

# 図形検索のための直線スケルトンを使った多角形分割

妹尾 葉子\*

今井 桂子†

\* 中央大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

† 中央大学 理工学部 情報工学科

**概要** 人間が視覚的物体を認識する過程では、その物体をいくつかの部分に分割してとらえていると考えられている。これまでスケルトンを基にした様々な多角形分割が提案されてきているが、Tănase と Veltkamp [3] は直線スケルトンを使った新しいタイプの多角形分割を提案している。本論文では、彼らの手法とあわせ、被験者による分割実験の結果から、人間の分割になるべく近く、図形検索のためのより実用的な多角形分割方法を提案する。

## Polygon Decomposition based on the Straight Line Skeleton for Image Retrieval

Yoko SENOO\*

Keiko IMAI†

\*Information and System Engineering Course,

Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

†Department of Information System and Engineering, Chuo University

**Abstract** In this paper, we consider polygonal decomposition for polygon-shaped objects for image retrieval. It is thought that we decompose objects into small pieces in the first step of recognizing those objects. Therefore it is one of the most important problems in image retrieval to decompose polygon-shaped objects into small polygons. Moreover the decomposition is required to resemble human being's result. We propose a new practical method of polygonal decomposition based on the algorithm by straight line skeletons in [3]. We performed experiments for polygon decomposition by human subjects and compared the results with those given by our algorithm.

### 1 はじめに

近年、コンピュータやデジタルカメラ等電子機器の発達により、企業や大学、病院、個人などあらゆる場所に膨大な量のデジタル画像が溢れている。しかしながら、これらのデータの中から必要とする画像を探し出すためには、キーワードによる検索か、またはブラウジングを行なうしか有効な手段がないのが現状である。

さらに商用・研究用を問わず、様々な画像検索システムが開発されているが、その基礎となる技術において図形検索はまだ十分に生かされているとはいえない。

本研究では、図形検索に使用することを目的とし、多角形を適切な部分に分割するアルゴリズムを提案する。尚、検索する図形の間い合わせ (query) は人が入力することを前提としている。そのため、

実際に被験者による分割実験も行い、提案手法の妥当性についても考察する。

### 2 直線スケルトンとイベント

直線スケルトンは、Aichholzer と Aurenhammer [1] によって提案された直線のみで構成されたスケルトンである。中心軸 (medial axis) と同様、wavefront (多角形の各辺から一定の距離をたもった点の集合) の交差する軌跡をもとに作成される。中心軸は、直線と反射頂点 (reflex vertices) に伴って生成される Voronoi 図形の円弧によって構成されているため、コンピュータ上で扱うには難しい点がある。それに対し、直線スケルトンはその名の通り直線のみで構成され、組み合わせ複雑度は中心軸よりは一般に低いといえる。

以下に直線スケルトンの定義及び wavefront が進んで行くにつれて起こるトポロジーの変化を見

ていく．このトポロジーの変化（イベントとよぶ）の様子が後の多角形分割に非常に重要な役割を果たす．

## 2.1 直線スケルトンの定義

$P$  を単純な多角形で，反時計回りにその辺が与えられているものとする． $\vec{e}_i$  が多角形  $P$  の辺とすると， $l_{\vec{e}_i}$  をそのサポートラインと定義する． $\vec{e}_i$  と  $\vec{e}_j$  の二等分線  $B_{ij}$  を  $\vec{e}_i$  と  $\vec{e}_j$  両者の左側に位置する  $l_{\vec{e}_i}$  と  $l_{\vec{e}_j}$  の角二等分半直線とする．両端点が  $P$  の凸頂点である辺を凸辺とよび，少なくとも1つが  $P$  の反射頂点を含む辺を反射辺とよぶ．以下の wavefront の伝播プロセスを  $P$  に対して定義する．各辺は一定のスピードをたもったまま平行に，反射頂点では鋭角をたもったまま進んでいく．このような，多角形  $P$  内側に縮んでいく様子を wavefront とよぶ．伝播の間 wavefront は1つの単純で接続していない多角形になるまで分割されていく．また，wavefront の頂点は wavefront の辺の角二等分線にそって動く． $x$  を多角形  $P$  の内部の点とし， $x$  を境界線上に持つ wavefront を  $F(x)$  とする．

定義 1.  $P$  の直線スケルトン  $S(P)$  とは，上記の伝播プロセスの間，wavefront の頂点によって描かれた角二等分線の要素の和集合として定義される．

これらの二等分線の集合を arc とよび， $S(P)$  に含まれる arc の端点で， $P$  の頂点でないものを node とよぶ．

## 2.2 イベントの分類

多角形の頂点は多角形のトポロジーが変化するまで角二等分線にそって動いていく．Tanase と Veltkamp [3] は，辺に関するイベント (Edge Event) 及び分割イベント (Split Event) それぞれを3種類づつ，合計6種類に分類している．

- (1) 辺に関するイベント (Edge Event) : 辺は wavefront が進むにつれ縮小して長さ0になり，その両隣の辺どうしが接続する．
  - (a) 凸辺消滅: 凸辺が縮小して長さが0になる．
  - (b) 反射辺消滅: 反射辺が縮小して長さが0になる．このとき，反射頂点も前線から消える．
  - (c) 前線消滅: 多角形が全て1点，1つまたは2つ以上の線分に縮約される．

- (2) 分割イベント (Split Event) : wavefront が以下のイベントによりいくつかの多角形に分割される．
  - (a) 頂点-辺衝突: 1つの反射頂点の先端が1つの辺に衝突し，前線が2つに分かれる．
  - (b) 頂点-頂点衝突: 2つの頂点（高々1つが凸頂点）が同じ場所でぶつかり，前線を2つに分割する．このタイプのイベントは他の辺イベントや，頂点-辺衝突と違い，wavefront に新しい反射頂点を導入する．
  - (c) 辺-辺衝突: 平行な前線が同じ場所で重なる．

## 3 直線スケルトンのイベントを用いた多角形分割 (従来手法)

前節で述べたイベントのうち，最初に分割イベント (Split Event) である“頂点-辺衝突”と“頂点-頂点衝突”の情報を使って，大域分割 (Global Splitting) を行い，その後，大域分割されたそれぞれの多角形について辺に関するイベント (Edge Event) の1つ“反射辺消滅”を使って突起部分削除 (Locally Removing Detail) を行なうという2段階にわたり多角形の分割を行う．以下にその分割線の描き方を示す．

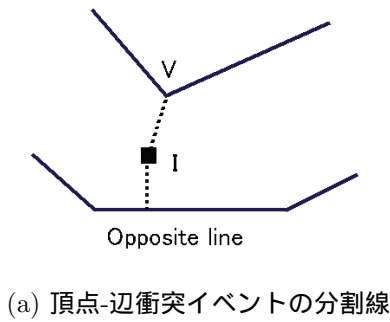
### 3.1 フェーズ1: 分割イベントを利用した大域分割

“頂点-辺衝突”と“頂点-頂点衝突”から多角形の最も目立つ部分の形状及びその数についての情報を得ることができる．これらの分割イベントはそれが発生した順番に処理され，分割線はそれぞれ以下のように作成する．

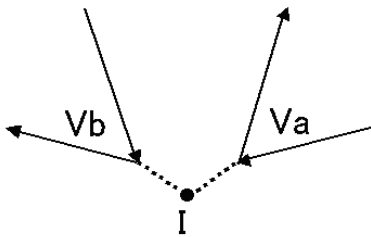
- 頂点-辺衝突イベント
  - 交点  $I$  から，頂点  $V$  までのスケルトン arc  $VI$  及び交点  $I$  から 衝突する辺 (opposite line) へ向かう垂線の2本を分割線とする ( 図 1(a) ) ．
- 頂点-頂点衝突イベント
  - 交点  $I$  から，それらを生じさせた頂点  $V_a, V_b$  へのスケルトン arc を分割線とする ( 図 1(b) ) ．

### 3.2 フェーズ2: 反射辺消滅イベントを利用した突起部分削除

“反射辺消滅”のイベントは多角形の小さな突起部分に関連しており，これらの突起部分を切り取るにより多角形をより滑らかな形に整えることができる．



(a) 頂点-辺衝突イベントの分割線



(b) 頂点-頂点衝突イベントの分割線

図 1. 大域分割線の引き方

フェーズ 1 の大域分割では、多角形  $P$  は  $n$  個の重複しない部分に分けられる。突出部分削除の計算は、この分割された各多角形  $P_i, i = 1, \dots, n$  に対してそれぞれ別々に処理を行なう。

図 2 の  $x$  を反射辺消滅イベントが生じた交点とする。反射辺は  $x$  において消滅し、隣り合う辺が接続して凸な  $F(x)$  ( $x$  を境界上にもつ wavefront) を形成する。 $\vec{f}_1, \vec{f}_2$  を  $x$  に伴う  $F(x)$  上の辺とし、 $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  を多角形  $P$  上の辺とする。また  $\vec{e}$  を  $P$  上で、この反射辺消滅イベントで消滅する辺とする。

$x$  に伴う  $F(x)$  上の 2 つの wavefront  $\vec{f}_1, \vec{f}_2$  を両者が  $P$  に到達するまで逆にたどっていく。そして  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  上で、 $v \in \vec{e}_1, u \in \vec{e}_2$  となる  $P$  に沿った最も近い 2 点  $u, v$  を見つける。この  $uv$  が  $x$  に伴う突出部カットの両端である (図 2 の破線)。

#### 4 計算機実験結果と考察

上記の手法で計算機実験を行なった結果を図 3 に示す。不自然に分割面が膨らんでいるところが見られる。これは、頂点-辺衝突の部分で衝突辺に対して垂直に分割線をおろす手順になっているため、交点のところで急激に分割線の角度が変化してしまうこともある。

さらにフェーズ 2 で、小さな突出部をカットする際に、同じ箇所に重複して異なる形の線分による分割が生じているところが見られる。

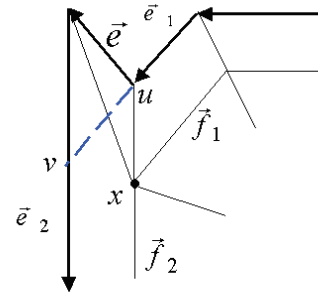


図 2. 突出部カットの求め方

そこで、人間にとって自然な分割とはどのようなものか。次節の被験者による実験で調査する。

#### 5 被験者による図形分割実験

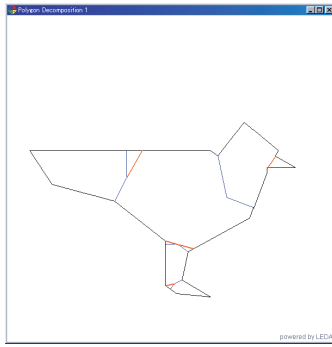
本研究では、検索する図形の問い合わせ (query) は、基本的に人が入力することを前提としている。そのためには、人間は多角形をどのように図形に分割するか実際に調査する必要がある。そこでいくつかの多角形の図を用いて被験者による実験を行なった。

##### 5.1 実験手順

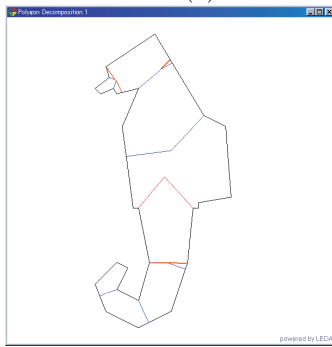
実施日は 2004 年 12 月、被験者は 20 代男女計 17 名、分割対象図形となる図形は、頂点数 12 ~ 27 の直線のみで構成された単純な多角形である。生物を模した折り紙の図案をもとに LEDA [2] で描画した輪郭のみの図形を A4 用紙に印刷して用いた。図形は、練習用 1 図形を含む全 9 図形。実験は個別面接方式で行なわれた。被験者は上記の輪郭のみの図形を 1 つずつ提示され、その図形に線を引いていくつかのパーツに分割するよう指示され、また同時に図形全体を記憶することを要求される。図形はランダムな順序で提示され、提示時間は 1 図形につき 20 秒間、その後図形は見えないところに隠される。被験者は記憶した図形を別の白い A4 紙に描画する。

##### 5.2 実験結果及び考察

実験の結果を図 4 に示す。3 割 (6 名) 以上の被験者が描いた分割線を示してある。線の横の数字はその線を引いた被験者の数を表している。また、表 1 にそれぞれの図形の頂点数・反射頂点数、平均・最大・最小分割本数及び実験後各図形に対して「図形から何か想起するものはあったか」と

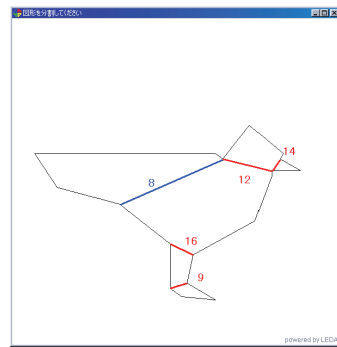


図形 (a)

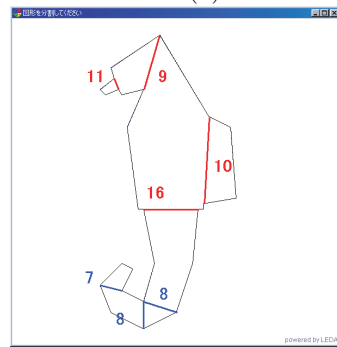


図形 (b)

図 3. 従来の手法による出力



図形 (a)



図形 (b)

図 4. 被験者による分割結果

いう質問に対する回答を示す。頂点でないものど  
うしや頂点と頂点以外（例：線分の中点）を結ぶ  
被験者は非常に少なく，与えられた頂点以外に自  
ら点を追加する被験者はほとんどいなかった。凸  
頂点と凸頂点を結んだ被験者も少ない（表 2）。し  
かしながら，どの反射頂点に対しても，ほぼ 3 割  
以上の被験者は分割線を施している。

以上の結果から，人間は反射頂点に対して強く  
反応し，反射頂点と反射頂点または反射頂点と凸  
頂点を分割線として用いる傾向が非常に強いと考  
えられる。

## 6 提案手法

被験者による実験結果を考慮にいれ，以下のよ  
うに大域分割線の引き方を改善する。

### 6.1 大域分割線の引き方

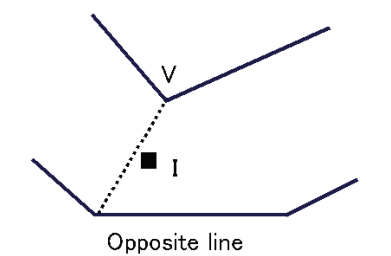
- 頂点-辺衝突イベント
  - － 衝突辺 (opposite line) の両端点のうち，交  
点  $I$  から距離の近い方の端点と頂点  $V$  を  
直接結び分割線とする ( 図 5(a) ) 。
- 頂点-頂点衝突イベント
  - － 交点  $I$  を生じさせた頂点  $V_a, V_b$  を直接結  
び分割線とする ( 図 5(b) ) 。

表 1. 実験結果：分割線数と表象

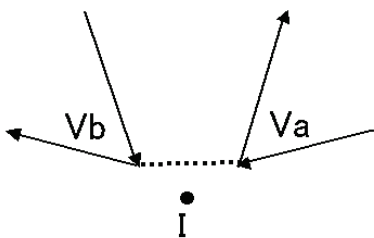
	(a)	(b)
頂点数	19	27
反射頂点数	6	10
平均分割線数	4.2	5.7
頻出分割線数	5	4 or 7
最大分割線数	6	11
最小分割線数	1	2
想起したもの	鳥	タツノオトシゴ
とその人数 (人)	17	17

表 2. 実験結果：分割線と頂点の関係 ( 全 777 本)

	頂点でない	凸頂点	反射頂点
頂点でない	1	4	26
凸頂点	-	12	288
反射頂点	-	-	446

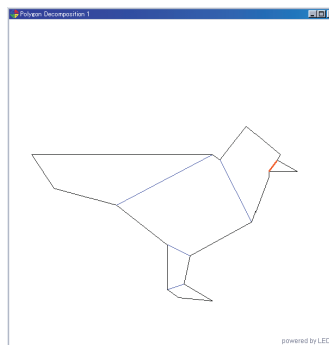


(a) 頂点-辺衝突イベントの分割線

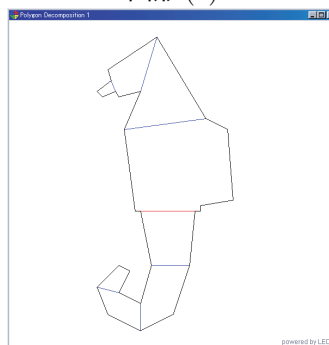


(b) 頂点-頂点衝突イベントの分割線

図 5. 大域分割線の引き方 (提案手法)



図形 (a)



図形 (b)

図 6. 提案手法による出力結果

## 6.2 計算機実験の結果と考察

上記の手法を計算機上に実装した結果を図 6 に示す。従来手法にくらべ、より被験者の実験結果に近い結果が得られたと思われる。

## 7 まとめ

直線スケルトン作成の際のイベントを用いた多角形分割手法は、どの頂点とどの頂点、線分を分割の要素として用いればよいかについて、重要な示唆を与えてくれる。筆者らはまた、被験者による実験の結果から、人の多角形分割の特徴を調査し、大域分割に対する改善案を提案した。

人が物を認識しようとするときには、様々な戦略や知識を状況に応じて使い分けている。そのため今回の提案手法も完全に人間と同じ分割結果を計算機上で求めることはできなかったが、より人間に近いシンプルな分割結果を得られたと考える。

## 参考文献

[1] Aichholzer, O. and Aurenhammer, F. : "Straight Skeleton for General Polygonal Figures in the Plane," In: *Proc. 2nd International Computing and Combinatorics Conference COCOON '96*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1090, Springer-Verlag, pp. 117-126, 1996.

[2] Mehlhorn, K. and Näher, S. : *LEDA A platform for combinatorial and geometric computing*, Cambridge University Press, 1999.

[3] Tánase, M. and Veltkamp, R.C. "Polygon Decomposition based on the Straight Line Skeleton," *Proc. 19th Symp. Computational Geometry, ACM*, pp. 58-67, Jun 2003.