイスモデルの妥当性を、市販の MEMS プロセスエミュレータ (MEMS-One: 製造工程を入力としてデバイス形状を出力できるソフトウェア) で確認した。すなわち、**図 13**のように、本工程設計システムが導出した工程をプロセスエミュレータへ入力し、出力された工程途中や最終デバイス形状が、本システムによる工程推定が妥当であることが分った。また市販 MEMS プロセスエミュレータでは、**図 13**の上段の一部に示された通り、その機能上の制限から、デバイス形状の推定が不可能な工程が数か所あった。この部分については、連携研究者である MEMS デバイスの試作経験が豊富な研究者に結果を評価していただき、その結果、本工程設計システムからの工程が十分に妥当であるとの判断を受けた。



(a) 初期デバイスモデル (b) 実デバイスモデル
図 9 マイクロ蝶番モデルの工程設計例

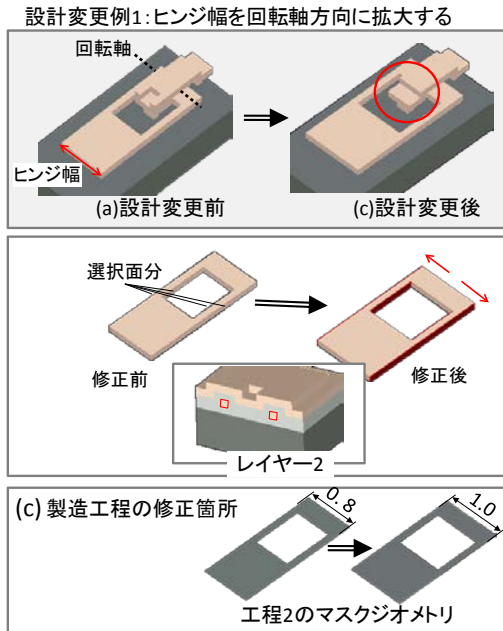


図 10 マイクロ蝶番モデルの
デバイス-プロセス連動再設計例 (1)

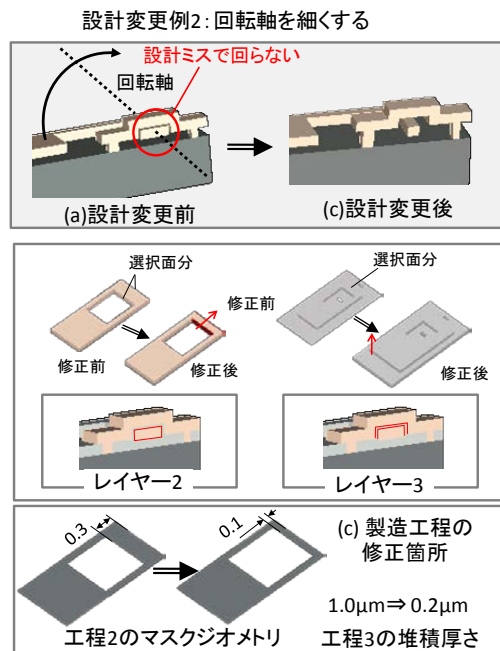
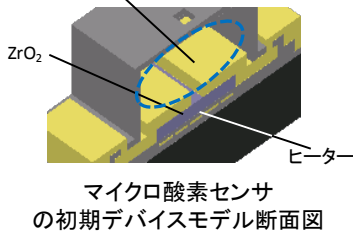


図 11 マイクロ蝶番モデルの
デバイス-プロセス連動再設計例 (2)

酸素供給量が制限された空間



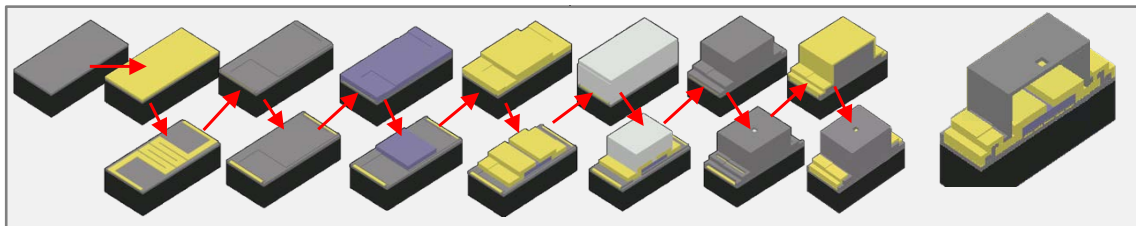
マイクロ酸素センサの初期デバイスモデル断面図

工程番号	Fabrication feature	堆積材料	堆積厚さ	マスク	SCF	材料の種類
1	ff_1	Si_3N_4	0.05	Mask1	1.0	構造層
2	ff_2	Pt	0.02	Mask2	1.0	構造層
3	ff_3	SiO_2	0.02	Mask3	1.0	構造層
4	ff_4	ZrO_2	0.1	Mask4	1.0	構造層
5	ff_5, ff_6	Pt	0.1	Mask5	1.0	構造層
6	ff_7	SiO_2	0.45	Mask6	1.0	犠牲層
7	ff_7	Si_3N_4	0.05	Mask7	1.0	構造層
8	ff_8	Pt	0.05	Mask8	1.0	構造層
9	犠牲層の除去					



(a) 初期デバイスモデル

(b) 堆積回数最小の工程例と推定マスク形状



(c) 実デバイスモデルの形状変化

図 1 2 マイクロ酸素センサモデルの工程設計例

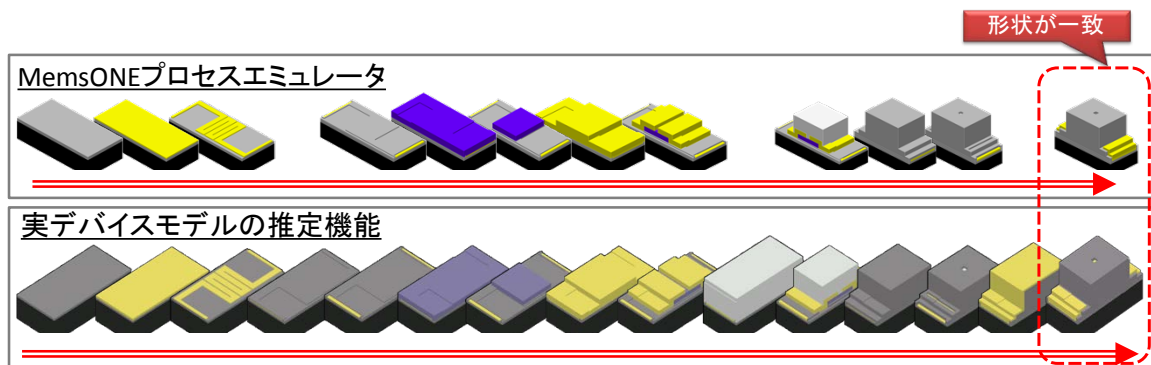


図 1 3 本システムが導出した工程入力に基づいた市販 MEMS プロセスエミュレータによる実デバイスモデル形状推定例（上）と本システムによる実デバイスモデル形状推定例（下）

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Hiroki Maehama, Hiroaki Date and Satoshi Kanai, “Quality Improvement of Deformed Mesh Models for FEA by Density and Geometry-recovering Phased ODT Smoothing”, *Computer Aided Design and Applications* (掲載決定済み, 掲載号未定) [査読あり]
- ② Hiroaki Date, Takashi Maehama, Satoshi Kanai: “A Rendering Method of Laser Scanned Point Clouds of Large Scale Environments by Adaptive Graphic Primitive Selection”, *Computer Aided Design and Applications* (掲載決定済み, 掲載号未定)

[査読あり]

- ③ Tomohiro Mizoguchi and Satoshi Kanai: Decomposing Scanned Assembly Meshes based on Periodicity Recognition and Its Application to Kinematic Simulation Modeling, *Computer-Aided Design*, Vol.45, No.4, pp. 829-842, (2013) [査読あり] DOI: 10.1016/j.cad.2011.02.001
- ④ Satoshi Kanai, Takayuki Shibata and Takahiro Kawashima: “Feature-based 3D Process Planning for MEMS Fabrication”, *Proceedings of 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering*, No.100093 (2012) [査読あり]
- ⑤ Satoshi Kanai, Daisuke Iyoda, Yui Endo, Hideki Sakamoto and Naoki Kanatani:

"Appearance preserving simplification of 3D CAD model with large-scale assembly structures", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol.6, No.3, pp.139-154, (2012) [査読あり]
DOI: 10.1007/s12008-012-0145-0.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 東 翔也, 伊達宏昭, 金井理: "X 線 CT 計測メッシュからのボイドを含む製品の四面体メッシュ生成 —適応的メッシュ細分化によるボイドの位相・幾何の高精度再現—", 2013 年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2013 年 3 月 13 日, 東京工業大学, 東京都
- ② 前濱宏樹, 伊達宏昭, 金井理: "段階的 ODT スムージングを用いた寸法駆動変形四面体メッシュの品質改善 —局所的位相変更による要素ひずみと裏返りの修正—", 2013 年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2013 年 3 月 13 日, 東京工業大学, 東京都
- ③ Satoshi Kanai, Takayuki Shibata and Takahiro Kawashima: "Feature-based 3D Process Planning for MEMS Fabrication", 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, December 7th (2012), Hilton Niseko Village Hotel, Hokkaido, Japan, <http://www.sdm.ssi.ist.hokudai.ac.jp/publications.html>
- ④ Hiroki Maehama, Hiroaki Date and Satoshi Kanai: "Quality Improvement of Finite Element Mesh Models Modified by Mesh Deformation", 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, December 7th (2012), Hilton Niseko Village Hotel, Hokkaido, Japan, <http://www.sdm.ssi.ist.hokudai.ac.jp/publications.html>
- ⑤ 前濱宏樹, 伊達宏昭, 金井理: "段階的 ODT スムージングによる寸法駆動変形メッシュの品質改善", 2012 年度 精密工学会秋季大会学術講演会, 2012 年 9 月 15 日, 九州工業大学, 福岡県
https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2012A/0/2012A_259/_article/-char/ja/
- ⑥ 東 翔也, 伊達宏昭, 金井理, 田中大之: "ボイドを含む製品の X 線 CT 計測表面メッシュからの解析四面体メッシュ生成 —メッシュ適合を用いた高精度・高品質メッシュ生成—", 2012 年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 15 日, 首都大学東京, 東京都
https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2012S/0/2012S_563/_article/-char/ja/

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金井 理 (KANAI SATOSHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90194878

(2) 研究分担者

伊達 宏昭 (DATE HIROAKI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授
研究者番号: 20374605

(3) 連携研究者

柴田 隆行 (SHIBATA TAKAYUKI)
豊橋技術科学大学・
工学 (系) 研究科 (研究院) ・教授
研究者番号: 10235575

川島 貴弘 (KAWASHIMA TAKAHIRO)
豊橋技術科学大学・
工学 (系) 研究科 (研究院) ・准教授
研究者番号: 50378270