

要 旨

MEMS 製品の急速な普及により、MEMS デバイス設計機会の増加が今後予想される。そこで、MEMS 製品形状の3次元形状モデルから、その製造工程の可能解を導出する工程設計システムが必要となる。しかし、既存のMEMS 工程設計手法は製造工程の複数の可能解を導出できなかった。本研究では、異なる堆積方法で実現可能な複数のMEMS 製造工程を網羅的に導出できるシステムを、MEMS 製品3次元形状モデルのブロック分割に基づく手法により開発した。

1. はじめに

MEMS 市場の急速な成長に伴い、今後MEMS デバイスの設計と製造の分業化が予想され、MEMS 製造工程に精通していない設計者向けの工程設計支援システムが必要となると思われる。MEMS 工程設計システムには、デバイスの最終形状を入力し、その製造工程順序を導出する機能が求められる。既に表1のようないくつかのMEMS 工程設計システムの研究例はあるものの^[1-4]、デバイス形状の表現能力や導出できる製造工程の解が限定されているものが多く、より工程導出能力の高いシステムの開発が求められる。そこで本研究では、MEMS 製造の代表的手法であるサーフェスマイクロマシーニングにおいて、conformal 堆積とsnowfall 堆積という図1に示すようなstep coverageが異なる2種類の材料堆積方法で製造可能な工程解をMEMS 製品のソリッドモデルに基づき、網羅的に導出する工程設計システムのプロトタイプを開発した。

2. 工程設計手法の要件と関連研究

MEMS 工程設計に求められる要件は以下の3つである。

- 要件1) 3次元構造を考慮した工程設計が可能なこと
- 要件2) 製造可能な工程順序の解が様々な堆積方法に対応して網羅的に導出可能なこと
- 要件3) 製造がより容易になる工程を、与えられた製品形状に類似する形状で導出すること

表1のように、要件1,2を同時に満たすMEMS 工程設計の研究例がない。本研究はこの要件1,2を満たす手法であることが特徴である。

3. 提案するMEMS 工程設計手法の概要

図2に、本研究で提案するMEMS 工程設計処理の基本的な考え方を示す。処理は以下の手順で行われる。①構造層を表す入力MEMS 製品ソリッドモデル内の空隙部に犠牲層を挿入し、形状が定義された空間のブロック分割を行う。②初期段階から堆積できる可能性のあるブロック(優先ブロック $b_1^p, b_2^p, b_3^p, \dots$)をすべて探索し、そのブロックの組み合わせを優先ブロックグループ $B_1^p, B_2^p, B_3^p, \dots$ として統合する。③ B_1^p のブロックグループに対して、それぞれ堆積ブロック生成を行う。④エッチングによる堆積ブロックの除去を行う。⑤上記②~④の処理から得られる1工程を1ノードとして、工程の木構造内に挿入する。以上の処理を、堆積できる構造層ブロックが無くなるまで繰り返す。

4. 提案する工程設計手法

4.1. 前処理

4.1.1. 犠牲層生成

基板上面から、基板とは別に構造層を十分覆う高さまでスウィープソリッド s^* を生成し、 s^* から構造層をブーリアン差演算することで犠牲層を生成する。このとき閉空気層 shell の判定を行う。shellがある場合、工程の最後に行う犠牲層エ

表 1 関連研究と提案アルゴリズムの比較

	要件1	要件2	要件3	アルゴリズムの特徴
[Saneet A et al. 07] ^[1]	×	×	×	グラフ構造による形状変化
[Jianhua Li et al. 05] ^[2]	○	×	○	特徴面分からの工程設計
[Sungwook Cho et al. 02] ^[3]	○	×	×	ブロック分割とグラフ構造による工程設計
MemsONEプロセス逆問題解析 ^[4]	×	△	○	データベースモデルの類似検索
本工程設計システム	○	○	×	工程の全探索

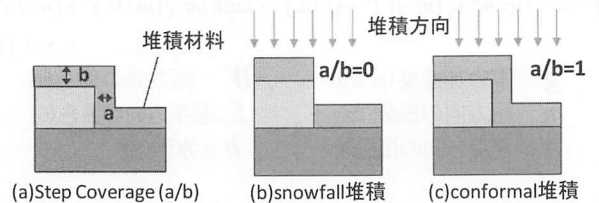


図 1 材料堆積方法

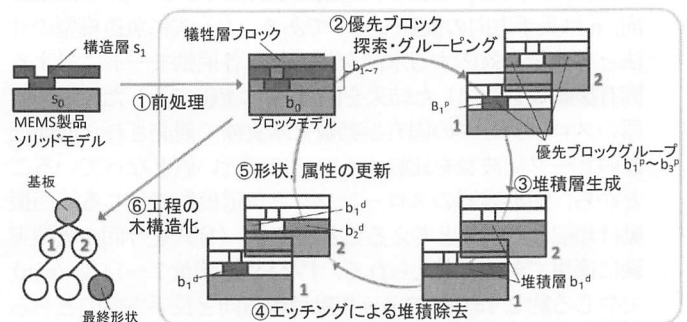


図 2 提案する工程設計手法の概要

ッチングができないため、製造不可能な形状であると判断される。

4.1.2. ブロック分割

基板に平行な凹エッジを含む平面でその凹エッジを含むソリッドを上面と下面がそれぞれ1枚のみで構成されるブロックに分割する。分割されたブロック b_0, b_1, b_2, \dots のうち、基板 b_0 に”堆積済”, それ以外のブロック b_1, b_2, \dots に”未堆積”という値の堆積済属性を付加する。

4.2. 優先ブロックの探索

優先ブロックとは、図3(a)の赤枠のブロックのように堆積済ブロックの上に完全に乗っている状態のブロックを指し、次の堆積で堆積される可能性のあるブロックである。まず未堆積ブロックの下面と、全ての堆積済ブロックの上面集合のブーリアン差演算により、優先ブロック b^p を探索する。次に、この優先ブロックをconformal 堆積方法で堆積させた場合に出現する図3(b)の赤枠のような側壁部分が無ければ、この b^p の堆積方法属性をconformalに、満たされていない場合はsnowfallに設定する。さ

らに、堆積方法属性が conformal である b_i^p は側壁部分も同時に堆積されなければならないため、 b_i^p と隣接ブロックの両方に接する b_i^p と同材料のブロックをその b_i^p に加え、優先ブロックを拡張する。拡張された b_i^p に関して、同様の作業を繰り返す。

4.3. 優先ブロックのグルーピング

同一材料、同一堆積方法の b_i^p の組み合わせを網羅的に作り、それぞれを優先ブロックグループ $B_1^p, B_2^p, B_3^p \dots$ とする。それぞれの優先ブロックグループに基づいて、堆積形状、エッチング形状を以下の 4.4, 4.5 に従い生成する

4.4. 堆積ブロック集合 B_i^d の生成

B_i^p の堆積方法属性に基づいて、snowfall か conformal の堆積形状を生成する。snowfall 堆積形状は、図 4(a)のように堆積済みブロック集合の陽に存在する上面分集合を面法線方向に L_1 だけスweepして生成する。 L_1 は B_i^p に含まれる b^p の高さの最小値である。生成した B_i^d を図 4(c)に示す。

一方、conformal 堆積形状は以下の方法で生成する。まず図 4(b)のように堆積済みブロック集合の陽に存在する側面分集合を面法線方向に L_2 だけスweepする。ここで $L_2 = aL_1$ (a: Step Coverage)である。さらに新たに生成された面分のうち、上面分と側面分をそれぞれ L_1, L_2 分スweepし、snowfall 堆積形状とブーリアン和演算する。最後に 4.1.1 の s^* と積演算、堆積済みブロック集合と差演算して図 4(d)に示す層形状を持つ B_i^d を生成する。

4.5. エッチングによる堆積除去

4.3 で生成した B_i^p と 4.4 で生成した B_i^d を積演算することで B_i^d のエッチング形状を、エッチング形状を基板上面の面分に投影することでマスク形状を推定する。エッチングされた堆積ブロック B_i^d に上面が完全には覆われていない堆積済みブロックを探索し、図 5(a)に示すように堆積ブロックと同材料の場合エッチング不可と判定し、図 5(b)に示すように B_i^d と異材料である場合や、探索した結果ブロックがない場合はエッチング可能と判断する。エッチングが可能である場合、未堆積ブロック集合から B_i^d をブーリアン差演算する。最後に B_i^d と未堆積ブロックに 4.1.2 のブロック分割を行い、すべての構造層ブロックの堆積済属性が“堆積済”であった場合、ブロックモデルに工程終了属性“finish”を付加する。

4.6. 工程の木構造化

幅優先探索を行い可能な製造プロセスを工程順に木構造として表現する。この木のノードは 1 プロセスの工程 4.4-4.5 を行った後の形状を表すブロックモデルでありインデックス $[\alpha, \beta]$ で表す。ここで α はノードの深さ番地、 β はノードの幅番地であり、 $\alpha=0, \beta=0$ が基板のみ堆積されたブロックモデルを指す。アークは工程の先行順序を表している。

まず、前処理後に $[\alpha, \beta]$ を生成し、 $\alpha=0, \beta=0$ とする。次に $[\alpha, \beta]$ について、4.3 の処理で作られた B_i^p で 4.4-4.5 の処理を行っていない B_i^p がある場合、 B_i^p に対して 4.4-4.5 の処理を行い $[\alpha, \beta]$ の下位のノードを生成する。4.4-4.5 が未処理の B_i^p がない場合、 $[\alpha, \beta+1]$ に移り、同様の処理を行う。4.4-4.5 が未処理の B_i^p がなく、 $[\alpha, \beta+1]$ がない場合、 $[\alpha+1, 0]$ に移り、4.2 の処理を行う。 $[\alpha+1, 0]$ が存在しなければ、木構造化を終了する。

5. 実行結果

図 6 のマイクロ梁の製品モデルに対し、提案アルゴリズムにより製造可能な全工程を導出させた。結果の木構造表現を図 7 に示す。各ノードのインデックス $[\alpha, \beta]$ の右側にそれぞれ堆積形状、マスク形状、エッチング後の形状モデルが表示されている。工程の全探索が行われ、その結果工程解 1 と工程解 2 が製造可能工程として導出された。実装環境は Intel® Xeon™ CPU 3.06GHz + Parasolid PWorkshop API で、実行時間

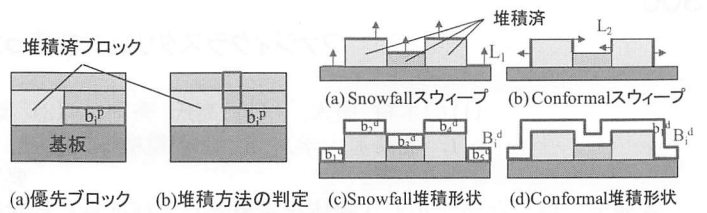


図 3 優先ブロック探索

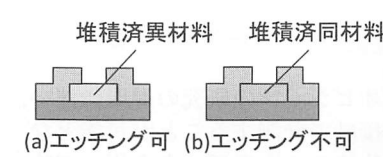


図 5 エッチング判定

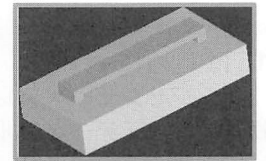


図 6 マイクロ梁モデル

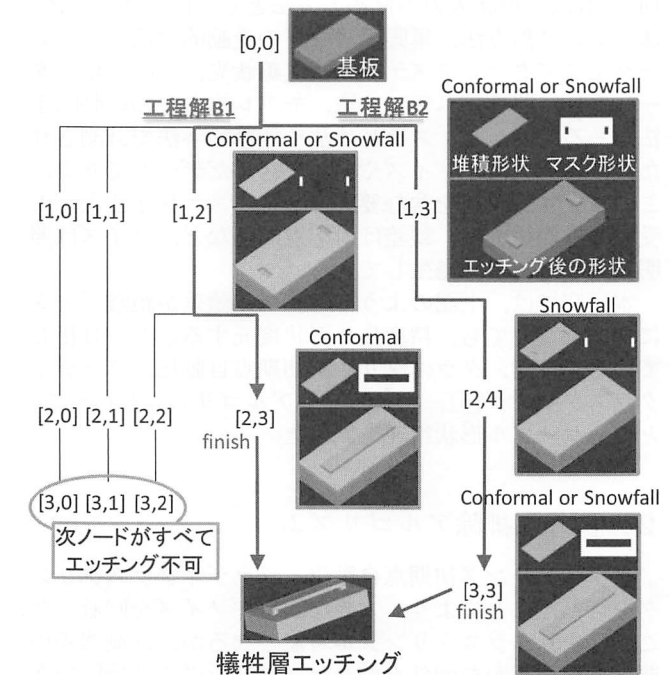


図 7 実行結果

はおおよそ 26[s]であった。

6. 工程解の検証

既存の MemONE プロセスエミュレーター^[4]を使用し、導出された工程解 1,2 の妥当性を検証した。プロセスエミュレーターに導出された工程解とマスク形状を入力した結果、マイクロ梁モデルと同一のモデルが生成された。従って、本システムで導出した工程解の妥当性が確認できた。

7. おわりに

3次元形状モデルを用いて、2種類の堆積形状に対応した工程の可能解を網羅的に導出できる工程設計システムのプロトタイプを開発した。又、簡単な MEMS 形状に対する例、製造工程の全探索が実行可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Saneet A. et al.: Automated synthesis of MEMS fabrication sequences using graph grammars, Proc. ASME/IDEC 2007, 34691.
- [2] Jianhua Li, et al.: Feature-based process layer modeling for surface micromachined MEMS, Micromech. Microeng., 15, pp.620-635, 2005..
- [3] Sungwook C, et al.: Development of a geometry-based process planning system for surface micromachining, Production Research, 40(5), 1275-1293, 2002.
- [4] MemONE Ver.1.1: 財団法人マイクロマシンセンター,(2007).