

可変成形型電子ビーム露光データ生成のための レイアウトのL型分割手法

星 克也¹ 藤吉 邦洋¹

概要: LSI のマスク製造に用いられている電子ビーム露光装置は矩形形状のビームしか照射できないため、レイアウトを構成するレクトリニア多角形を矩形に分割して1つずつ処理していくのだが、LSI の高集積化によって処理すべき矩形数が増え、これに伴ってマスク製造コストが増大している。そこで、L 型形状のビームを照射できるように露光装置を改良することを前提に、入力図形を矩形とL型に分割する手法が提案されたが、この手法は必ずしも図形数最小の解を得ることができなかった。そこで本稿では、入力図形の形状に制限を設けることにより、動的計画法を用いて最小数の図形に多項式時間で分割するアルゴリズムを提案する。

キーワード: L型分割, 動的計画法, マスクデータ, 可変成形型露光装置

L-Shape Based Layout Fracturing for Variable Shaped Beam Mask Writing

KATSUYA HOSHI¹ KUNIHIRO FUJIYOSHI¹

Abstract: Since electron beam mask writers for LSI mask fabrication can only expose a rectangle shaped-beam, a layout pattern has to be decomposed into numerous rectangles, and then they are fabricated by the mask writing machine. Because of the increase of transistor density, the number of rectangles in a layout is increased, so manufacturing cost is also increased. So, a method which decomposes a layout into rectangles and L-shapes was proposed. However, this method cannot always obtain a set of polygons of the minimum number. In this paper, we propose a new algorithm which can decompose an input polygon into a set of polygons of the minimum number in polynomial time using dynamic programming when the shape of the input polygon satisfies a certain constraint.

Keywords: L-Shape Fracturing, Dynamic Programming, mask data, Variable Shaped Beam mask writing machine

1. はじめに

可変成形型電子ビーム露光装置は高速描画が可能であるため、近年、LSI のフォトマスクの製造に広く用いられている。この装置は矩形に成形した電子ビームを照射するため、装置の入力となる図形データ（以下、レイアウトとする）は、露光単位である矩形の集合でなければならない。そこで、入力データ生成では、レイアウトを構成する個々

の多角形を、矩形の集合に表現し直す処理（レイアウト分割処理）が必要となる。

レイアウトを矩形に分割する手法はこれまでいくつか報告されている [1][2][3]。大附らは、レクトリニア多角形を最小個数の矩形の集合に、多項式時間で分割する手法を提案している [1]。Kahng らは、線形計画法を用いて図形を分割していく手法を提案している [2]。

近年のLSI の高集積化に伴い、レイアウト分割処理で得られる矩形の数が増加してきている。露光装置は各々の矩形を1つずつ描画していくので、これに伴って電子ビーム

¹ 東京農工大学工学府電気電子工学専攻
Tokyo University of Agriculture and Technology

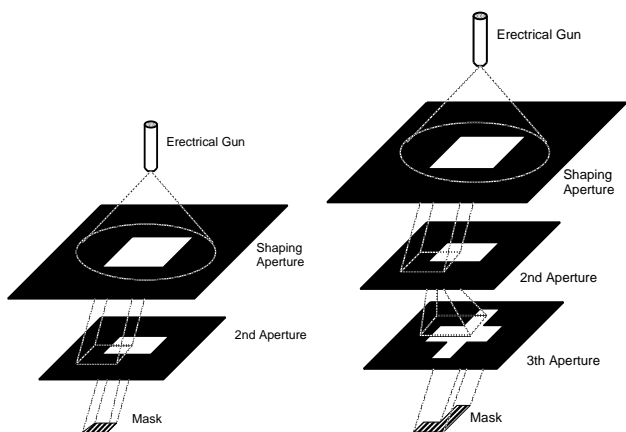


図 1 矩形の電子ビームを成形する露光装置の概略図
図 2 L 型の電子ビームを成形する露光装置の概略図

の照射回数も増加している。製造コストは電子ビーム照射回数に関係するため、製造コストも増加している。

この問題を解決するため、いくつかの方法が提案されている [4][5][6] が、その中でも、電子ビームを矩形だけでなく L 型に成形して照射するという方法は、マスク製造コストを減少させるのに効果的であるとして期待されている [5][6]。図 1 に矩形に成形した電子ビームを照射する露光装置の概略図を示す。まず電子銃から発せられた電子ビームは第一成形アパーチャを通り、一定の大きさの矩形に成形される。次に第二成形アパーチャによって所望の大きさの矩形に成形され、マスク上に描画される。ここで図 2 に示す第 3 成形アパーチャを追加することにより、電子ビームを L 型に成形することができる。もしレイアウト中の矩形がすべて L 型に結合され、L 型の電子ビームにより描画されたのであれば、照射回数を半分にし製造コストも削減できる。例えば、図 3 に示すレイアウトを矩形だけで露光した場合、電子ビームを 4 回照射する必要があるが、L 型の電子ビームで露光すると半分の 2 回で済む。

[4] は、レイアウトを矩形だけでなく L 型も含めた形状に分割することにより、矩形だけに分割した場合と較べて電子ビーム照射回数を約 38% 削減できることを示した。そこで Yu らは、レイアウトを矩形に分割した後に L 型へ結合するアルゴリズムと、直接 L 型へ分割するアルゴリズムを提案した [7]。しかし、これらの手法では最小数の矩形と L 型にレイアウトを分割できるとは限らない。

そこで本論文では、入力図形の形状に制限を設けることにより、動的計画法を用いて最小数の図形に多項式時間で分割できる手法を提案する。

2. 準備

2.1 用語の定義と問題設定

簡単のため、「レクトリニア多角形」を単に「多角形」と呼び、頂点の数が 4 もしくは 6 である多角形を単に L 型と呼ぶ。すなわち、矩形も L 型と呼ぶことにする。レイアウト

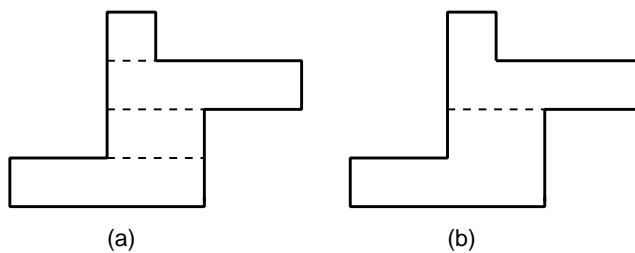


図 3 レイアウト分割の例 (a) 矩形の電子ビームでは 4 回照射する必要がある (b) L 型の電子ビームでは 2 回の照射で済む

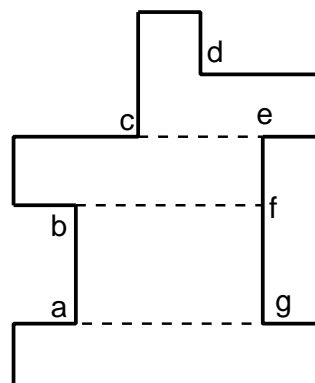


図 4 a, b, c, d, e, g は凹頂点, 辺 \overline{bc} は奇数カット, 辺 \overline{ce} は奇数弦, 辺 \overline{ag} は偶数弦である。

トを L 型に分割したとき、その L 型の数を L 型数と呼ぶ。内角の角度が 270° の頂点を凹頂点と呼ぶ。凹頂点を奇数個もつ多角形を奇多角形、偶数個もつ多角形を偶多角形と呼ぶ。

多角形の凹頂点から水平もしくは垂直に引かれた分割線を、多角形中でその境界線まで延長したものをカットと呼ぶ。両端点が凹頂点であるカットを弦と呼ぶ。多角形があるカットにより分割され、分割された多角形の一方または両方が奇多角形ならば、そのカットは奇数カットと呼ぶ。あるカットが奇数カットかつ弦ならば奇数弦、それ以外の弦を偶数弦と呼ぶ。図 4 にこれらの例を示す。

L 型分割問題 多角形が与えられたとき、分割後の L 型数が最小となるように水平もしくは垂直線分のみで、多角形を分割せよ。

2.2 性質

[8] には、弦がなく凹頂点の数が 2 以上の多角形には奇数カットは必ず存在し、凹頂点を k 個もつ多角形の内部をすべて見渡すためには、 $\lfloor k/2 \rfloor + 1$ 個の視点があれば必要十分であることが示されている。これらから次の補題を得られる。

[7] の補題 1. 凹頂点を k 個もつ多角形は、 $N_{up} = \lfloor k/2 \rfloor + 1$ 個以下の L 型に分割できる。

[7] の補題 2. 多角形を弦で分割することは、 N_{up} を増やすことはない。

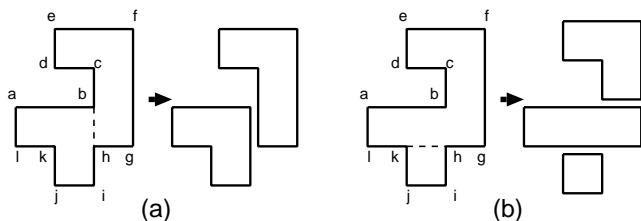


図 5 偶多角形を分割する例. (a) 奇数弦 \overline{bh} で分割すると L 型数 2 となる (b) 偶数弦 \overline{hk} で分割すると L 型数 3 となる

証明. 凹頂点の数が c の多角形をある弦で分割したとき, 凹頂点の数が c_1, c_2 の 2 つの多角形ができるとする. $c = c_1 + c_2 + 2$ であり, 分割後の N_{up} の合計 $\lfloor c_1/2 \rfloor + 1 + \lfloor c_2/2 \rfloor + 1$ は分割前の N_{up} である $\lfloor c/2 \rfloor + 1$ と比べると,

$$\begin{aligned} (\lfloor c_1/2 \rfloor + 1) + (\lfloor c_2/2 \rfloor + 1) &\leq \lfloor (c_1 + c_2)/2 \rfloor + 2 \\ &= (\lfloor c/2 \rfloor + 1) \end{aligned}$$

となり, たしかに N_{up} を増やすことはない. \square

[7] の補題 3. 偶多角形を奇数弦で分割すると, N_{up} が 1 減る.

証明. 凹頂点数が c の偶多角形を, 奇数弦で凹頂点数が c_1 と c_2 の多角形に分割したとすると, c は偶数, c_1 と c_2 は奇数, $c = c_1 + c_2 + 2$ なので

$$\begin{aligned} (\lfloor c_1/2 \rfloor + 1) + (\lfloor c_2/2 \rfloor + 1) &= (c_1/2 - 1/2 + 1) + (c_2/2 - 1/2 + 1) \\ &= (c_1 + c_2)/2 + 1 = (\lfloor c/2 \rfloor + 1) - 1 = c/2 \end{aligned}$$

\square

偶多角形を分割する例を図 5 に示す. 奇数弦 \overline{bh} で分割すると図 5(a) に示すように L 型数 2 となり, 補題 3 の通り N_{up} が 3 から 2 に減る. しかし, 図 5(b) のように偶数弦 \overline{hk} で分割すると L 型数 3 となる.

2.3 RM アルゴリズム [7]

Rectangular Merging(RM) アルゴリズムとは, レイアウトを分割して得られた矩形集合についてできるだけ多く L 型へ結合するアルゴリズムである.

レイアウトが何らかの手法で矩形に分割されたとし, その矩形集合を入力とする. 各々の矩形が頂点对応し, 1 つの L 型に結合可能な 2 つの矩形に対応する頂点の間が辺で結ばれたグラフ G を求める. すると矩形をより多くの L 型へ結合することは, 端点を共有しないように辺をできるだけ多く選択することに一致する. これは最大マッチング問題であり, 多項式時間で解くことができる. 図 6(a)

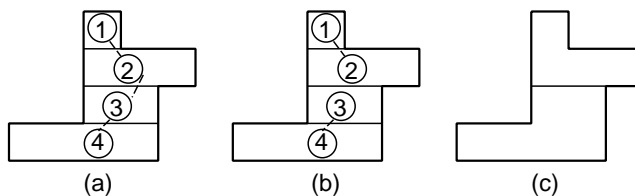


図 6 (a) グラフ G の構築 (b) 最大マッチング結果 (c) L 型へ結合された結果

にレイアウトが矩形へ分割された後, グラフを構成した例を, 図 6(b) に最大マッチング結果, 図 6(c) に L 型へ結合された結果を示す.

2.4 従来手法 (DLF アルゴリズム) [7]

2.2 に示した補題 2, 3 から, この手法では最大数の奇数弦を選択して多角形を分割していく. そのためにまず, 入力多角形における奇数弦を全て列挙する. 垂直方向の弦と水平方向の弦がそれぞれ頂点对応し, 2 つの弦が交差するか同一の凹頂点を端点とする場合に, それらの弦に対応する点の間に枝を張ったグラフを作る. すると枝は方向の異なる弦に対応する点の間だけに張られるので, これは 2 部グラフとなる. 最も多くの奇数弦を選択することは, 最大独立点集合を求めることと一致し, 2 部グラフにおいて最大独立点集合を求めることは最大流問題を解くことに帰着できるため, 多項式時間で求めることができる. 奇数弦で分割した後, 矩形もしくは L 型になるまで再帰的に奇数カットで分割していく.

例えば図 7(a) に示す凹頂点数 9 の多角形が入力されたとき, 全ての奇数弦を列挙すると弦 v_1, h_1, h_2 となる. そこから 2 部グラフを作成したものを図 7(b) に示す. 最大独立点集合を求めて, それに対応する弦で分割した後, 矩形もしくは L 型になるまで奇数カットで再帰的に分割した結果を図 7(c) に示す.

しかし, この手法では L 型数を最小とする解を得られない場合がある. これは入力多角形における奇数弦での分割により, 奇数弦が偶数弦に変化したり, 偶数弦が奇数弦に変化するためだと考えられる. 図 8 に例を示す. DLF アルゴリズムにより得られた分割結果である図 8(a) の一番右の弦で分割すると, 残り 2 つの弦は奇数弦から偶数弦へ変化しており, L 型数は 4 となるが, DLF アルゴリズムでない分割結果である図 8(b) の L 型数は 3 であり, たしかに L 型数最小解を得られていない.

3. 提案手法

上記の問題点を解決するため本研究では, 以下に示す条件を満たした多角形を対象として, これを最小数の L 型に分割できる, 動的計画法を用いた手法を提案する.

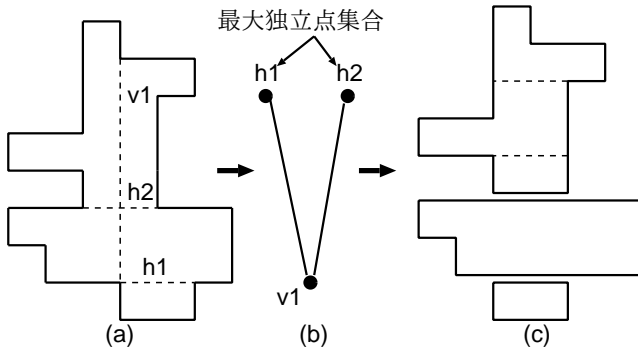


図 7 (a) 凹頂点数 9 の奇多角形 (b) 2 部グラフ (c) 分割された結果

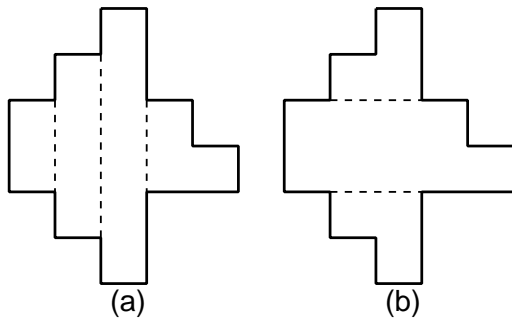


図 8 DLF アルゴリズムでは L 型数最小解を得られない例 (a)DLF アルゴリズムでの分割結果 (b)DLF アルゴリズムを用いないで分割した結果

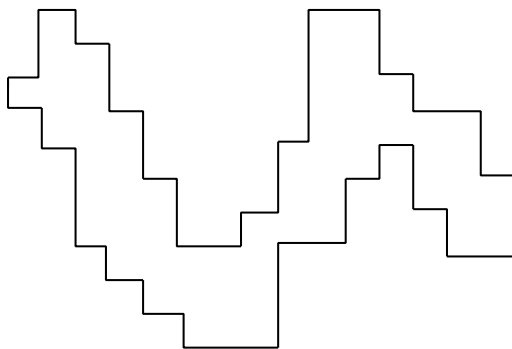


図 9 y 方向凹多角形の例

y 方向凹多角形 内部の任意の 2 点を x 方向に最短で結ぶレクトリニアパスを内包する多角形

y 方向凹多角形の例を図 9 に示す。多角形内にあるどの 2 点を選択しても x 方向に最短でレクトリニアパスを結ぶことができることがわかるだろう。

分割対象の y 方向凹多角形 P には、垂直方向の弦が x 座標の小さい順に m 本 (v_1, v_2, \dots, v_m) あるとする。最左辺および最右辺をダミーの弦としてそれぞれ v_0, v_{m+1} と表し、次の部分問題 $P_l(v_j)$ を定義する。

部分問題 $P_l(v_j)$ 入力された部分多角形 P を弦 v_j で分割し、その左側にある部分多角形を最小数の L 型に分割せよ。

この部分問題の最適解の L 型数を $L_l(v_j)$ と表す。また、弦 v_i と v_j で P を分割し、これら 2 つの弦にはさまれた多角形をまず水平方向の弦で分割し、その後垂直方向の弦も含めて最小数の L 型になるまで分割したときの L 型数を $L(v_i, v_j)$ とすると、 $L_l(v_j)$ は

$$L_l(v_j) = \min_{i=0,1,\dots,j-1} \{L_l(v_i) + L(v_i, v_j)\} \quad (1)$$

で求められる。これは $L(v_i, v_j)$ が、弦 v_i と v_j に挟まれた多角形を、垂直方向の弦を用いずに最小数の L 型に分割したときの L 型の数に等しいからである。そして、 $L_l(v_j)$ と $L(v_i, v_j)$ は互いに独立に求まるので最適性の原理が成り立ち、動的計画法で最適解を得ることができる。従って y 方向凹多角形 P の L 型分割問題の最適解は $L_l(v_{m+1})$ で求まる。

以下に、 $L(v_i, v_j)$ と $L_l(v_j)$ を求めるアルゴリズムを示す。

```

/*L(v_i, v_j) を求める*/
SolveLij( 弦 v_i, 弦 v_j ){
    弦 v_i と弦 v_j の間に存在する全ての
    水平方向の弦 (m 本とする) で分割し、
    部分多角形 P_0, P_1, ..., P_m を生成;
    各々の部分多角形 P_q の凹頂点数 k_q を求める;
    L(v_i, v_j) = \sum_{q=0}^m (\lfloor k_q/2 \rfloor + 1);
    /*P_q の分割は x 座標が小さい方から偶数番目の
    凹頂点を通る垂直方向のカットで分割すればよい*/
}
/*L_l(v_j) を求める*/
SolveLl( 多角形 P ){
    prev(1) = 0, L_l(v_0) = 0;
    for( j = 1; j <= 垂直方向の弦の本数 + 1; j++ ){
        min = L_l(v_0) + L(v_0, v_j); pre = 0;
        for( i = 1; i < j; i++ )
            if( min > L_l(v_i) + L(v_i, v_j) )
                min = L_l(v_i) + L(v_i, v_j), pre = i;
        L_l(v_j) = min; prev(j) = pre;
    }
}

```

表 1 提案手法適用結果 ($L(v_i, v_j)$)

i \ j	0	1	2	3	4	5
0	-	3	4	5	6	6
1	-	-	1	2	3	3
2	-	-	-	1	2	3
3	-	-	-	-	1	2
4	-	-	-	-	-	1
5	-	-	-	-	-	-

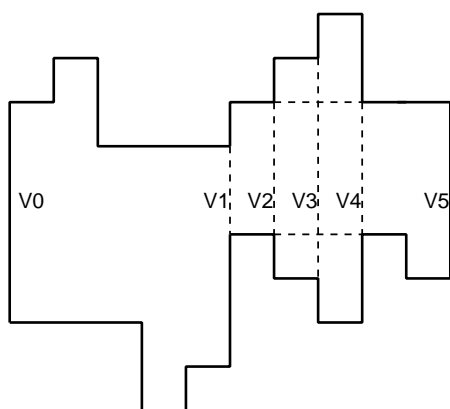


図 10 y 方向凹多角形 P に存在する垂直方向の弦 v_1, \dots, v_4 と水平方向の弦 2 本は全て奇数弦

表 2 提案手法適用結果

j	0	1	2	3	4	5
$prev(j)$	-	0	1	2	3	1
$L_l(v_j)$	0	3	4	5	6	6

例として、図 10 に示す y 方向凹多角形を提案手法を用いて分割した結果を表 1, 2 に示す。表 1 の $prev(j)$ は $L_l(v_j)$ を求めた際に用いた $L_l(v_t)$ の弦の添字 t を表す。但し、最小解が複数ある場合は最右辺の弦を選択した。式 (1) から

$$\begin{aligned} L_l(v_1) &= \min\{L_l(v_0) + L(v_0, v_1)\} \\ &= L_l(v_0) + L(v_0, v_1) \end{aligned}$$

となる。 $L(v_0, v_1)$ の求め方であるが、弦 v_0 と弦 v_1 の間には水平方向の弦がないので、 $L(v_0, v_1) = \lfloor 4/2 \rfloor + 1 = 3$ 、 $L_l(v_0) = 0$ なので $L_l(v_1) = 3$ となる。

次に $L_l(v_2) = \min\{L_l(v_0) + L(v_0, v_2), L_l(v_1) + L(v_1, v_2)\} = \min\{0 + 4, 3 + 1\} = 4$ となる。同様にして表 1, 2 を埋めていき、最終的に L 型分割問題の最適解 $L_l(v_5) = 6$ が求まるが、 $prev(5) = 1$ 、 $prev(1) = 0$ なので、選択された垂直方向の弦は v_1 のみである。図 11 に分割結果を示す。なお、この多角形を DLF アルゴリズムに基づき奇数弦を選択すると、垂直方向の弦すべてが選択されて、L 型数は 7 となり、提案手法よりも L 型数が多くなる (図 12 参照)。

4. まとめ

y 方向凹多角形を最小数の L 型に分割できる、動的計画法を用いた手法を提案した。今後の課題としては、レクトリニア凹多角形への拡張、寸法精度低下の原因となる非常に幅の狭い矩形である sliver を考慮した分割手法の考案などが考えられる。

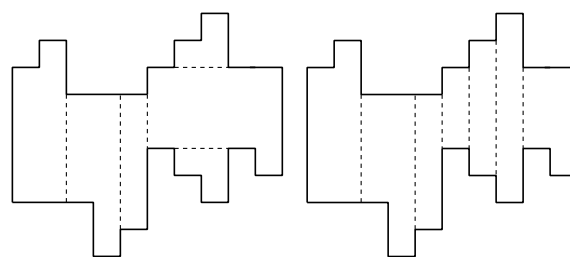


図 11 提案手法での分割結果

図 12 DLF アルゴリズムでの分割結果

参考文献

- [1] 大附辰男, 佐藤政生, 橘昌良, 鳥居司朗, “複合長方形領域の最小分割”, 情報学論, vol.24, no.5, pp.647–653, Sept.1983.
- [2] A. B. Kahng, X. Xu, and A. Zelikovsky, “Fast Yield-Driven Fracture for Variable Shaped-Beam Mask Writing”, in Proc. of SPIE, vol. 6283, 2006.
- [3] X. Ma, S. Jiang, and A. Zakhor, “A cost-Driven Fracture Heuristics to Minimize Sliver Length”, in Proc. of SPIE, vol. 7973, 2011.
- [4] E. Sahouria and A. Bowhill, “Generalization of Shot Definition for Variable Shaped E-beam Machines for Write Time Reduction”, in proc of SPIE, vol. 7823, 2010.
- [5] A. Elayat, T. Lin, E. Sahouria, and S. F. Schulze, “Assessment and Comparison of Different Approaches for Mask Write Time Reduction”, in Proc. of SPIE, vol. 8166, 2011.
- [6] K. Yuan, B. Yu, and D. Z. Pan, “E-Beam Lithography Stencil Planning and Optimizarion with Overlapped Characters”, IEEE Trans. on CAD, vol. 31, no 2, pp. 167–179, Feb. 2012.
- [7] B. Yu, J.-R. Gao, and D. Z. Pan, “L-Shape Based Layout Fracturing for E-Beam Lithography”, in Proc. of ASP-DAC, pp. 249–254, 2013.
- [8] J. O'Rourke, “An alternate proof of the rectilinear art gallery theorem”, Journal of Geometry, vol. 21, pp. 118–130, 1983.