

要 旨

本報では MEMS 設計者支援のための、新しい MEMS 工程設計手法を提案する。この手法は入力されたデバイスの形状特徴の堆積先行関係に基づいて工程設計を行い、複数の製造工程を導出する機能、デバイスモデルの一部の形状をより製造しやすいように修正する機能を含んでいる。この手法により、マイクロ酸素センサの製品モデルから、その製造工程とより製造が容易なデバイスモデル形状を自動的に導出できることを確認した。

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の設計を計算機で支援するシステムが必要となる。このため本研究では、3次元形状モデルを用いた MEMS 工程設計システムの開発を目標とする。前報[1]では、デバイスモデルの Process Feature とその堆積先行関係に基づく工程設計システムの基本機能について報告した。今回はさらに、工程木を用いた製造工程の全探索機能と、デバイスモデルの再設計機能をこのシステムに追加した。これらの機能により、設計者は MEMS デバイスの製造工程とより製造が容易な修正デバイス形状を知ることができる。

2. 提案する MEMS 工程設計システムの概要

本研究では、代表的な MEMS プロセスの1つであるサーフェイスマイクロマシニングのみを用いて製造されるデバイスの製造工程を、デバイスモデルの Process Feature 間の関係に基づいて導出する。Process Feature とはデバイスの堆積層を表すソリッドの下部境界面分集合であり、連結された面分と稜線の集合である。Process Feature には、図1に示す面分の法線ベクトル方向と稜線の凹凸によって決まる Bend Feature と SidePocket Feature、2つの Feature に含まれない下向き水平面分のみで構成される Bottom Feature の3種類がある。本工程設計は以下の4つの手順で行われる。

1. デバイスモデル SM の Process Feature pf を探索する。
2. Process Feature の投影重複関係を計算する。また同じ堆積層に含まれる Process Feature の集合 Fabrication Feature ff を生成する。
3. 投影重複関係より Fabrication Feature の堆積順序を計算し、Process Sequence を生成する。
4. Process Sequence に基づいてデバイスモデルを再設計する。

再設計されたデバイスモデル SM' の形状は、必ずしも初期のデバイスモデル SM と一致しないが、より製造しやすい形状に変更されている。以下に 3,4 の処理の詳細を記述する。

2.1 Process sequence の生成

2.1.1 Precedence relationship digraph の生成

式(1)により Process Feature の投影重複関係行列 $A_{F_F} = \{a_{ij}\}$ ($a_{ij} \in \{0,1\}$) から Fabrication Feature の投影重複関係行列 $A_{F_F} = \{c_{lm}\}$ ($c_{lm} \in \{0,1\}$) を計算する。

$$c_{lm} = \bigvee_{pf_i \in ff_l, pf_j \in ff_m} a_{ij} \quad (1)$$

ここで、 \bigvee は論理和を表す。 $a_{ij} = 1$ は、 pf_i から pf_j に投影重複関係が存在することを表しており、 c_{lm} についても同様である。さらに、工程の先行関係行列 $B_{F_F} = \{b_{ij}\}$ を A_{F_F} の成分のうち冗長な関係を省くことで生成する。最後に式(2)より、以下の Fabrication Feature 間の投影重複関係を表す有向グラフ G_A 、堆積順序の先行関係を表す有向グラフ G_B を作成する。

$$G_A = \langle V_A, E_A \rangle, \quad \begin{cases} V_A = F_F \\ E_A = \{(ff_i, ff_j) \mid c_{ij} = 1\} \end{cases} \quad (2)$$

$$G_B = \langle V_B, E_B \rangle, \quad \begin{cases} V_B = F_F \\ E_B = \{(ff_i, ff_j) \mid b_{ij} = 1\} \end{cases}$$

ここで、 V_A, V_B はグラフのノード集合である。図2に、 $A_{F_F}, G_A, B_{F_F}, G_B$ の例を示す。 G_A における冗長な接続関係が

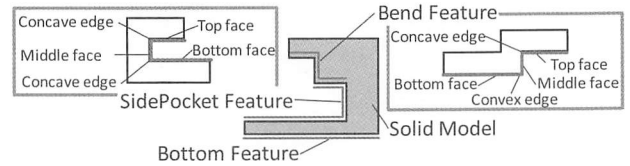


図1 Process Feature

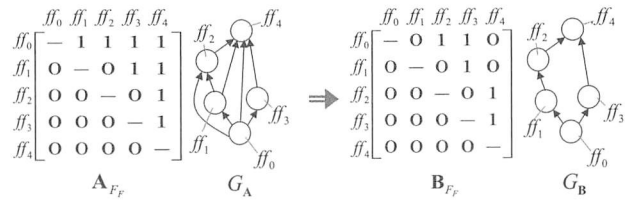


図2 堆積順序先行関係を表す有向グラフの作成

G_B では削除されていることがわかる。

2.1.2 工程木の生成

工程木作成のために用いる G_B の各ノード ff の属性と集合を以下のように作成する。

- 堆積済属性 $depd : F_F \rightarrow \{true, false\}$
 G_B において、 ff が堆積済かどうかを表す属性。
- 親 Fabrication Feature 集合 $P_G(ff_j)$
 G_B において、 ff_j に対して $b_{ij} = 1$ となる ff_i の集合。
- 堆積済み Fabrication Feature 集合 $D_{ed}(G_B)$
 G_B において、 $depd(ff_i) = true$ である ff_i の集合。
- 堆積可能 fabrication feature 集合 $D_{cand}(G_B)$
 G_B において、 $depd(ff_i) = false$ かつ $P_G(ff_i) \in D_{ed}(G_B)$ となる ff_i の集合。

G_B において犠牲層が必要なノード ff_i と、その親 ff 集合 $P_G(ff_i)$ の間に犠牲層ノード ff^s を挿入する。Process sequence は G_B における各ノード ff_i の堆積済み属性値 $depd(ff_i)$ が変化することで生成され、木構造の階層モデルで表現される。この階層モデルを工程木と呼ぶ。

2.1.3 工程の全探索

工程のある時点における G_B の各ノード ff の堆積済み属性値の状態を表した有向グラフを状態図 T_k と呼ぶ。まず、工程木の根を表す初期状態図 T_0 を定義する。 T_0 では基板の Fabrication Feature を表す ff_0 のみ $depd(ff_0) = true$ である。状態図 T_k が次の状態図に変化する際、各ノード ff_i の堆積済み属性値 $depd(ff_i)$ は $false$ から $true$ にのみ変化する。属性値が変化する可能性のある ff_j は、集合 $D_{cand}(G_B)$ に含まれる ff_j である。この状態遷移の全パターンを深さ優先方向で探索することで、工程木が作成される。

この例を図3に示す。図3(a)は単一の構造層をいくつか持つデバイスモデルの断面図を示している。工程設計では図3(b)は初期状態図 T_0 を示しており、 $D_{cand}(T_0) = \{ff_1, ff_6^s\}$ である。図3(c)に示すように、集合 $D_{cand}(T_0)$ に含まれる同一材料の ff_i の組み合わせを網羅的に探索し、次の状態図 T_1, T_2 を導出する。この手順で生成される工程木の生成過程を図3(d)に示す。工程木の葉はすべての ff_i が集合 $D_{ed}(G_B)$ に含まれている状態図となる。この工程木のユニークな経路がそれぞれ異なる Process Sequence に対応する。

2.2 デバイスモデルの再設計

導出された Process Sequence で製造されるデバイスモデル SM' の形状を推定する。ここでは、状態図が T_i から T_j に変化する場合を例にとり、デバイス再設計の手順を示す。ただし、エッチングは基板平面に鉛直方向にのみ進み、レジスト膜で覆われていない1種類の材料のみが腐食するものとする。

1. Depositing Fabrication Feature 集合 $D_{ing}(T_i, T_j)$ を作成する。
これは状態図が $T_i \rightarrow T_j$ に変化する際に新たに $depended(ff_k) = true$ となる ff_k の集合である。
2. $D_{ing}(T_i, T_j)$ を下部境界面分を持つ一定厚さをもつ堆積層を、 SM' の中ですでに堆積された層の上に生成する。
3. 以下のいずれかの方法でマスク形状を推定する。
 - 3a. 堆積材料が構造層のとき、まず $D_{ing}(T_i, T_j)$ をマスク面分集合 F_{mask} とする。次に図 4(a)のように、 F_{mask} を基板平面に投影した図形を基板平面からブーリアン差演算した形状がマスク形状になる。
 - 3b. 堆積材料が犠牲層のとき、 $pf \in ff \in D_{ing}(T_i, T_j)$ を満たす pf の Bottom Face が持つ稜線のうち、図 1 の Middle Face との共有稜線でない稜線を、稜線の法線方向かつ Middle Face の水平方向に堆積厚さだけスイープし、その Bottom face の集合を F_{mask} とする。図 4(b)のように、 F_{mask} を基板平面に投影した図形がマスク形状になる。
4. 図 4 に示すように、エッチング後のデバイス形状を式(3)により推定する。

$$SM' = (L_{om} \ominus (S_{mask} \ominus S_{om})) \hat{\cup} L_{om} \quad (3)$$

ここで L_{om} は堆積済層のうち堆積層と同一材料の層の集合と堆積層の集合、 L_{om} は堆積済層のうち堆積層と異なる材料の層の集合である。また S_{mask} 、 S_{om} はマスク形状と L_{om} を基板鉛直方向に十分スイープした図形、 \ominus はブーリアン差演算、 $\hat{\cup}$ はブーリアン和演算を意味する。

以上の手順 1-4 を繰り返し、最後に犠牲層ソリッドを除去することで、デバイスモデルの再設計が自動的に行われる。

3. 実行結果

マイクロ酸素センサ[2]の製品デバイスモデル図 5(a)に対し、製造可能な工程と、その工程向けに再設計されたデバイスモデルを本手法により導出させた。マイクロ酸素センサは Si_3N_4 、Pt、 ZrO_2 で構成され、Pt がヒーターと電極、 ZrO_2 が酸素イオンの伝導体、 Si_3N_4 が酸素の濃度を調整する空気口の役割を果たしている。導出された Process Sequence は 3 つであった。そのうち工程数の最も少ない Process Sequence で製造されるデバイスモデルの各工程を図 5(b)に、再設計されたデバイスモデルを図 5(c)にそれぞれ示す。Pt の配線や電極、 Si_3N_4 の空気口の機能が損なわれず、かつ製造が容易なデバイスモデルへの形状変換が行われている。またこの製造工程が妥当であることも MemsONE プロセスシミュレーター[3]で検証できた。工程設計システムは Parasolid API で実装し、処理時間はおよそ 6 秒であった。

4. 結論と今後の課題

MEM 工程設計システムのプロトタイプを開発し、簡単な構造の MEMS デバイスモデルに対し、製造工程の導出とデバイスモデルの再設計が可能であることを確認した。しかし、デバイスモデルの形状が初期のデバイスモデルと大きく異なり、機能を損なうようなデバイスモデルに再設計されてしまう Process Sequence も同時に導出されてしまったため、今後はこの工程を自動的に除去する機能の開発が必要である。

参考文献

- [1]北原, 他: 3次元 MEMS 工程設計システムの研究 (第1報), 2009年精密工学会春季大会講演論文集, pp.789-790, (2009).
- [2]Mohamed Gad-el-Hak: MEMS Design and Fabrication, CRC Press, pp.11-15, (2006).
- [3]MemsONEver.1.2: MemsONE プロセスシミュレーター, 財団法人マイクロマシンセンター(2009)

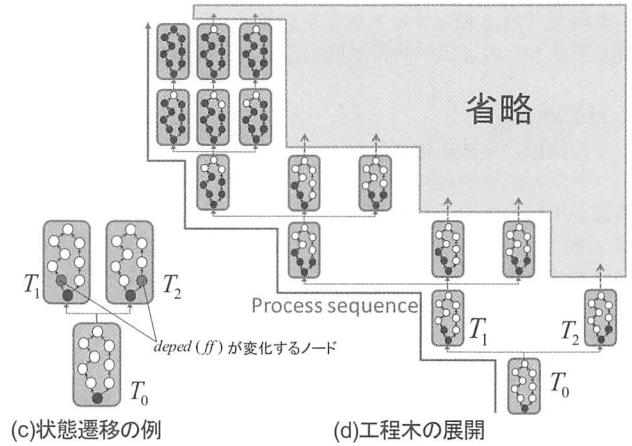
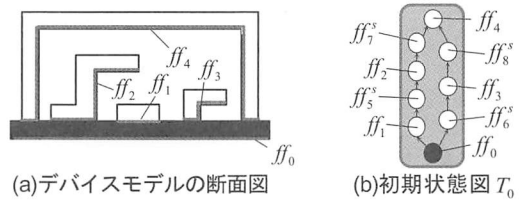


図 3 状態遷移図と工程木

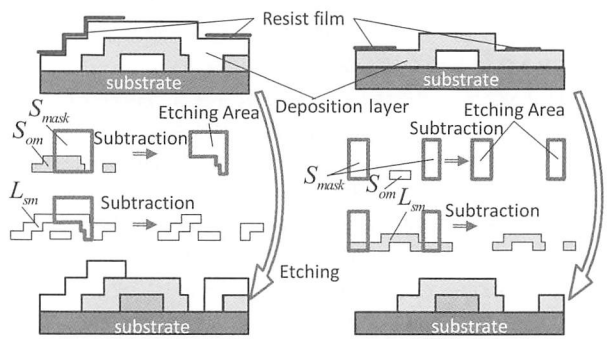
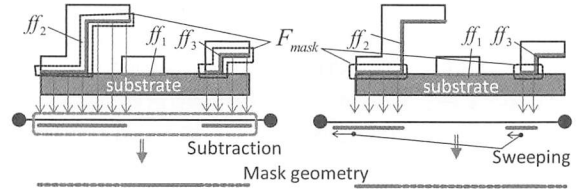


図 4 堆積形状、マスク形状、エッチング形状の推定

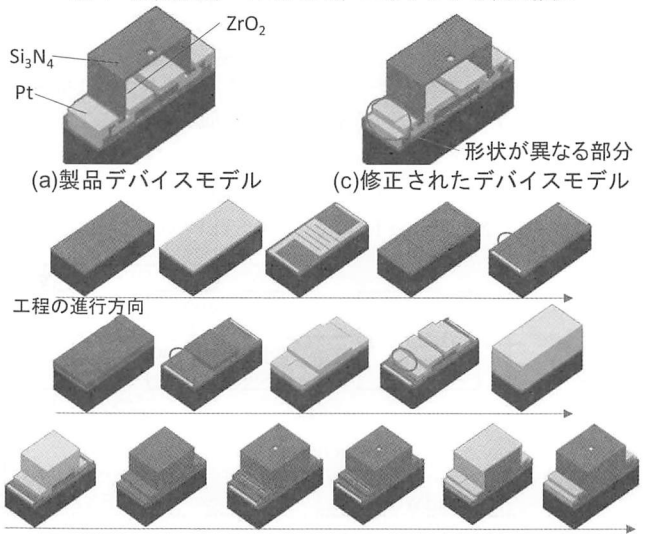


図 5 マイクロ酸素センサに対する工程設計の結果