

切り絵のための効率的なカッティング経路決定法

システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻

博士前期課程 2年 201120729 中島健次郎

指導教員: 三谷純 金森由博 福井幸男

2012年5月31日

1 はじめに

「切り絵」(図 11.) は一枚の紙をカッターで切り抜いて作り上げる絵画手法の一つである。寄席で見ると紙を折り曲げ、ハサミで切り抜く「紙切り」(図 12.) とは制作工程から異なる。



1. 切り絵作品 [1]

2. 紙切り作品 (著者作)

図 1: 作品例

切り絵作品は一枚の繋がった紙でないといけないという制約が存在する。そのため、素人がオリジナルな切り絵をデザインするためには経験と知識が必要となる。また、作品を綺麗に仕上げるためには、その切り順も重要な要素であるが、適切な順序で切り抜いていくには経験が求められる。

一繋がりデザインに関して、Xuらは画像から切り絵のための一繋がり2値画像を作り出す手法を提案した[2]。また、Igarashiらはステンシルのデザインのためのドローエディタを提案した[3]。ステンシルとは穴の開いた型板を用いて図柄を描く絵画技法であり、型板は一枚の繋がった板からなる。図柄の形状の制約は切り絵と同じであるため、このドローエディタを用いて切り絵をデザインすることも可能である。一方、切り絵の適切な切り順に関しては、既存研究は存在しない。似たような研究分野として、金属板加工におけるプラズマレーザー等でのカッティング経路探索がある。なるべく短い経路で熱による歪みや、切り出しパーツの入れ子構造等を考慮に入れたカッティング経路を提案する。その探索方法では遺伝的アルゴリズム(以降GA)を用いた探索もある[4, 5]。

前年度からの研究として経験が必要なこれら2つの工程を支援するシステムを目指している。本研究ではうち紙の切り抜き工程に関して研究を行った。本来ならば手作業で切っていくが、今回は任意の形状を切り抜く装置であるカッティングプロッタ(以降プロッタ)を用いてより生産的に切り抜き工程を支援する研究を行った。

プロッタを用いた紙のカッティング経路において考慮に入れるべき要素として、まず考えられるのはカッターの移動距離であり、その短縮が制作時間の短縮につながる。次に考えるべきなのは、紙を切ろうとするとずれが発生する可能性があることである。プロッタではずれ防止のために粘着性のあるシートや静電気で紙が貼りつくようになっている。

しかし、使いこむうちに粘着が弱まったり、粘着や静電気が働きづらい素材であったり、複数枚重ねて切ろうとした場合などはずれが発生してしまう。

本研究では、このずれの発生に関して構造力学を基にしたずれの判定方法を導き、ずれに関する定理を導き、任意の形状に対してずれないカッティング経路があることを示唆し、ずれないカッティング経路の一つを提示するシステムを提案する。

2 カッティング環境

本来の切り絵制作の切り抜き作業において、紙の端をテープ等でカッター板等に固定する。プロッタでのずれ防止ではずれの回避には不十分であるため、本カッティング環境でもこの固定方法で考えていく。さらに、限りなくずれやすい場合でもずれずに切り抜けるかどうかを確かめるためずれ防止シートの上に紙を2枚重ねた環境でカッティングを行う。

この環境で既存のプロッタ付随の制御ソフトで図 11. の切り絵の画像を切り出した。粘着シートの効果が働かない場合は予想通り満足な結果とはならなかった(図 21.)。また、下の粘着が働く紙でも上の紙の挙動が切り抜きに影響を与え、満足のいく出力とはならなかった(図 22.)。本環境でも満足のいく出力結果となるカッティング経路を目指す。



1. 上の紙

2. 下の紙

図 2: 既存のソフトによる切り出し結果

3 構造力学的な「ずれ」の定義

まず、切られる媒質である紙について、紙は両側から引っ張っても比較的容易には引きちぎれない。逆に圧縮力を加えると容易にたわんで曲がってしまう。このことから紙には引張応力は働くが、圧縮応力は働かないと考えられる。

次に紙の切り方について、カッターを紙に押し付け圧力で切る方法と、紙に刃が入っている状態で引っ張る力で切る方法が考えられる。前者は切り始めのみで、後者で多くの線を切っていく。「切る」とは目的の方向に力を加える行為と定義する。

切る力に対して引張応力が働く場合、力は釣り合い、紙はずれることなく切れる。しかし、引張応力が働かない場合、紙には圧縮応力は働かないので、力は釣り合わず紙が移動し、切ることができない。切る力に対して引張応力が働いたら「ずれない」、働かないなら「ずれる」と定義する。切る力の逆方向に引張応力が働かなかったとしても、力の分解によって方向を変えることで引張応力が働く場合もある。

4 ずれ判定方法

ずれの判定は再帰的なアルゴリズムで判定される。従って再帰呼び出しを行うことを明確にするために、切るときに力を F 、その力の始点を S として擬似コード：**ずれ判定**(力 F , 始点 S) を定義する。

ずれ判定では力 F と逆方向に引張応力 F^- が働くかを調べる。このとき、 F^- の向かう先 (固定されている辺または、切られている線との最初の交点) を点 V とする (図 3 左)。点 V が固定されている、切れ目の端である、端以外の切れ目である場合に分けられる。

4.1 固定されている場合

固定されている点 V ではどの方向からの力に対しても抗力が働く。従って力 F に引張応力 F^- が働き、**ずれ判定**(F, S) は「ずれない」(図 3)。

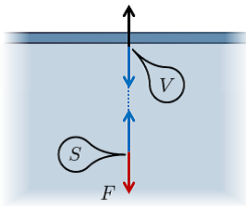
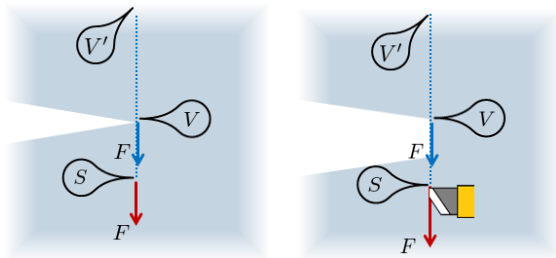


図 3: V が固定されている例

4.2 切れ目の端である場合

紙の切れ目の端 V で F^- が働くかは V よりさらに先の点 V' による (図 4)。よって再帰呼び出しの**ずれ判定**(F, V) が**ずれ判定**(F, S) の判定結果になる。



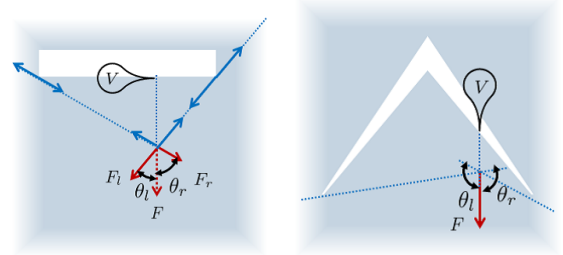
1. 点で接する 2. 線で接する

図 4: V が切れ目の端の例

4.3 端以外の切れ目である場合

点 V は固定されていないので抗力は働かず F^- は働かない。しかし、 F を左右に分解することによって引張応力が

働く場合を調べる必要がある。左右に分解した力を F_l, F_r とし F との角をそれぞれ θ_l, θ_r (初期値 0) とする。それぞれで引張応力が働くかどうかを調べるので**ずれ判定**(F_l, S) と**ずれ判定**(F_r, S) を再帰呼び出しする。**ずれ判定**(F_l, S) または**ずれ判定**(F_r, S) で「ずれる」と返ってきた場合はそれぞれで角度 θ_l, θ_r を変えて (増やして) 「ずれない」と返ってくる角度を求める。 $\theta_l + \theta_r < \pi$ で**ずれ判定**(F_l, S), **ずれ判定**(F_r, S) が両方とも「ずれない」となる θ_l, θ_r が存在する場合、 F は分解によって引張応力が働くので**ずれ判定**(F, S) は「ずれない」(図 51)。しかし、そのような θ_l, θ_r が存在しないなら F が分解できる範囲で引張応力は働かないので**ずれ判定**(F, S) は「ずれる」(図 52)。



1. 分解でずれない例 2. 分解できない例

図 5: V が端以外の切れ目の例

4.4 再起呼び出し中にループが起こる場合

点 V の場合分けを説明してきたが、再帰呼び出しにより自身の**ずれ判定**(F, S) が呼び出されることがある。その場合はループが起こっている全ての力に対して引張応力は働かないので、この場合も**ずれ判定**(F, S) は「ずれる」(図 6)。

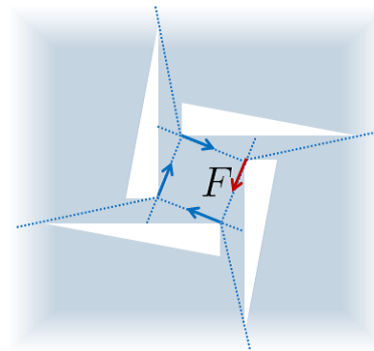


図 6: 再起呼び出し中にループするの例

以上の再帰呼び出しによってずれるかどうかの判定を行うことができる。以下にその擬似コードを示す。

5 ずれに関する定理

前章と同様に、切るときに力を F 、その始点を S とする。

5.1 切られた線で作られる凸包

点 V が端でない切れ目のとき、点 V を含む切られた線が存在する。その切られた線とつながっている全ての頂点で作られる凸包を C とする。このとき、凸包 C に始点

S が含まれているならば、凸包の性質より力の分解角度 $\theta_l + \theta_r < \pi$ では点 V は紙の切れ目となるのでずれ判定 (F, S) は「ずれる」(図 71.). 凸包 C に始点 S が含まれていないなら始点 S から凸包 C への接線を 2 つ引くことができ、 F をその接線の 2 つ方向で左右の力 F_l, F_r に分割すると、凸包の性質から $\theta_l + \theta_r < \pi$ である. このときの接点を V_l, V_r とするとずれ判定 (F_l, V_r) , ずれ判定 (F_r, V_l) が再帰的に呼び出される (図 72.).

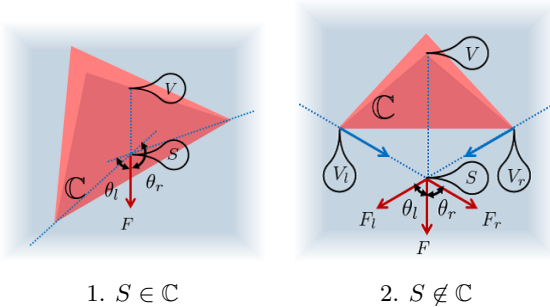


図 7: 切られた線で作られる凸包

5.2 交差する 2 つの凸包から作られる凸包

5.1 節の凸包 C に始点 S が含まれていない場合で、さらに片側の接点 V_l が他の凸包 C_l に含まれている場合を考える. 凸包 C と凸包 C_l の全頂点で作られる凸包を C' としておく. ずれ判定 (F, S) では 5.1 節よりずれ判定 (F_r, V_l) が再帰呼び出しされる. ずれ判定 (F_r, V_l) における引張応力 F_r の先の点 V_l' は必ず C_l に含まれ、かつ、凸包 C_l に点 V_l が含まれているため 5.1 節よりずれ判定 (F_r, V_l) は「ずれる」. ずれ判定 (F, S) に戻り θ_l を増やしてずれ判定 (F_l, S) を確かめていく. このとき、結局は点 S と凸包 C_l との接線で力が分解できるを確かめることになる. その際、 $\theta_l + \theta_r < \pi$ ならばその方向に力が分解され (図 82.), そうでなければ「ずれる」ことになる (図 81.). このとき、 $\theta_l + \theta_r < \pi$ かどうかは始点 S が 2 つの凸包から作られた凸包 C' に含まれるかどうかでもある (図 8 の 2 つを比較). 点 V は凸包 C に含まれ、凸包 C は凸包 C' に含まれているので点 V は凸包 C' に含まれる. 従って、交差する (共通の点を持つ) 2 つの凸包で作られる凸包 C' においても 5.1 節の凸包と同じような性質を持つ.

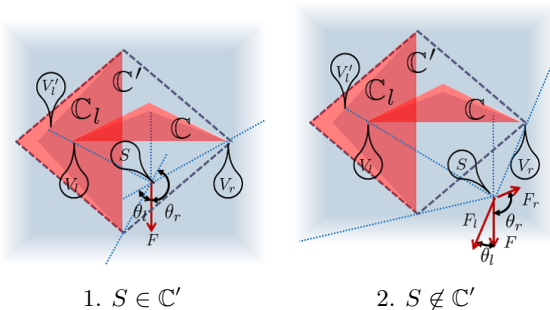


図 8: 交差するで作られる凸包

5.3 交差する凸包で作られる独立な凸包

5.2 節で作られる凸包をも対象に含めて、他の凸法と交差するかどうかを調べていく. 交差したら、さらにそれら

を含む凸包を作っていく. こうして、自身に含まれている凸包以外と交差することのない完全に独立な凸包を作ることができる. ここで、全ての独立な凸包を作ったうえで、凸包を作る全ての頂点を含む切られた線の集合に注目する. この集合の任意の一つの線が切られていなかったと仮定し、その線を元の凸包の頂点から切ることを考える. すると、ずれ判定において、すべての凸包であるので始点 S と点 V は同じ凸包に含まれることはない. このとき、点 V は固定されているか他の凸包に含まれることになる (図 9). 点 V が他の凸包 C に含まれるなら始点 S とその凸包 C の接線方向に力の分解が行われ、接点が次のずれ判定における始点 S' となり、その接線の先が点 V' となる. 凸方はすべて独立であるために始点 S' と点 V' が同じ凸包に含まれることはない (図 9). 従って、ループ発生以外でこの線がずれることはない.

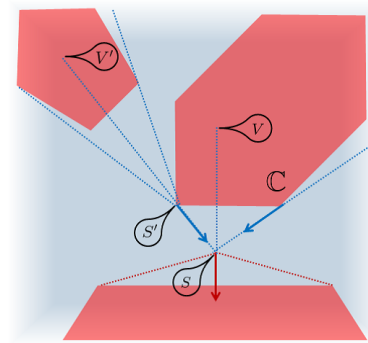


図 9: 独立な凸包でずれることのない線

5.4 全ての切られている線で作られる凸包

切られているすべての線で作られる凸包 C_A を考える. 今、凸包 C_A を作る全ての頂点を含む切られた線の集合に注目する. この集合のある一つの線が切られていなかったと仮定し、その線を元の凸包の頂点から切ることを考える. すると、そのずれ判定において、点 V は必ず固定されている点であるため、「ずれない」.

6 提案システム

提案システムでは、一つながりの制約を満たす 2 値画像 (切り絵画像) を入力として受け取り、その 2 値画像からカットラインを構築し、そのカットラインの構造を解析し、そのカットラインをずれずに切り出す経路を出力する.

6.1 カットライン構築

まず、2 値画像から 8 近傍で見ていき一連の輪郭画素を抽出する. この画素を通るように切り出すのが目的であるが、大抵の場合、抽出された線を正確に切っていくわけではなく、切る線と通るべき画素との距離がある程度許容範囲なら問題ないとして切っていく. それを踏まえて、最大許容誤差を設けて、通るべき画素までの距離が最大許容誤差を超えない様にカットラインを構築していく. 以降のシステムではこのカットラインを解析していく. しかしカッティング経路を出力する際、このカットラインでは曲線の情報が落ちているため、そのまま切り出すと切り絵としての品質が落ちてしまう. その品質を保つため、カットライ

ンごとに出力用として曲線の情報を輪郭線から抽出しておく。プロッタでは3次ベジェ曲線を扱うことができるので、参考文献 [6] を元に輪郭線からベジェ曲線に近似した。このアルゴリズムではカットラインの両端点の接線ベクトルとその間を通る頂点 (画素) の座標からベジェ曲線に近似できる。

6.2 ずれないカッティング経路構築

カッティング経路構築のために、任意の線が切られた状態 A から、その前の状態 B とカッティング経路 $P_{B,A}$ を出力するサブルーチンを用いた。このとき、前の状態 B からカッティング経路 $P_{B,A}$ に従って切るとずれずに状態 A になる。そのサブルーチンを用いて、全ての線が切られた目標状態 G から、その前状態 G_1 と目標状態 G に至るまでのずれないカッティング経路 $P_{G_1,G}$ を求める。次に状態 G_1 から、その前状態 G_2 と状態 G_1 に至るまでのずれないカッティング経路 P_{G_2,G_1} を求める。この作業を繰り返していき、状態 G_{n-1} から、その前状態 G_n と状態 G_{n-1} に至るまでのずれないカッティング経路 $P_{G_n,G_{n-1}}$ を求める。このとき、 G_n がどの線も切っていない初期状態だとすると、カッティング経路 $P = (P_{G_n,G_{n-1}}, \dots, P_{G_2,G_1}, P_{G_1,G})$ は初期状態 G_n から目標状態 G までのずれないカッティング経路である。

6.3 サブルーチン

このサブルーチンは5.3節で示した理論を基にしたものである。まず、入力された状態から独立な凸包を全て求める。その頂点からの経路の集合を C とする。5.3節での説明より、 C に属する切り方はループ発生以外の理由でずれることはないので、ずれ判定を用いて C 中のすべての切り方でループが起るかを判定する。こうしてずれるものを集合 C から除いた C' を作る。状態 A から C' に属する線を切っていない状態にしたのが前状態 B となる。次に C' から最近傍法を用いてカッティング経路 $P_{A,B}$ を構成する。こうして状態 A から前の状態 B とカッティング経路 $P_{A,B}$ を導出する。

7 結果と考察

2章で既存のソフトを用いて出力した同じ入力画像に対し、同じ環境で提案システムを用いて求めたカッティング経路をプロッタを制御して切り出してみた。結果は図 10 のとおりで、本カッティング環境でも問題なく満足のいく出力結果が得られた。



1. 上の紙

2. 下の紙

図 10: 提案システムによる切り出し結果

今回得られたずれないカッティング経路の提案から、次の貢献が考えられる。一つはカッティングプロッタでの紙の固定方改良が考えられる。カッティングプロッタにおいて端を固定できさえすれば (テープ以外にも磁石を用いることも考えられる)、粘着シートや静電気で紙の全体を固定する必要はない。さらに、今まで粘着が効きづらく切ることができなかった素材 (例えば皮など) もカッティングプロッタで切ることが理論上可能になった。さらに複数枚同時に切ることができるので生産性の向上が考えられる。

8 まとめと今後の課題

本研究では、紙のカッティングにおけるずれを構造力学的に定義することで、判定法を定式化した。それを基にずれに関する定理を導き、任意のデザインに対してずれないカッティング経路があることを示唆した。そして、実際にずれないカッティング経路を提案するシステムを考案実装し、実際にずれないことを確かめた。

現状の計算時間では $O(n^4)$ と考えられる。その主な原因としてずれ判定には $O(n^2)$ 、独立な凸法を求めるのには $O(n^3)$ かかっていることが考えられる。それぞれで、さらなるアルゴリズムの改良が今後の課題である。

また、より短い移動距離となるような探索手法アルゴリズムが複数考えられる。現状では GA を組み込もうと考えている。その理由は、本提案システムによってある程度よい経路が導出できるので、GA の初期値世代にこの経路を組み込めば、良い結果につながりやすいと考えられるからである。また、サブルーチンを用いた経路構築の際、ステップ数をその都度出力される切り方の優先度と考えることができ、GA の評価に組み込むことができると考えているからである。

これらの課題を通して、ずれないかつ距離の短いカッティング経路の導出を目指していく。

参考文献

- [1] 切り絵百景館 著作権フリーの切り絵の下絵 <http://kirie-sekai.art.coocan.jp/>
- [2] J. Xu, C. S. Kaplan, and X. Mi. Computer-generated papercutting. In Proc. PG '07, pages 343-350, 2007.
- [3] Igarashi, Y. and Igarashi, T. Holly: A Drawing Editor for Designing Stencils. Computer Graphics and Applications, IEEE, pages 8-14, 2010.
- [4] B. Vaupotic et al. Concept of automatic programming of NC machine for metal plate cutting by genetic algorithm method JAMME, 2006
- [5] Yunyoung Kim et al. Global cutting-path optimization considering the minimum heat effect with micro-genetic algorithms, Marine Science and Technology, 2004
- [6] Andrew S. Glassner (1990) 『Graphics Gems I』 Academic Press Inc. 864pp.