

# 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

# 研究目的（1 / 2）

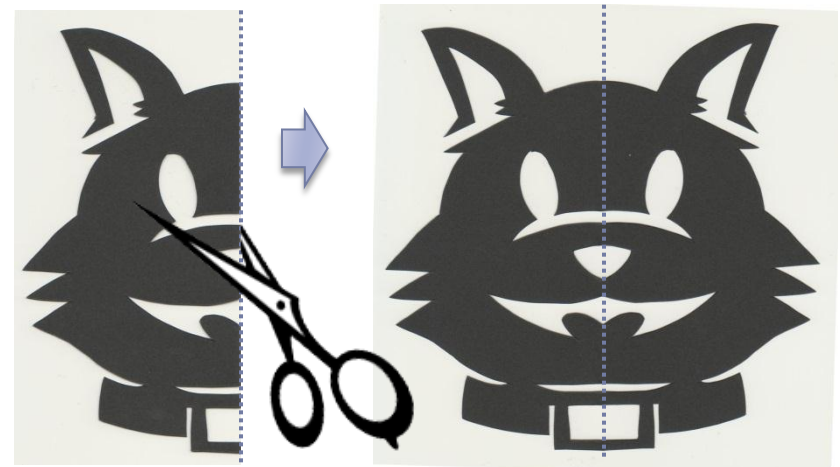
## ▶ 切り絵の制作を支援する研究

### ▶ 切り絵 ...

- ▶ 紙の不要部分を切り抜いて作り上げる絵画技法
- ▶ デザインカッターなどを用いる
- ▶ 寄席で見るとような紙切りとは制作工程が異なる



切り絵作品



紙切り作品

# 研究目的（2 / 2）

- ▶ 素人が切り絵を制作する上での問題点
  1. 一繋がりのデザインには経験と知識が必要
  2. 適切な順序で切るには経験が必要
- ▶ 2つの工程の問題解決を支援する研究



デザイン工程



切り抜き工程

# カッティングプロッタを用いた支援

## ▶ カッティングプロッタ

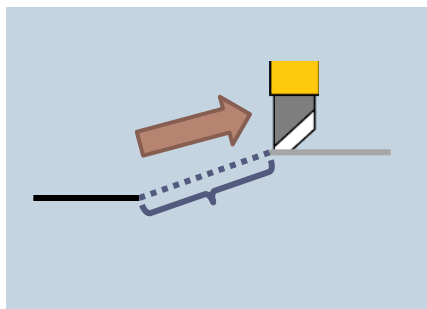
- ▶ 任意の形状を切り抜く装置

## ▶ カッティング経路において考慮に入れるべき要素

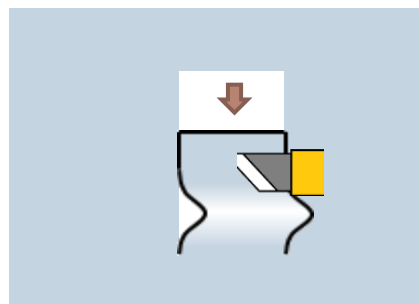
1. 移動距離 …… 制作時間に影響
2. ずれ …… 品質に影響



カッティングプロッタ



1. 移動距離



2. ずれ

# カッティングプロッタのずれ防止

## ▶ 標準のずれ防止策

- ▶ 台上の粘着性のシートや静電気です紙を固定

## ▶ ずれが起こる場合

1. 台上の粘着が弱まっている
2. 材質的に粘着や静電気が効かない
3. 紙の複数枚重ねている

ずれを考慮したカッティング経路を考える



ずれの発生は  
十分起こりうる

# 関連研究（２次元カッティング経路）

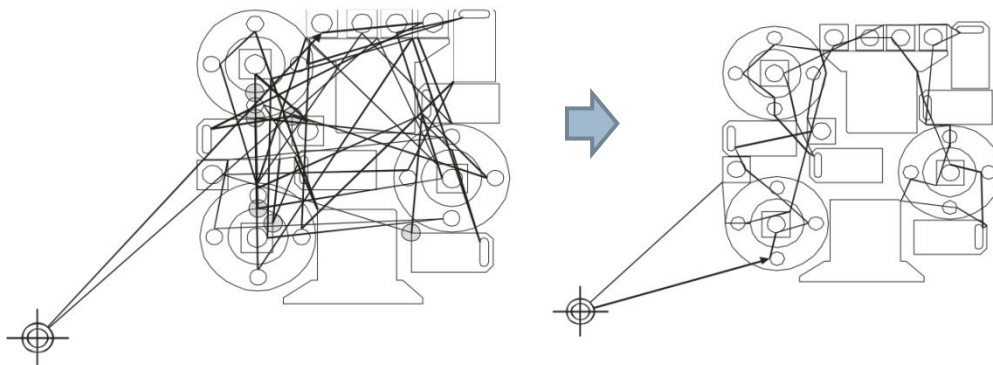
## ▶ 金属板加工におけるカッティング経路の提案

- ▶ Concept of automatic programming of NC machine for metal plate cutting by genetic algorithm method

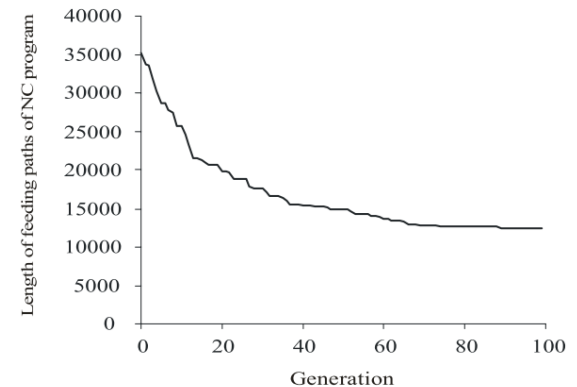
[B.Vaupotic, et al.]AMME 2006]

## ▶ レーザーカッターで効率と品質を考えた経路の提案

- ▶ 遺伝的アルゴリズムを用いてより短いカッティング経路を導出
- ▶ 入れ子構造を考慮して、内側のものを先に切り出す



GAによる経路長の短縮



世代と経路長

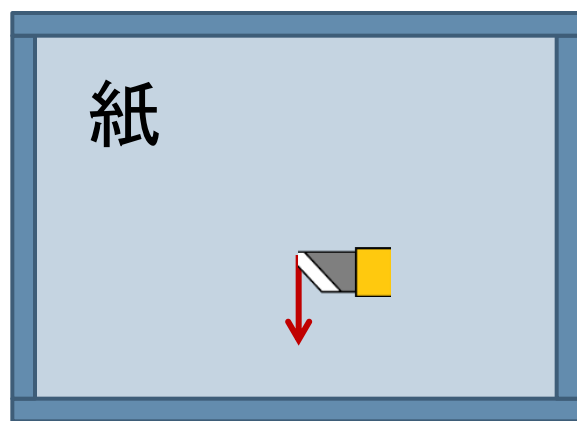
# カッティング環境

## 1. 紙の端をテープで固定

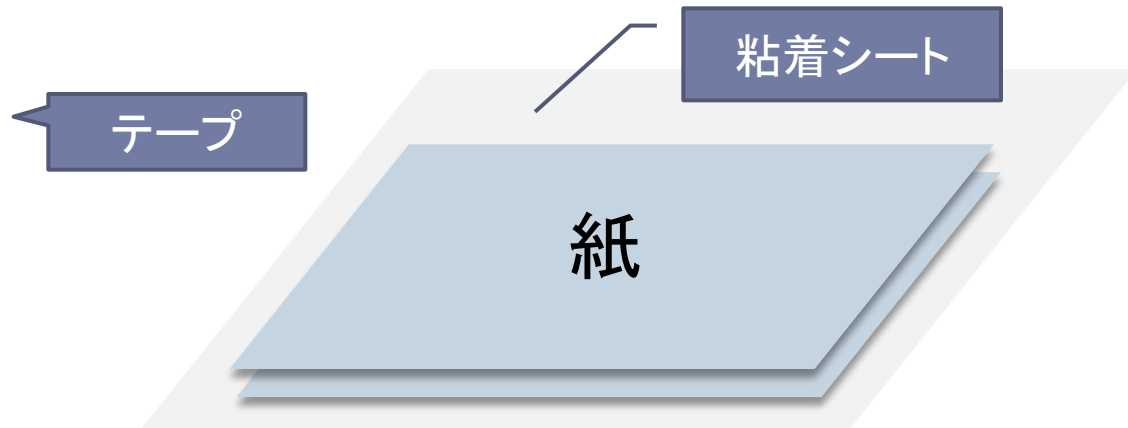
- ▶ プロッタのずれ防止のみでは対策として不十分
- ▶ 切り絵での一般的な固定の仕方

## 2. 紙を二枚重ね

- ▶ 限りなくずれやすい環境でもずれない経路の提案が目的



7 端の固定



二枚重ね

# ずれを考慮しない経路（1 / 2）

- ▶ 本環境での実験
- ▶ プロッタ付属のソフトウェアを使用

▼ 既存のソフトでの切り出し



入力2値画像(切り絵)



## ずれを考慮しない経路 (2 / 2)

### ▶ 実験結果

- ▶ 上の紙は、予想通りひどい結果になっている
- ▶ ずれ防止されているはずの下の紙でも、上の紙の影響で線が切られなかったりしている



入力2値画像(切り絵)



上の紙



下の紙

実験結果

# 提案までの流れ

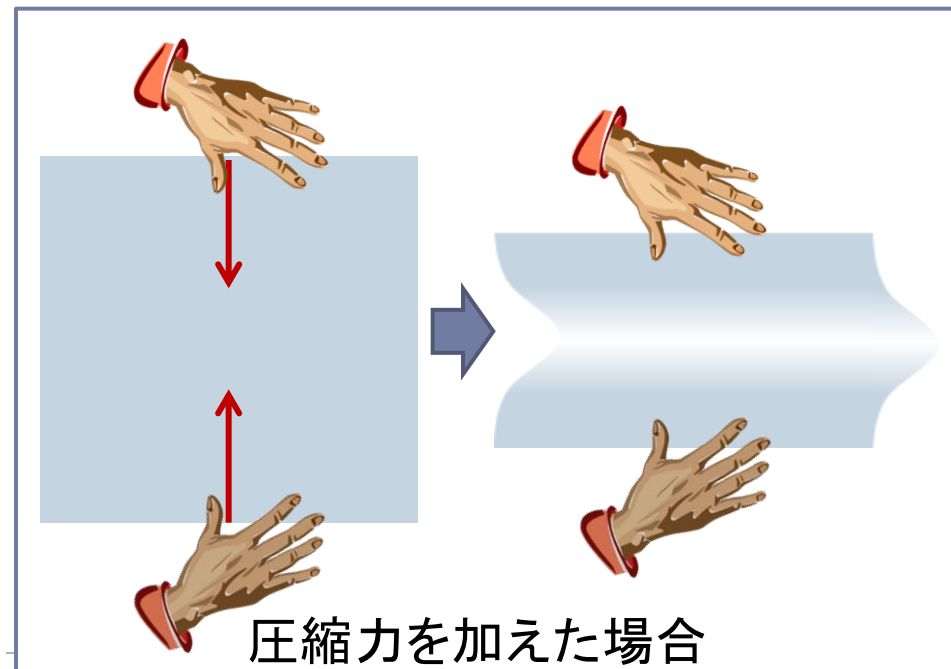
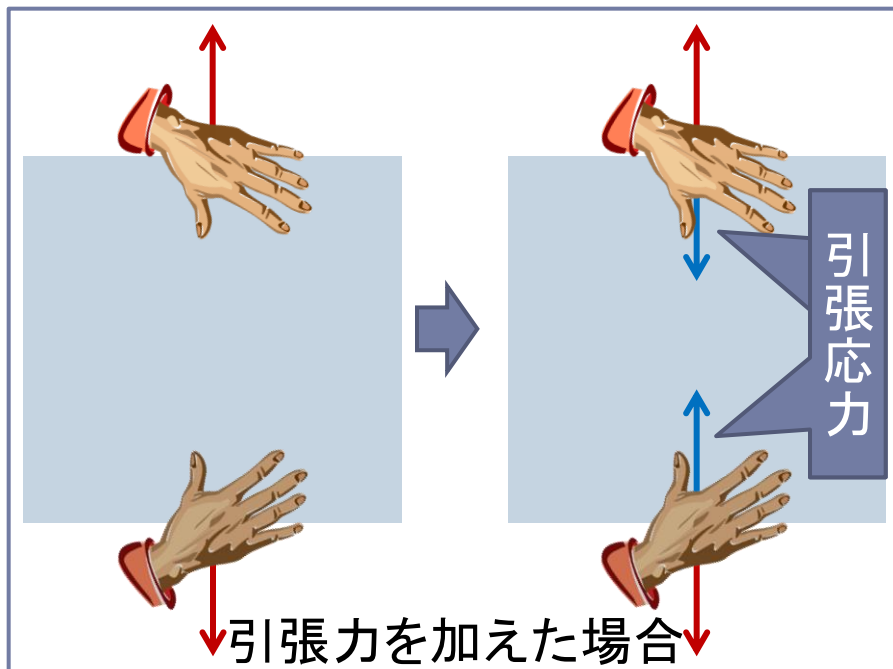
---

1. 構造力学的な「ずれ」の定義
2. ずれの判定方法
3. ずれに関する定理(配布資料参照)
4. 提案システム

# 媒質の確認

## ▶ 紙

- ▶ 両側から引張っても比較的容易には引きちぎれない
  - … 引張応力は働く
- ▶ 両側から押すとたわんで曲がる
  - … 圧縮応力はほぼ働かない



# 「切る」の定義

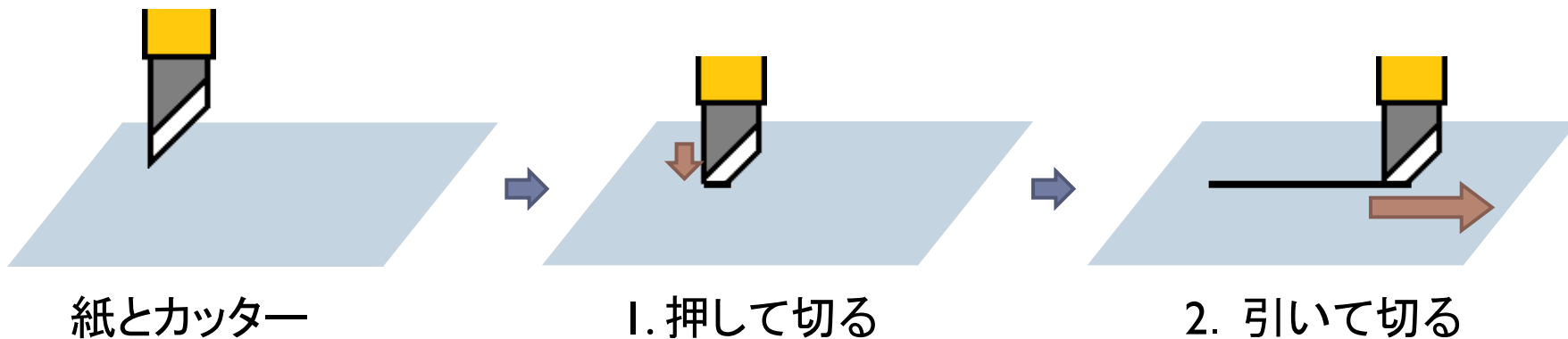
## ▶ 紙上の線の切り方

1. カッターを紙に押し付けて圧力で切る方法.

▶ 切り絵では切り始めのみ.

2. カッターの刃が紙に入っている状態で引く力で切る方法.

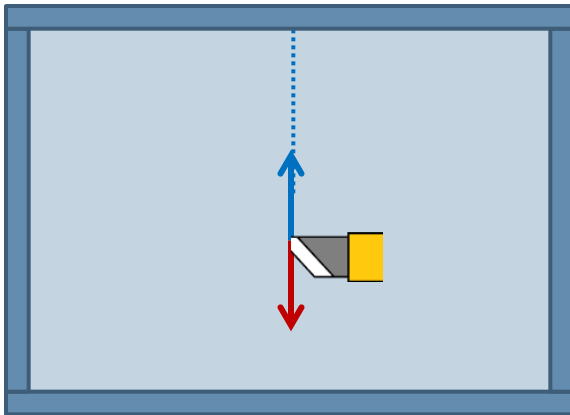
▶ 切り絵では一般的な切り方.



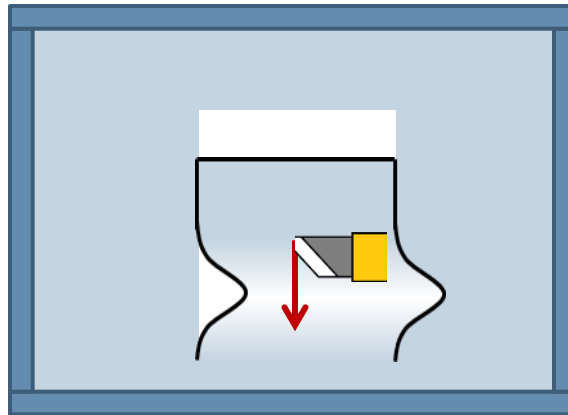
切る … 目的の方向に力を加える行為

# 「ずれる・ずれない」の定義

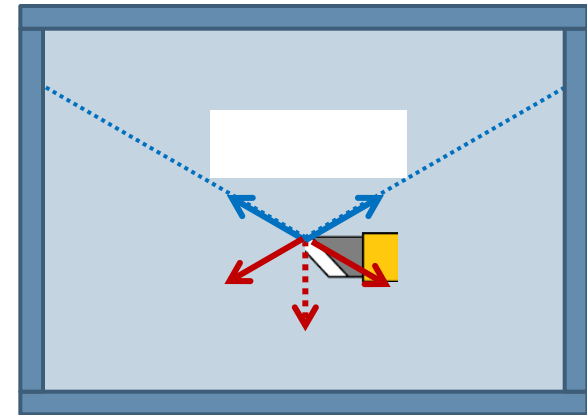
1. 切る力に引張応力が働く場合，力は釣り合う
2. 切る力に引張応力が働かない場合，力は釣り合わない  
∴ 紙では圧縮応力がほぼ働かない
  - ▶ 力の分解によって引張応力が働く場合もある



引張応力が働く



引張応力が働かない



力の分解で働く

ずれる …… 切る力に引張応力が働かない  
ずれない …… 切る力に引張応力が働く

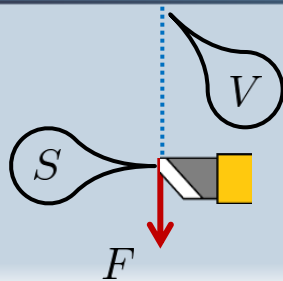
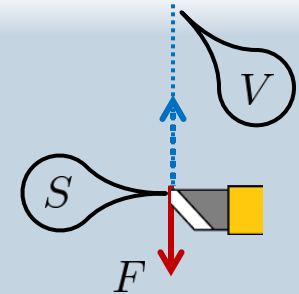
# ずれ判定(力 $F$ , 始点 $S$ )

ずれ判定(1/6)

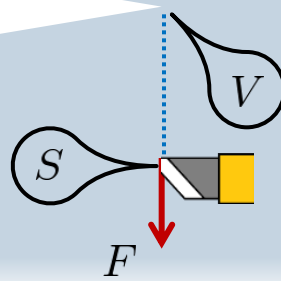
▶ 始点 $S$ の力 $F$ と逆方向に引張応力が働くか調べる

▶ あるべき引張応力の向かう先を点 $V$ とする

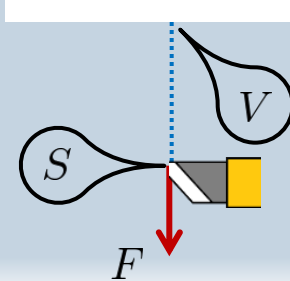
- 点 $V$ が固定されている場合
- 点 $V$ が切れ端である場合
- 点 $V$ が切れ目(切れ端以外)である場合
- ループが起きている場合 (後述)



a. 固定



b. 切れ端

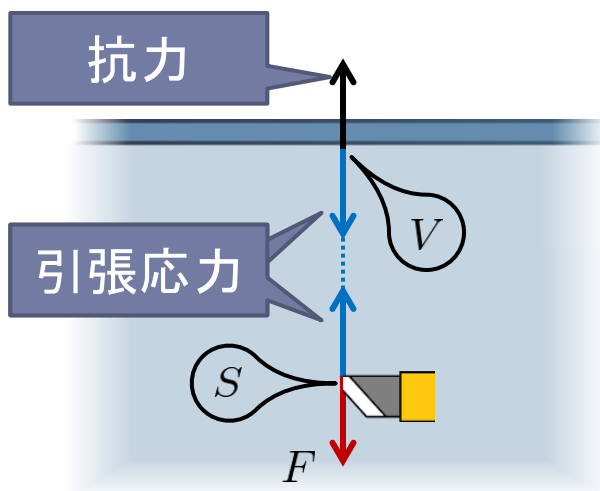


c. 切れ目

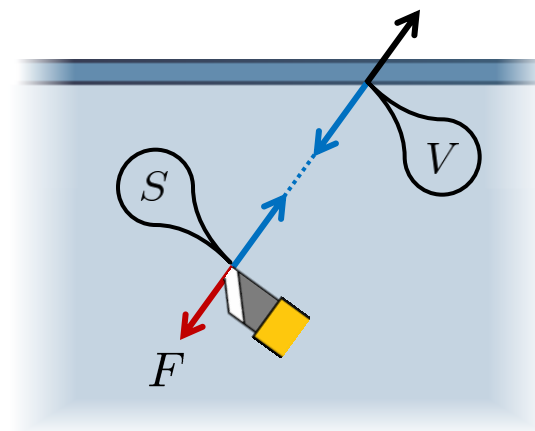
# ずれ判定 - $V$ が固定

ずれ判定 (2 / 6)

- ▶ 点 $V$ がテープ等で固定されている場合
  - ▶ 点 $V$ ではどの力に対しても抗力が働く
  - ▶ その抗力から引張応力が働く
  - ▶ 切る力と引張応力が釣り合い, ずれない



例1

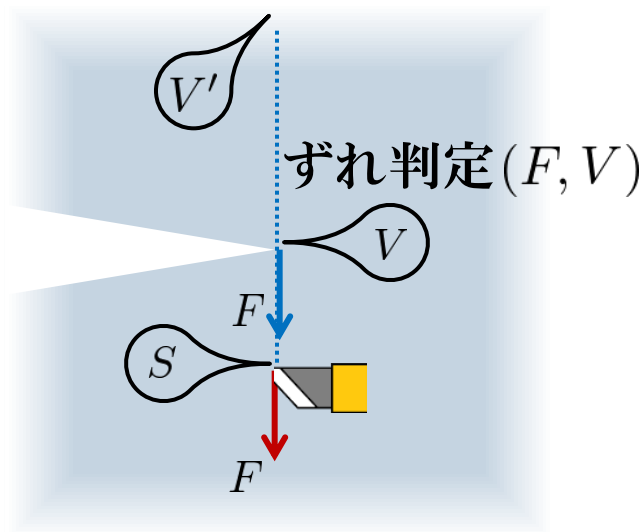


例2

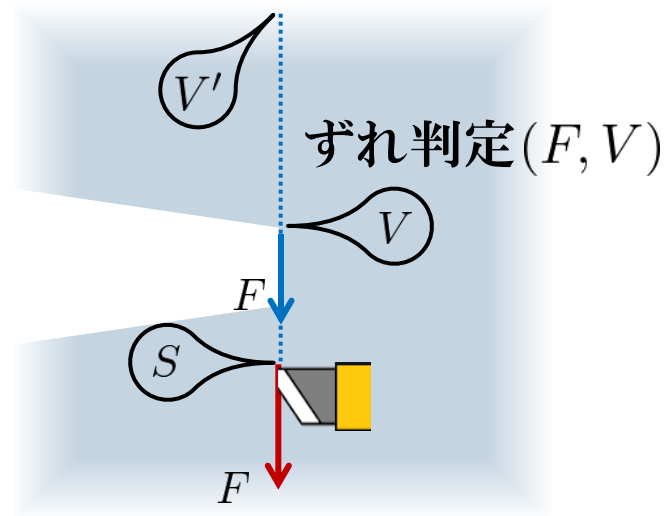
# ずれ判定－ $V$ が切れ目の端

ずれ判定(3/6)

- ▶ 点 $V$ が切れ端である場合
  - ▶ 点 $V$ では引張応力が働くかはさらにその先の $V'$ による
  - ▶ よって点 $V$ に引張応力が働くか調べるためずれ判定( $F, V$ )



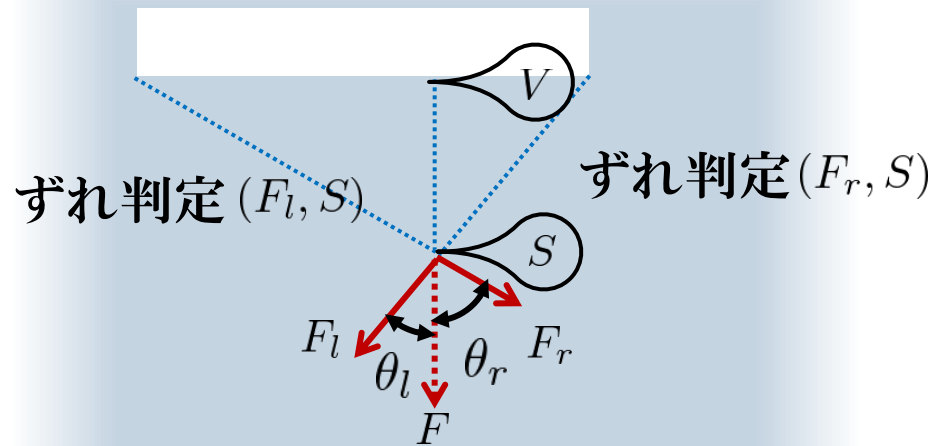
例1



例2

# ずれ判定 - $V$ が切れ目 (1 / 2) ずれ判定 (4 / 6)

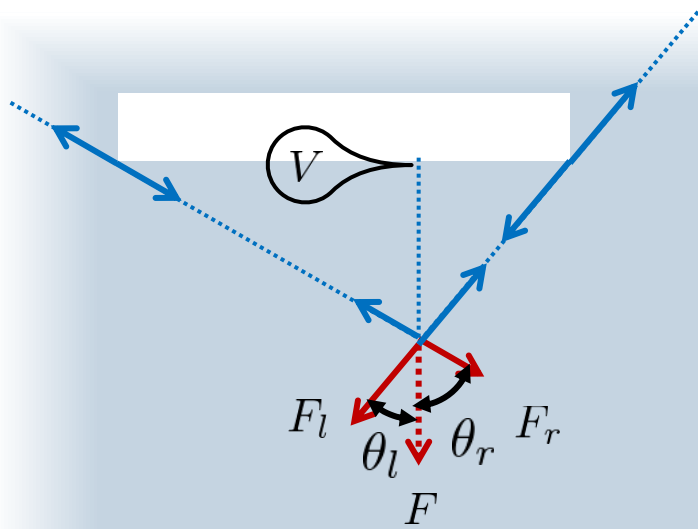
- ▶ 点 $V$ が切れ目(切れ端以外)である場合
  - ▶ 点 $V$ では固定されていないので抗力は働かない
  - ▶  $F$ を左右で  $F_l, F_r$  に分解し,  $F$ との角を  $\theta_l, \theta_r$  とする
  - ▶ 引張応力が働くかを調べるため  
ずれ判定( $F_l, S$ ), ずれ判定( $F_r, S$ ) を呼び出す



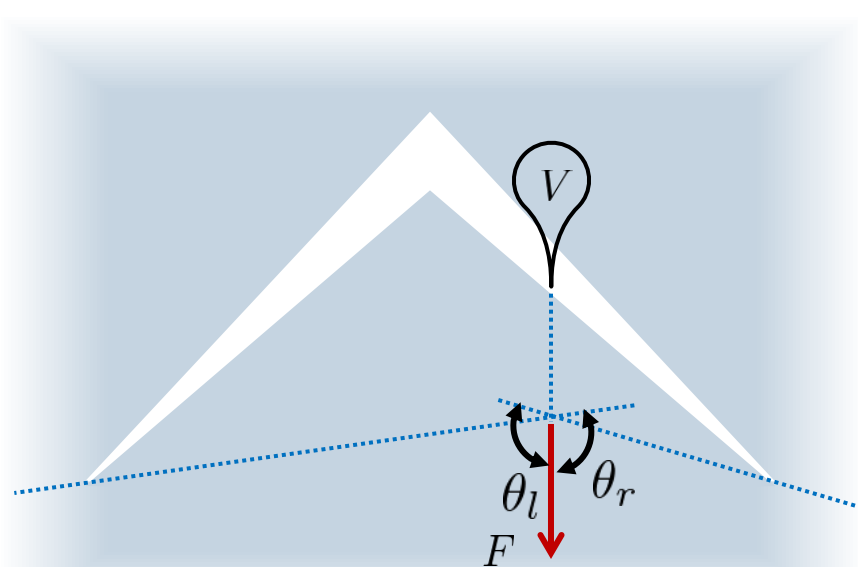
例

# ずれ判定 - $V$ が切れ目 (2 / 2) ずれ判定 (5 / 6)

- i.  $\theta_l + \theta_r < \pi$  で, 左右それぞれに引張応力が働くならば, 力の分解により引張応力が働き, ずれない
- ii.  $\theta_l + \theta_r \geq \pi$  では, そもそも力の分解ができないため 引張応力は働かず, ずれる



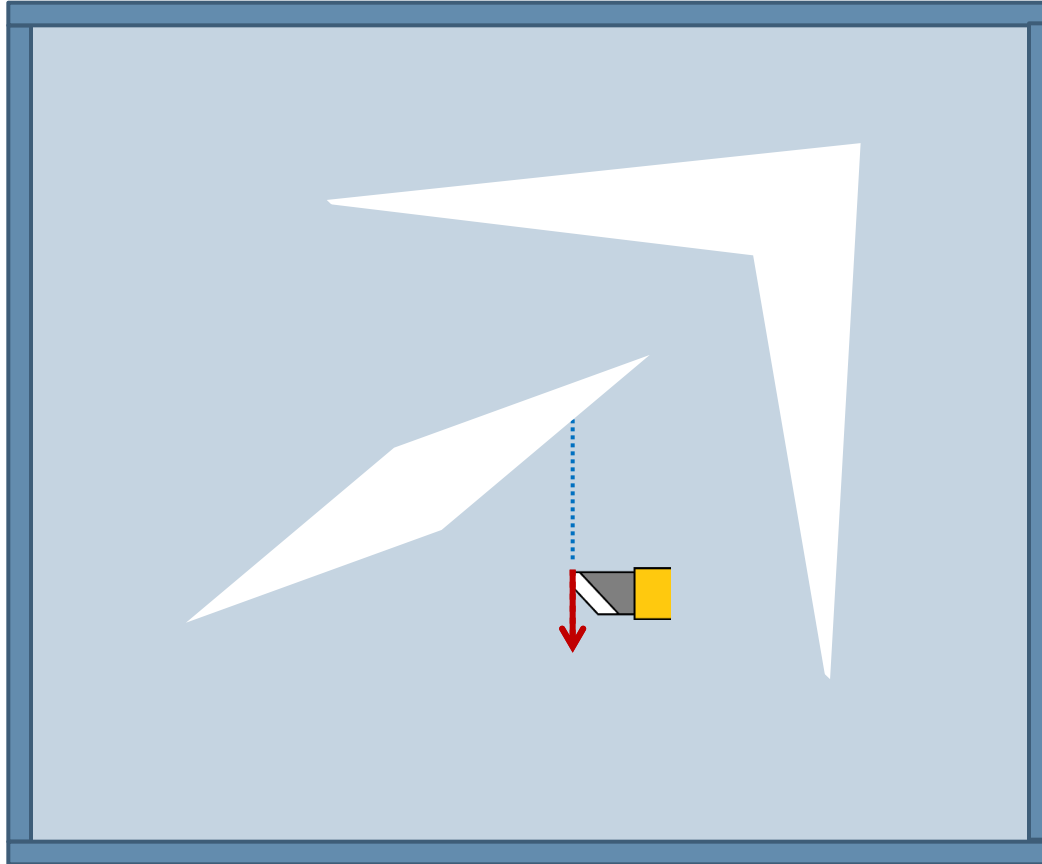
ずれない例



ずれる例

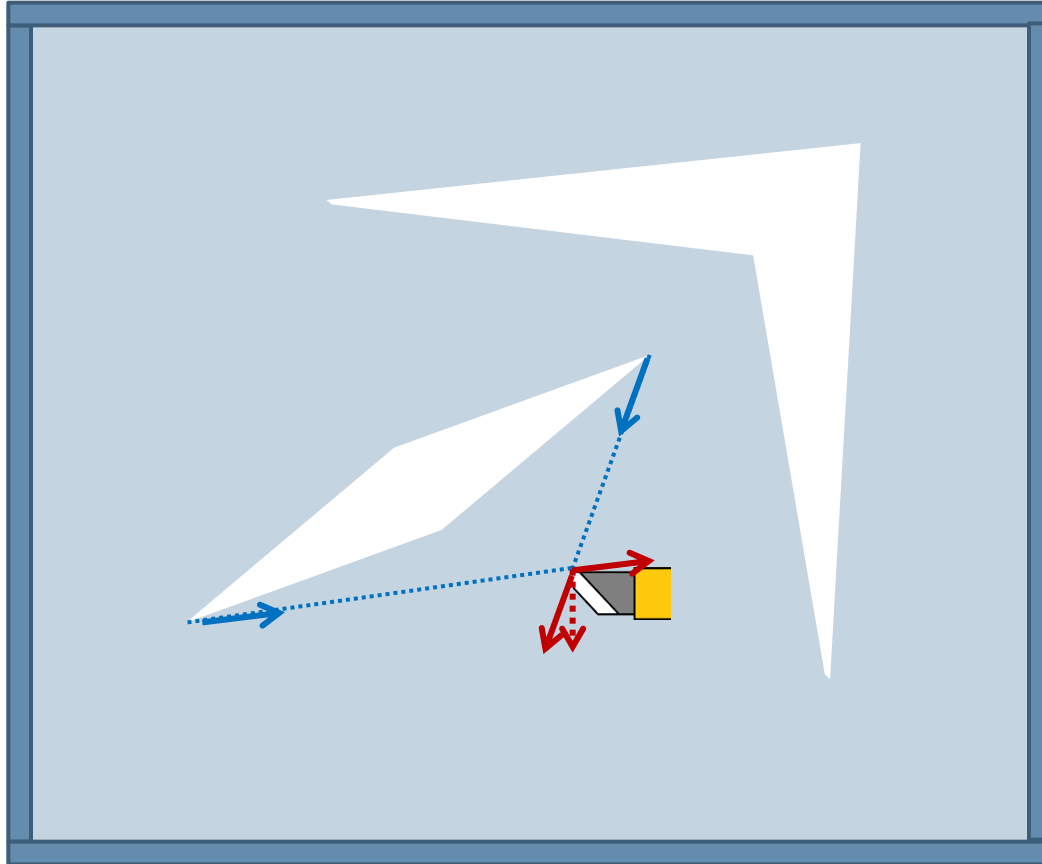
# ずれる例

---



# ずれる例

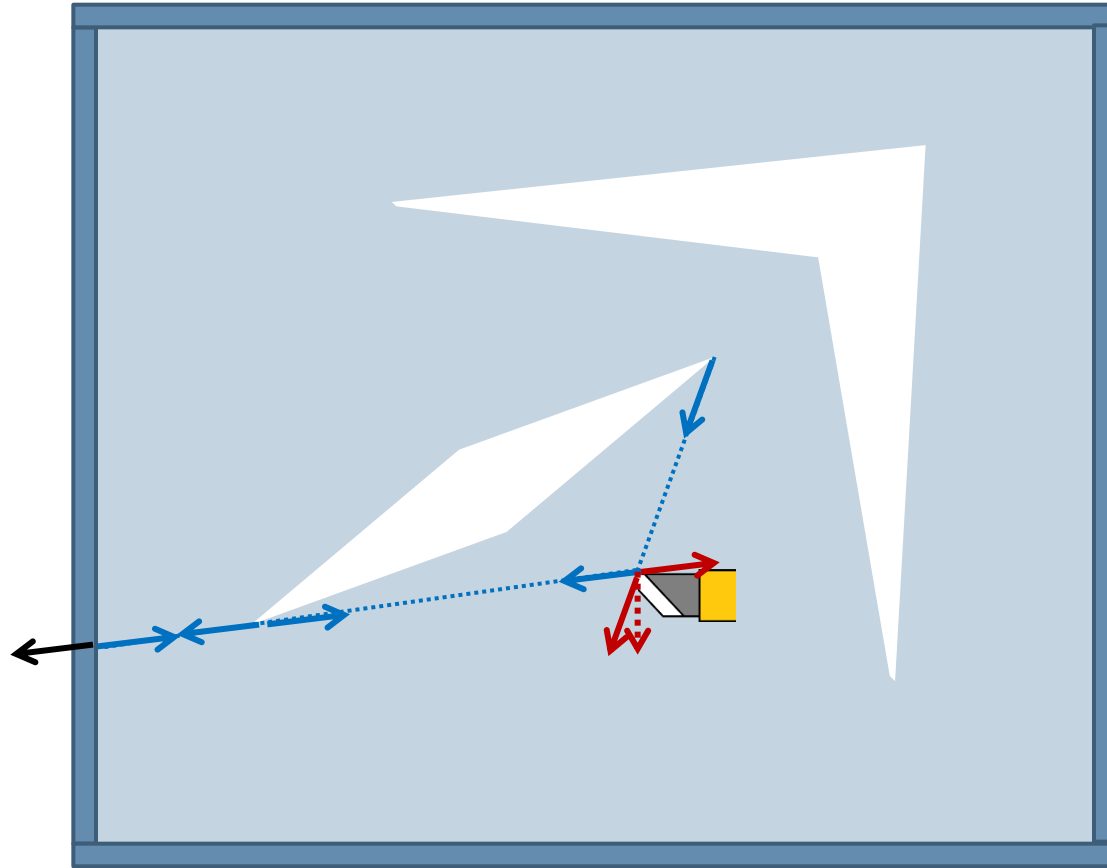
---





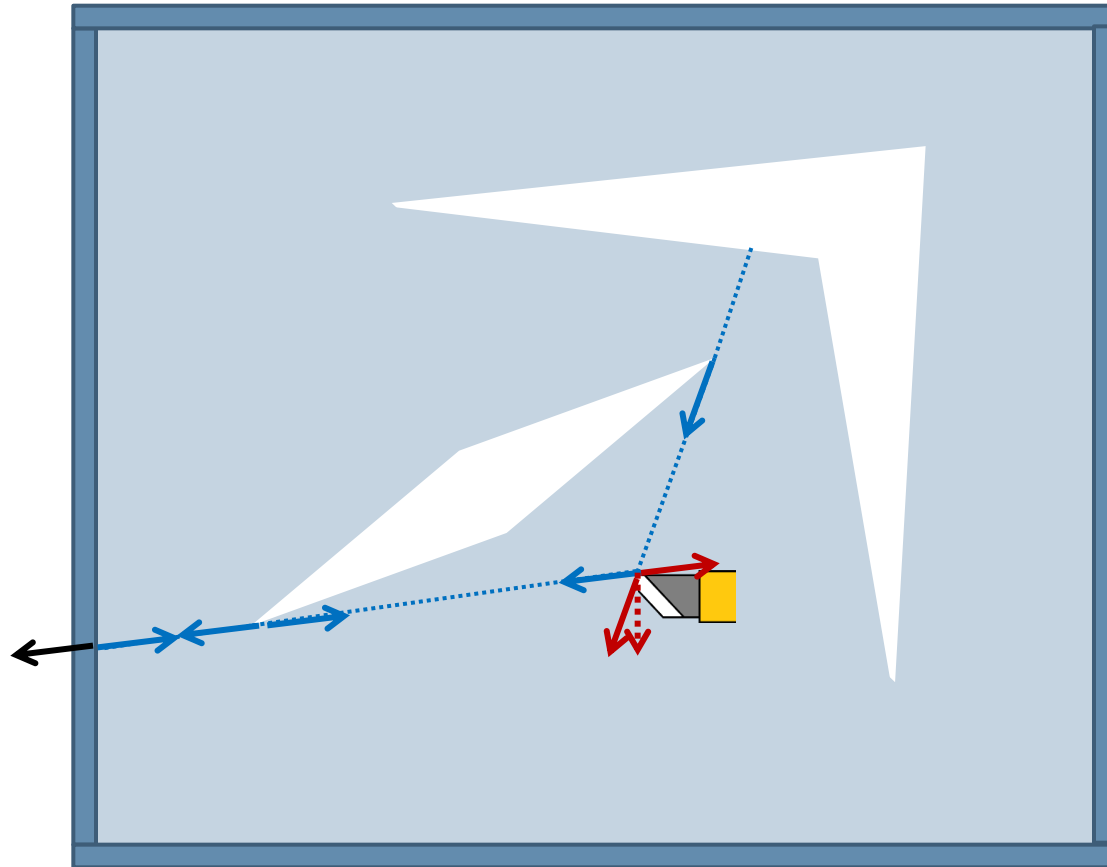
# ずれる例

---



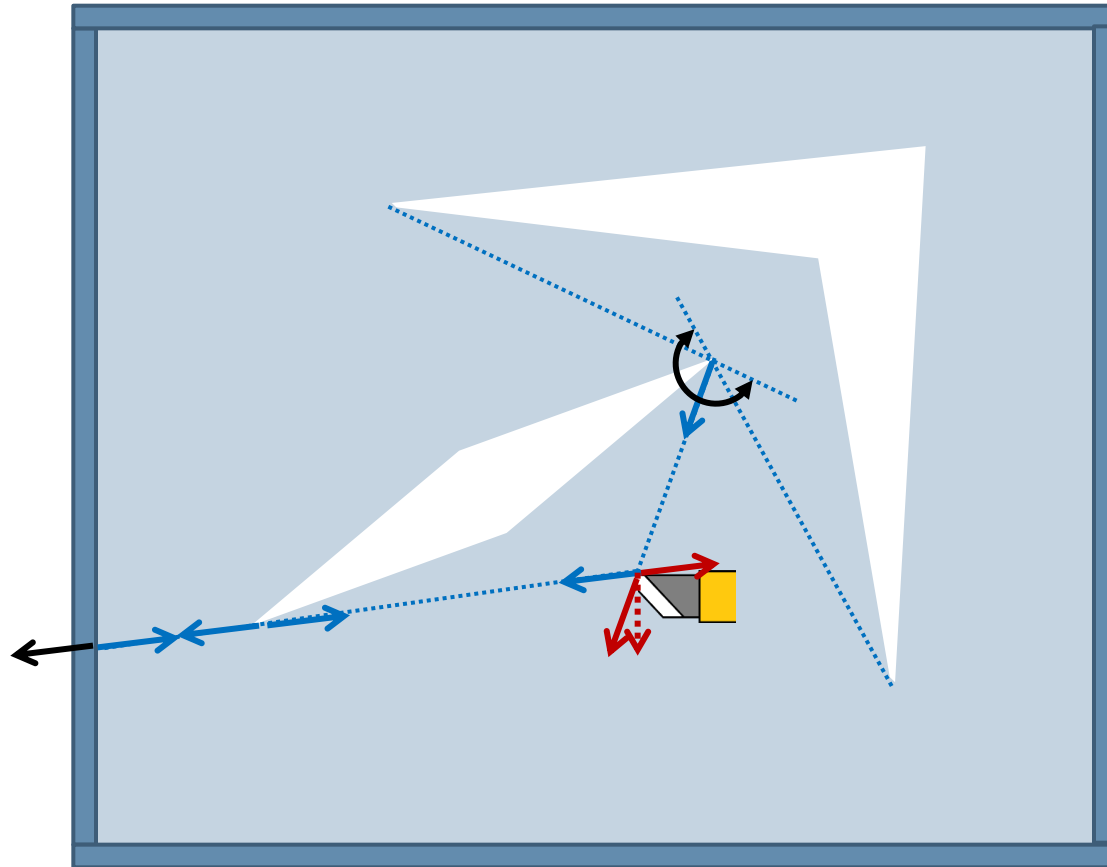
# ずれる例

---



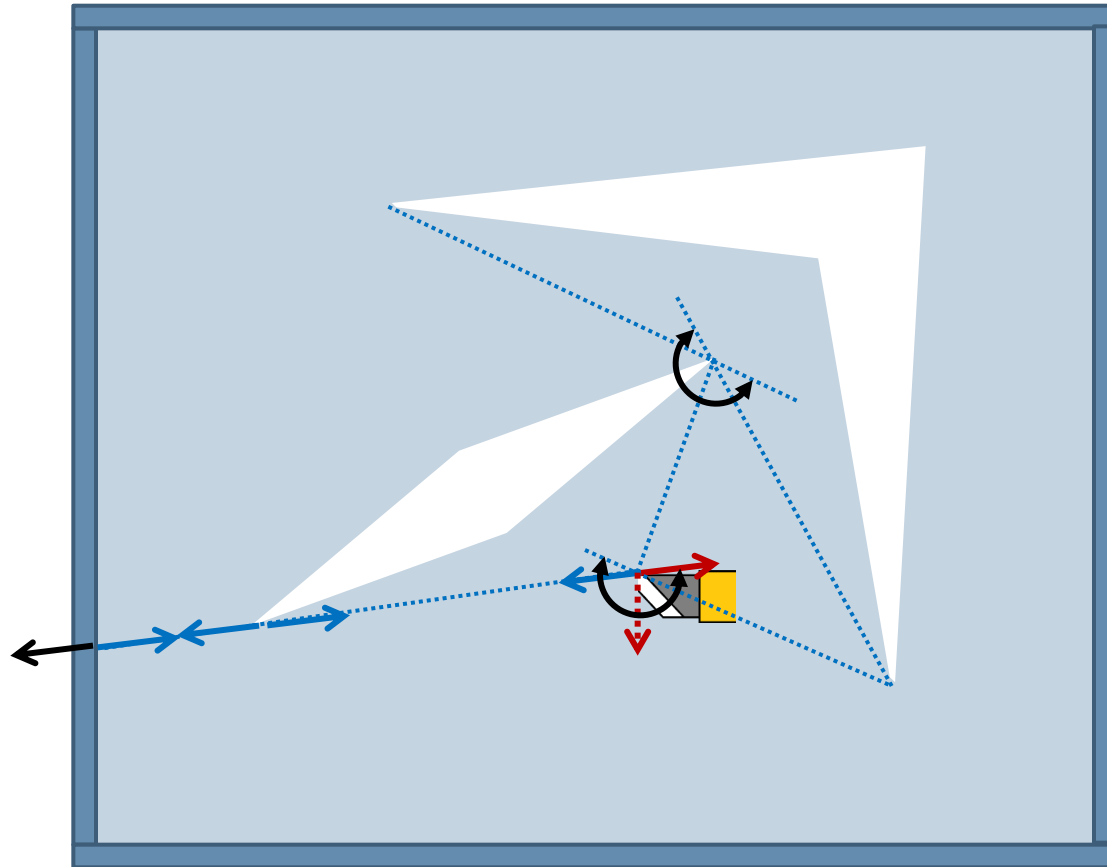
# ずれる例

---



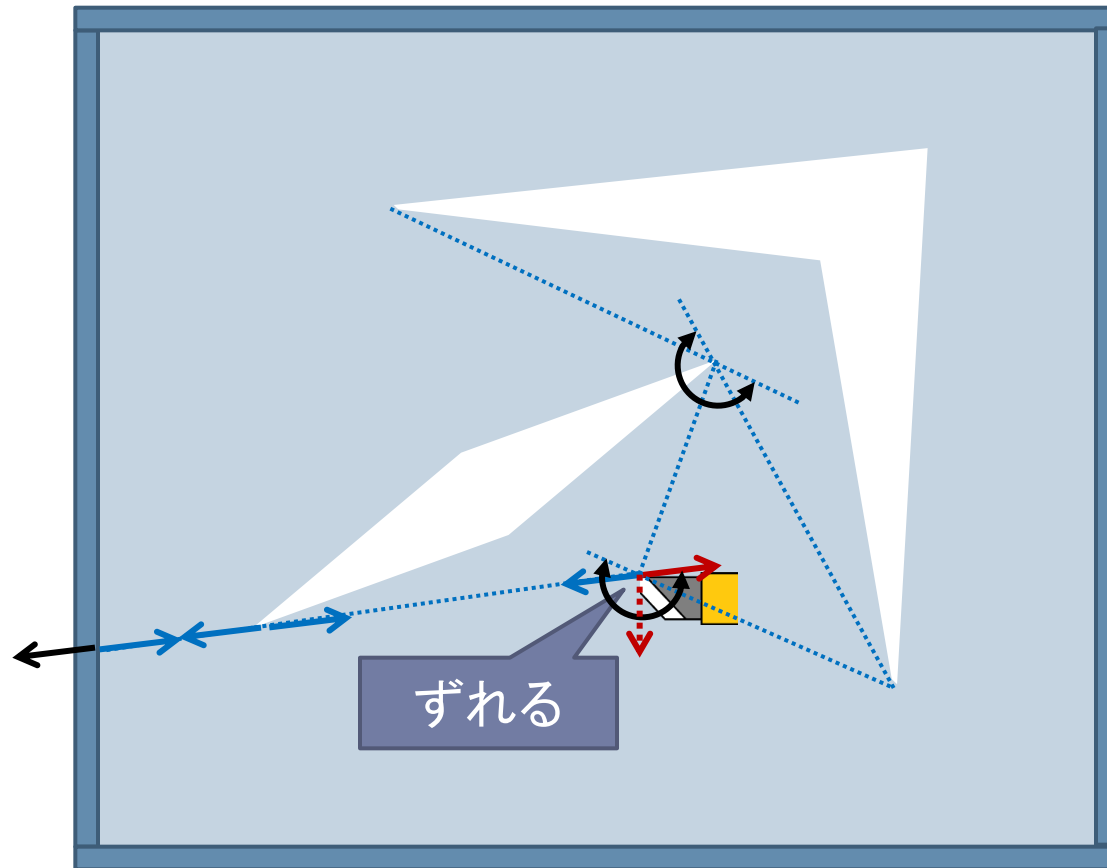
# ずれる例

---



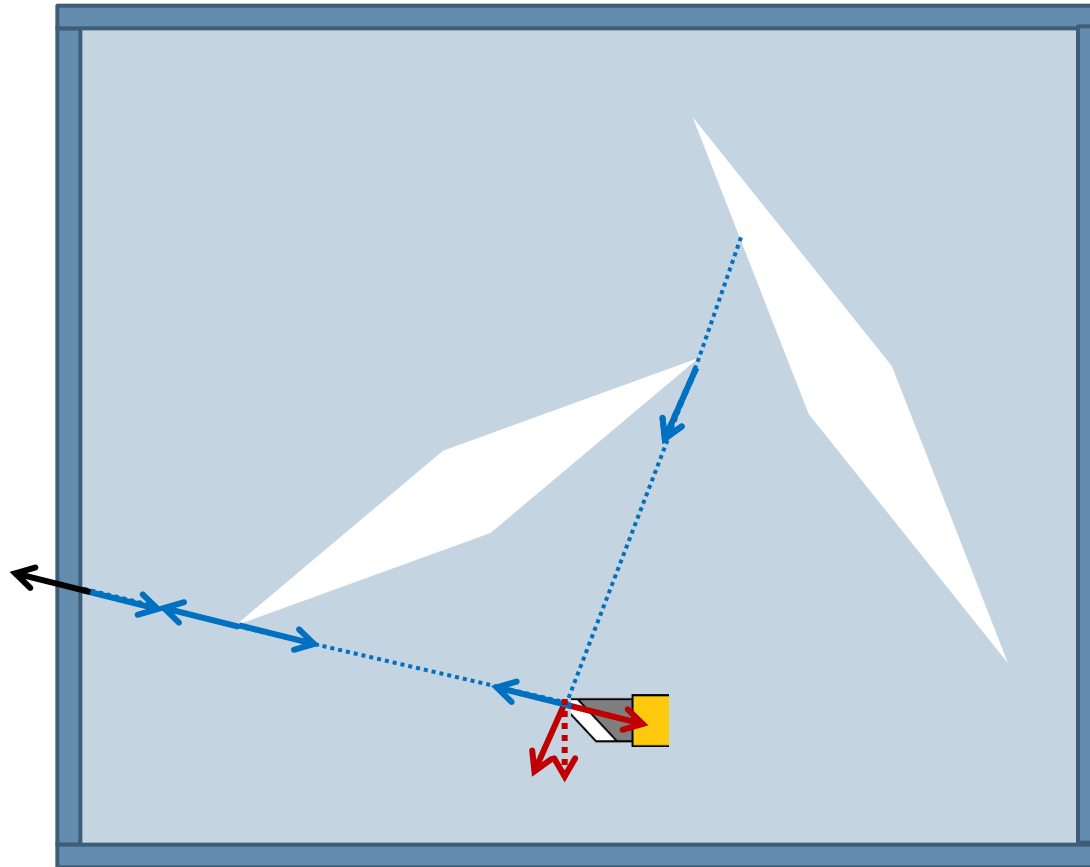
# ずれる例

---



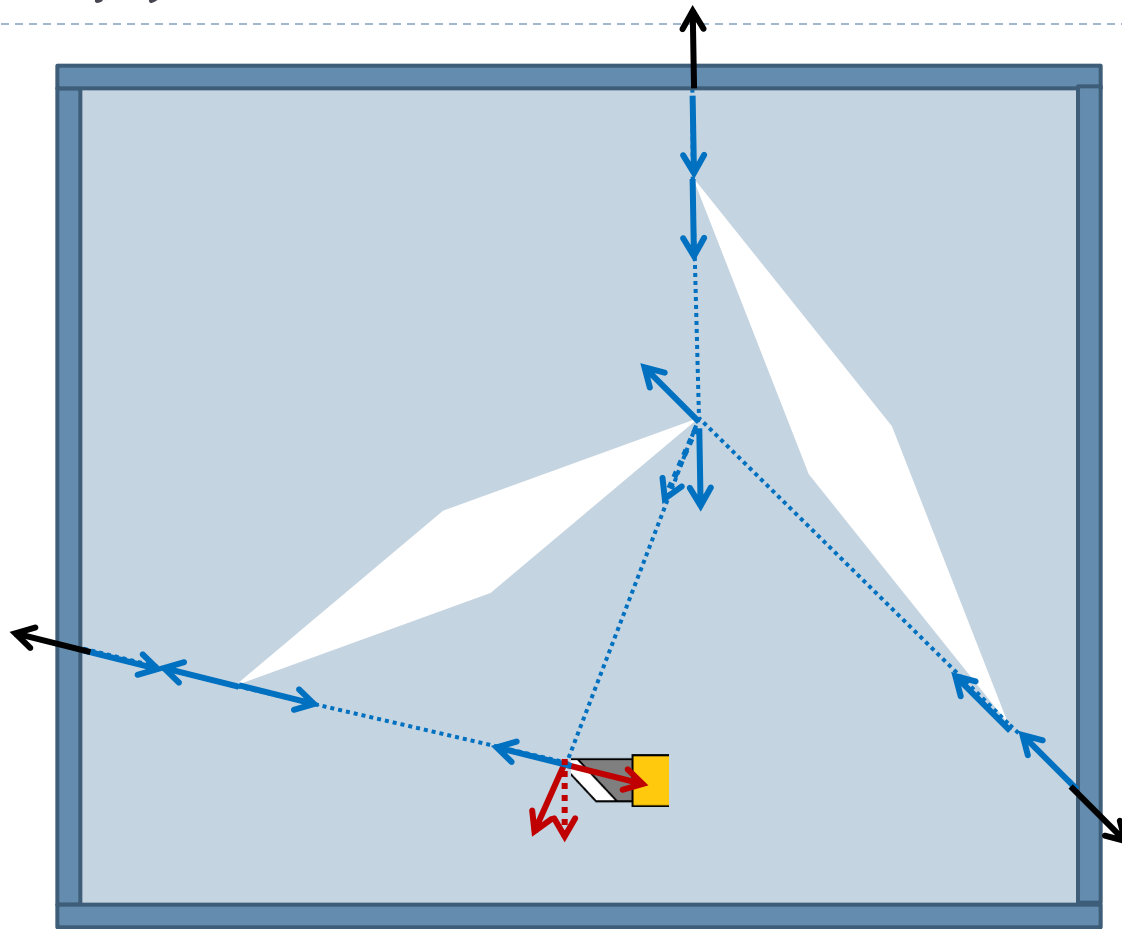
# ずれない例

---

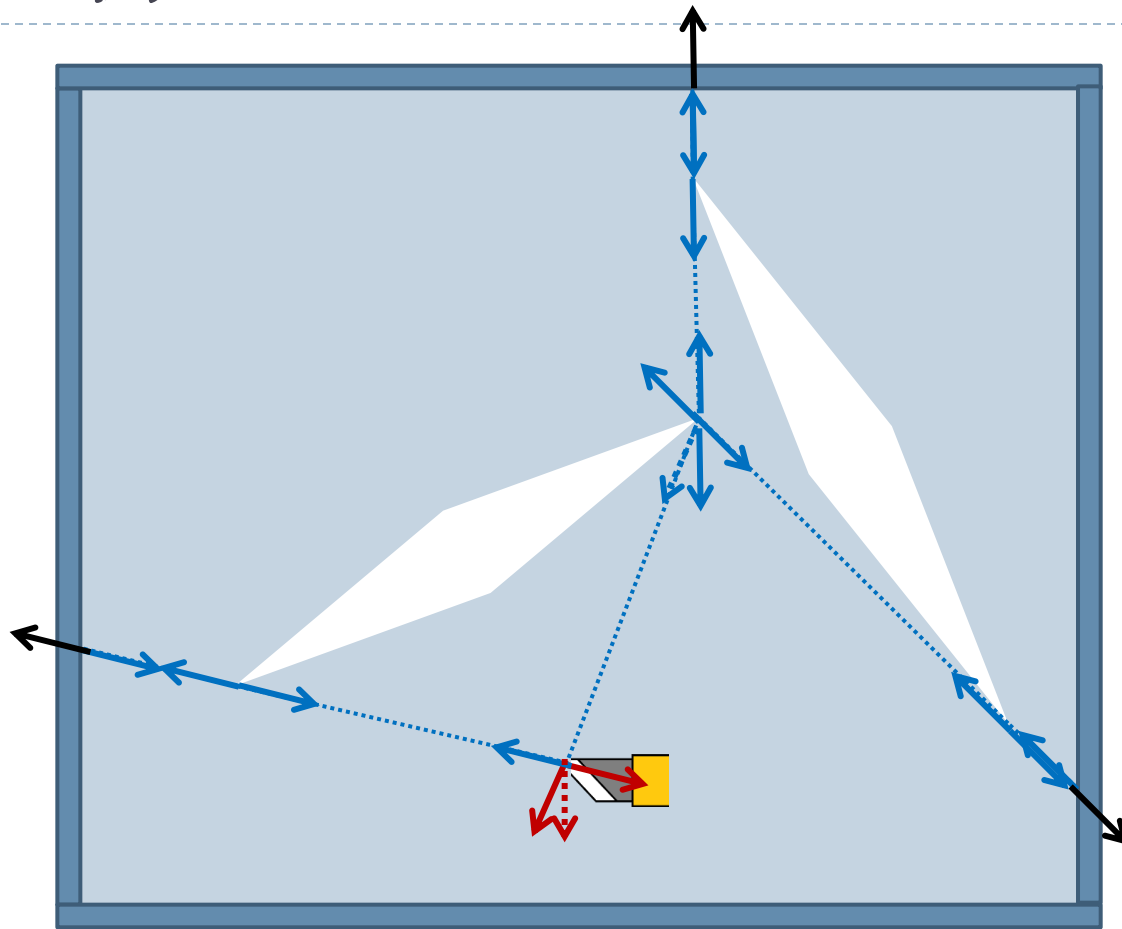




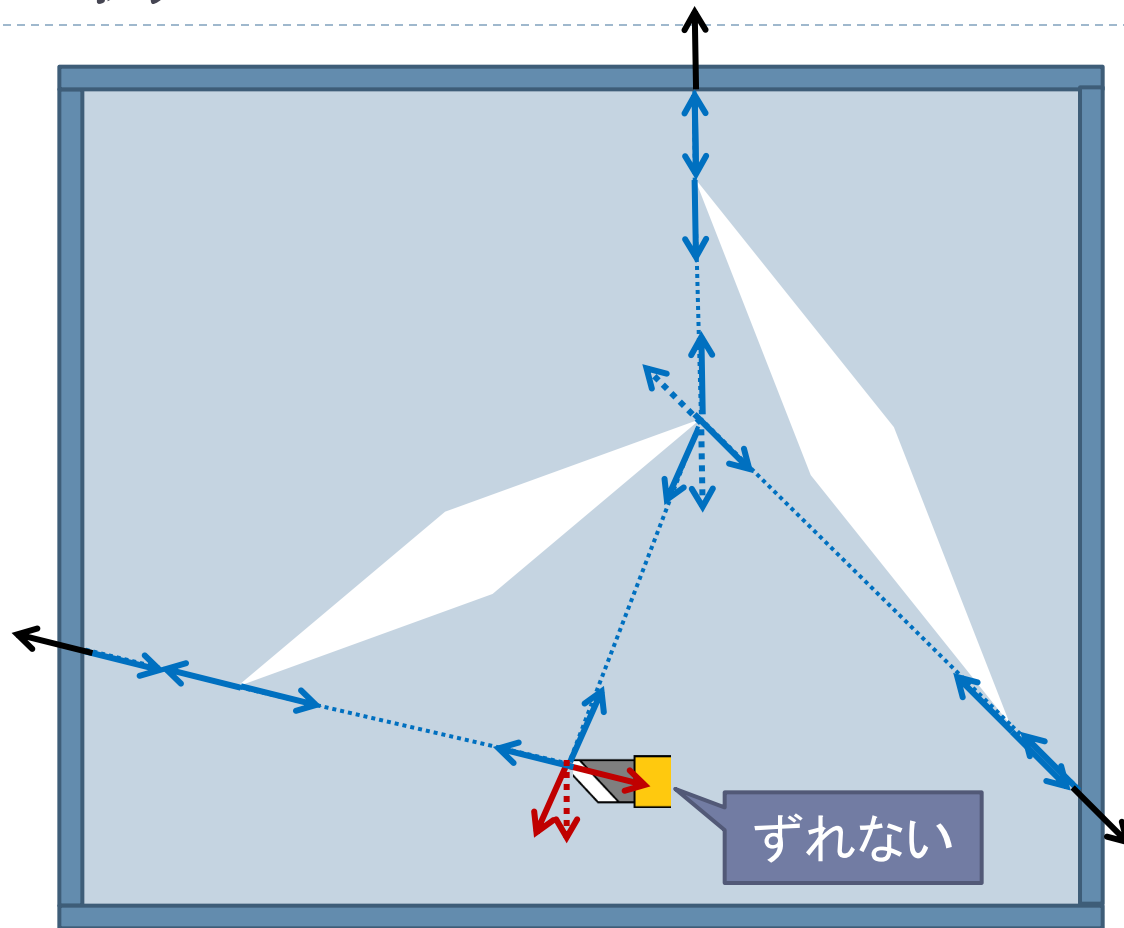
# ずれない例



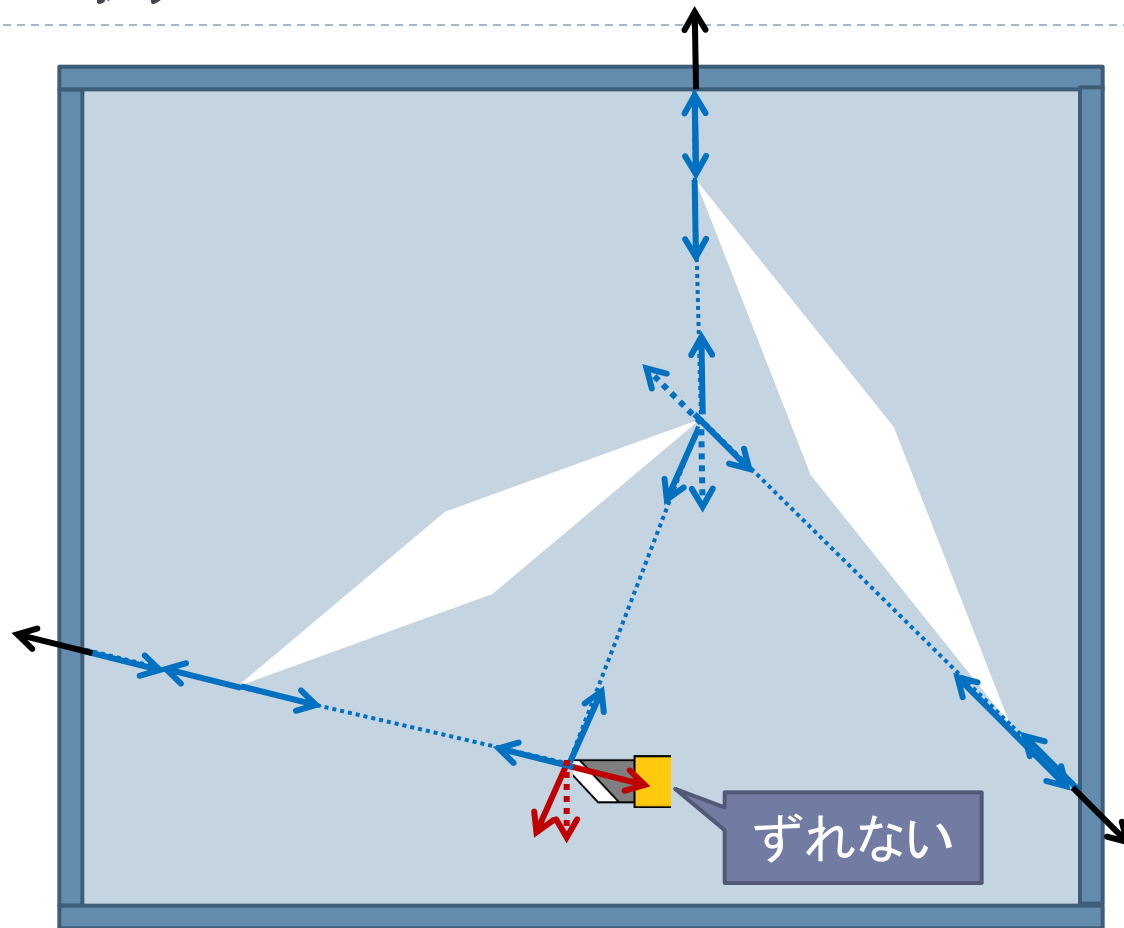
# ずれない例



# ずれない例



# ずれない例

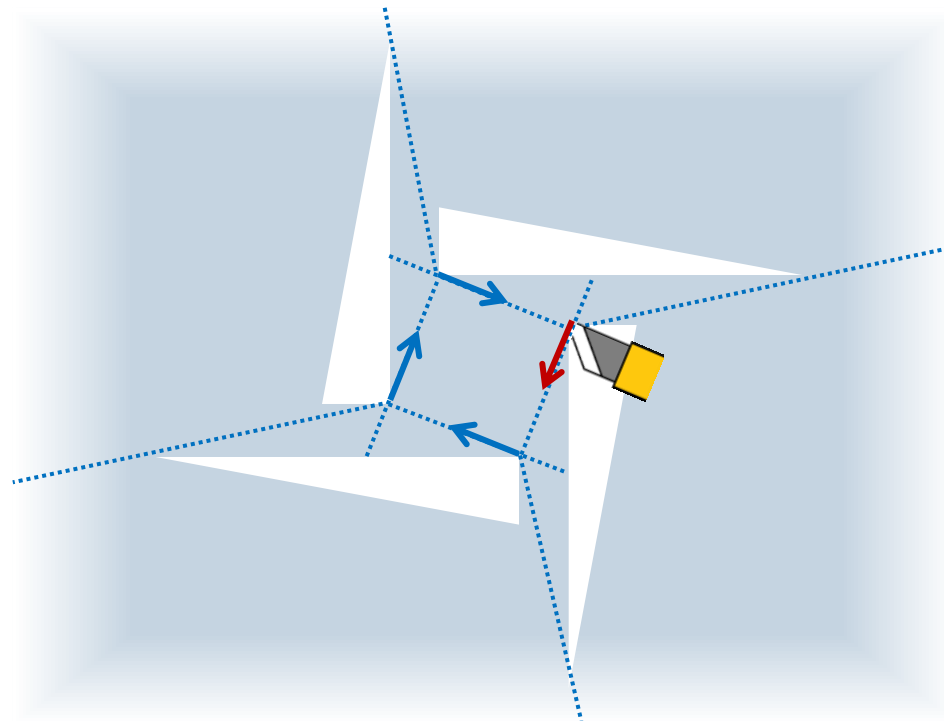


力は幾多に分解され  
始点は随時移動していく

# ずれ判定ーループが起きる

ずれ判定(6/6)

- ▶ 力の分解と始点の移動を繰り返すとループが起こることがある
- ▶ その力には引張応力は働かず、ずれる



例

# 提案までの流れ

---

1. 構造力学的な「ずれ」の定義
2. ずれの判定方法
3. ずれに関する定理([配布資料参照](#))
4. [提案システム](#)

# 提案システム概要

---

## ▶ 入力:一繋がりの制約を満たす二値画像

### 1. カットライン構築

- ▶ 最大誤差分割
- ▶ ベジエ曲線近似

### 2. ずれないカッティング経路構築

- ▶ サブルーチンを用いた構築
- ▶ サブルーチンの説明
  - ▶ 凸包解析
  - ▶ 前状態導出と部分経路構築

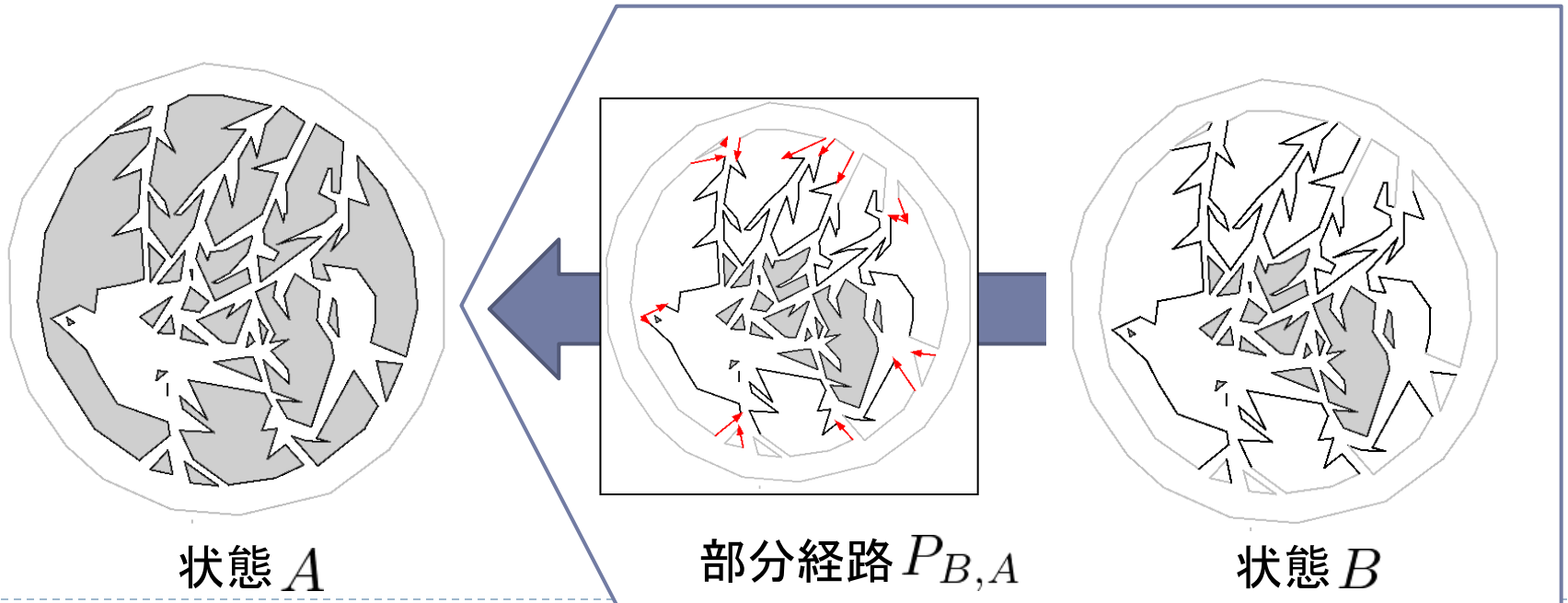
## ▶ 出力:ずれないカッティング経路



入力画像例

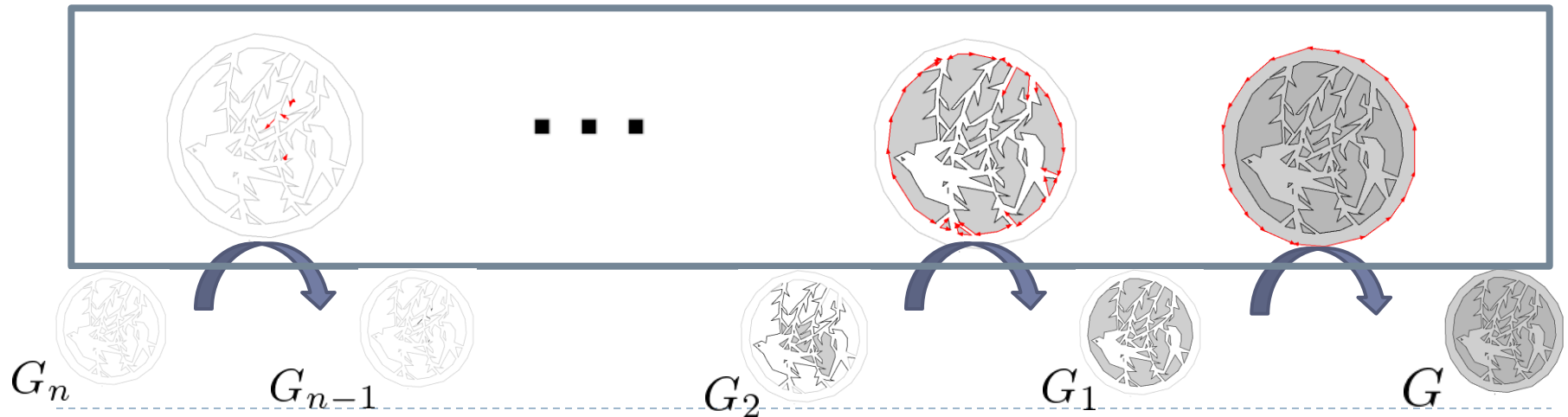
# ずれない経路構築～サブルーチン～

- ▶ ずれないカッティング経路構築に用いるサブルーチン
  - ▶ 線が切られているある状態Aから  
その前状態Bとずれない部分経路 $P_{B,A}$ を求める
  - ▶ 状態Bから部分経路 $P_{B,A}$ に従って切るとずれずに状態Aに



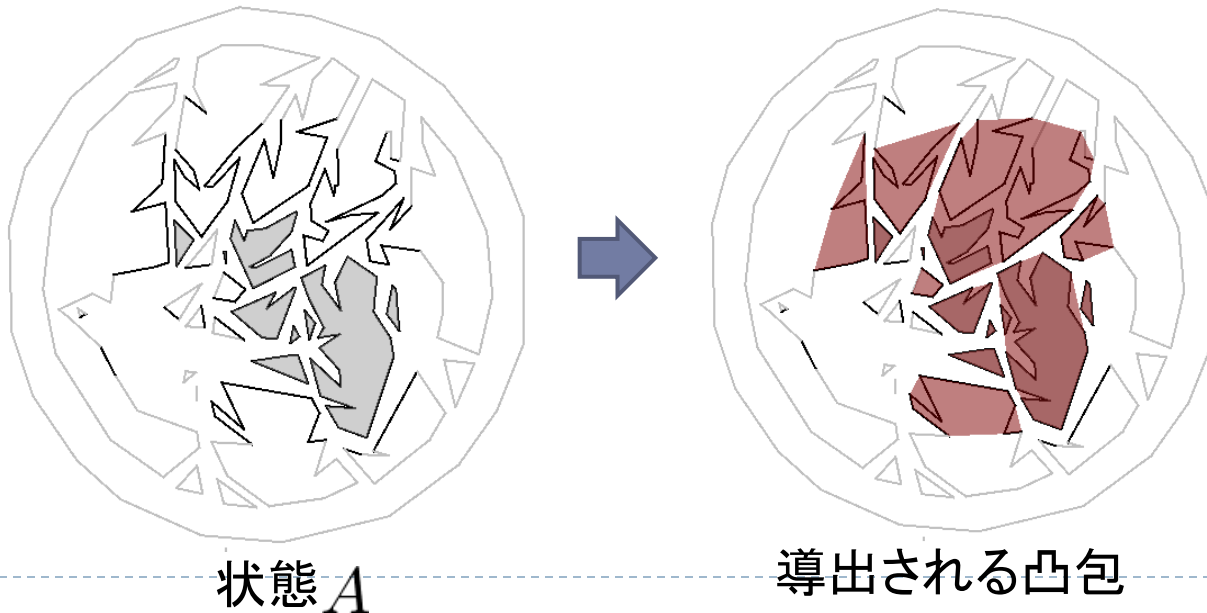
# ずれない切り順構築～概要～

- ▶ 全ての線が切られている状態を $G$ とする
  - ▶  $G$ からその前の状態 $G_1$ と部分経路 $P_{G_1,G}$ を求める
  - ▶  $G_1$ からその前の状態 $G_2$ と部分経路 $P_{G_2,G_1}$ を求める
  - ▶ ...
  - ▶  $G_n$ が何も切っていない状態になったら
- ▶ カutting経路( $P_{G_n,G_{n-1}}, \dots, P_{G_2,G_1}, P_{G_1,G}$ )を出力する



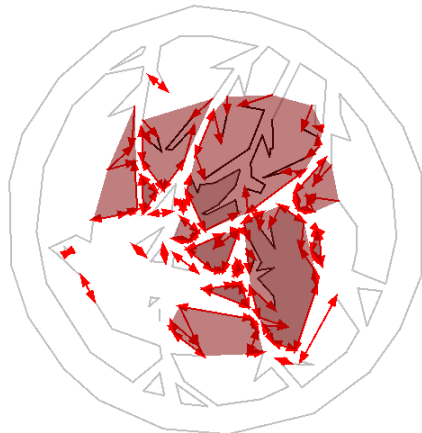
# サブルーチン～凸包解析～

1. 現状態をAとする
2. 一繋がりの切られた線で作られる凸包を作る
3. 2つの凸包が交差する(共有点を持つ)とき  
その2つの凸包を含む新たな凸包を導出する
4. 内包する凸包以外とは交差しなくなるまで凸包を導出する



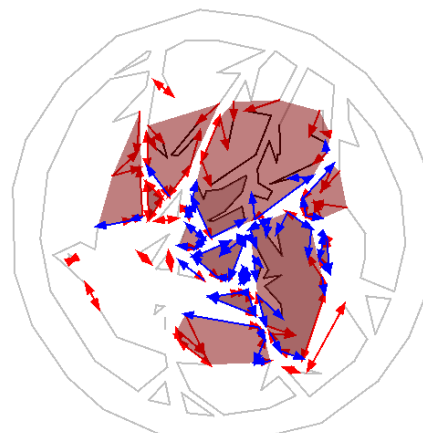
# ～前状態導出と部分経路構築～

1. こうして求まった凸包の全ての頂点から切れる切り方の集めたものを切り方集合 $C$ とする
2. ずれ判定( $F, S$ )を用いることで, 切り方集合 $C$ の中で分解のループが起こるものを除く
3. 現状態 $A$ から切り方集合 $C$ が切られてない前状態 $B$ を導出
4. 最近傍法で切り方集合 $C$ を比較的短い経路になる部分経路 $P_{B,A}$ に並べ替える



切り方集合 $C$ :

赤い矢印の集合

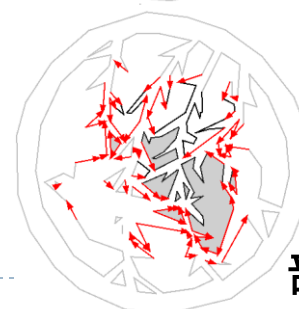


青い矢印では

ループ発生



前状態 $B$



部分経路 $P_{B,A}$

# 提案システムでの出力結果（1 / 2）

## ▶ カuttingプロッタ制御プログラムを組み実行

▼ 提案経路での切り出し



入力2値画像(切り絵)



# 提案システムでの出力結果 (2 / 2)

## ▶ プロッタに付属のソフトウェアと比較



入力2値画像(切り絵)

付属のソフト



提案切り順



下の紙



上の紙

# まとめ・考察

---

## ▶ まとめ

- ▶ 紙のカッティングにおけるずれ判定方法を定式化
- ▶ ずれに関する定理を導いた
- ▶ 任意の形状に対してずれないカッティング経路を提案した

## ▶ 結果からの考察

- ▶ カッティングプロッタにおいて端さえ固定できれば

- ▶ 粘着シートが不要
- ▶ 粘着が効かない材質もカッティング可能
- ▶ 複数枚まとめてカッティング可能

- ▶ 端を固定する方法として...

- ▶ テープ
- ▶ 磁石



生産性の向上

# 今後の課題

---

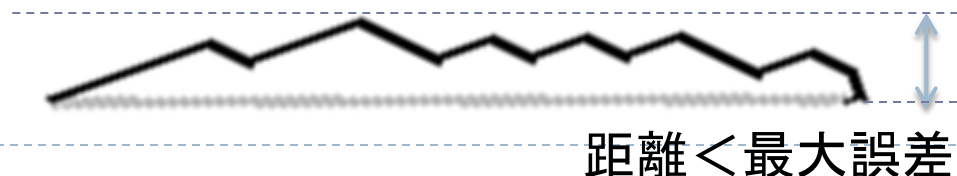
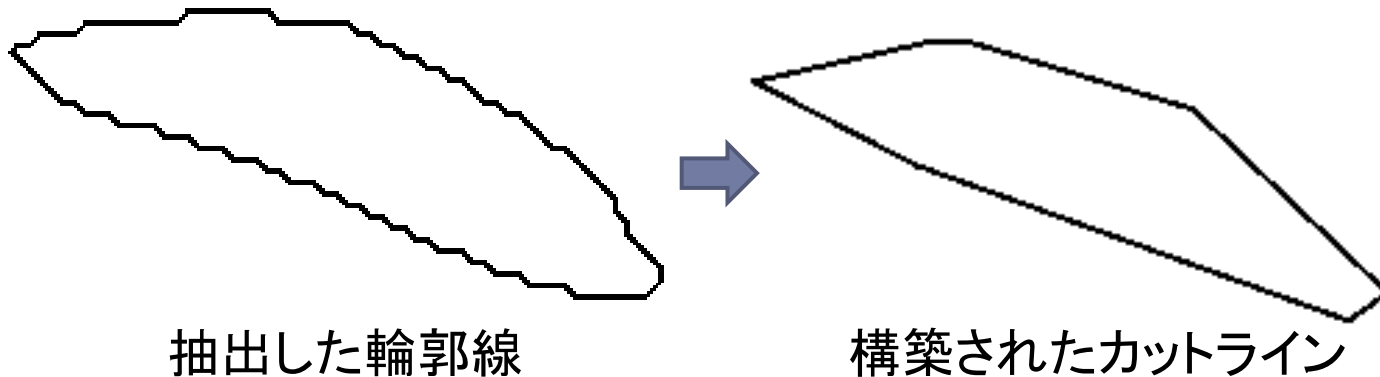
- ▶ カットラインの数によっては導出に時間がかかる
  - ▶ 現状ではカットラインの数を $n$ として $O(n^4)$  である
  - ▶ さらなるアルゴリズムの高速化の考案
- ▶ 移動距離評価の考慮
  - ▶ より短い移動距離になるアルゴリズムの実装
  - ▶ GAを用いたカッティング経路探索

ご清聴ありがとうございました

▼ 以降は補足スライド

# カットライン構築～最大誤差分割

1. 入力2値画像から輪郭線抽出
2. 本来の輪郭線との距離が最大誤差を超えない直線でカットラインを構築する
  - ▶ 実際のデザインとのずれが出ないように最大誤差はなるべく小さく設定

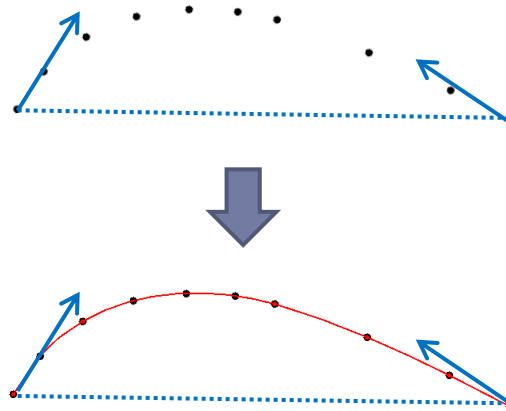


# カットライン構築～ベジエ曲線近似

- ▶ 多角形での出力では品質的に不十分
  - ▶ プロッタでは3次ベジエ曲線が使える
- ▶ ベジエ曲線での近似法
  - ▶ GRAPHIC GEMSに掲載されている手法で実装
  - ▶ 接線の傾きと通過頂点情報を用いる



多角形出力



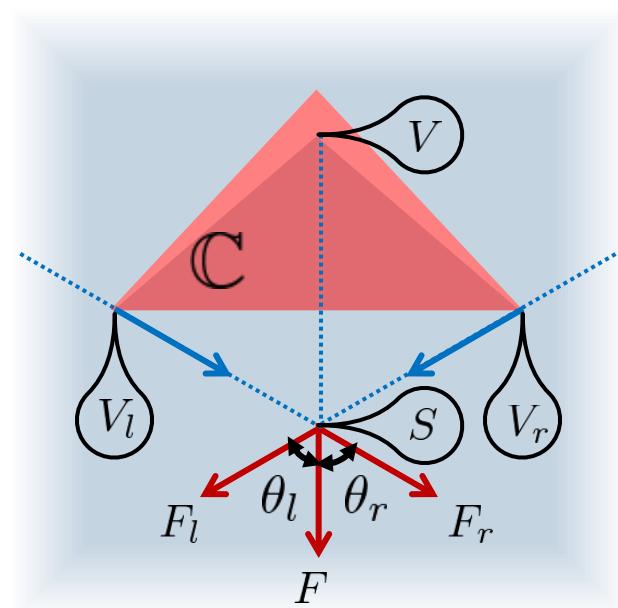
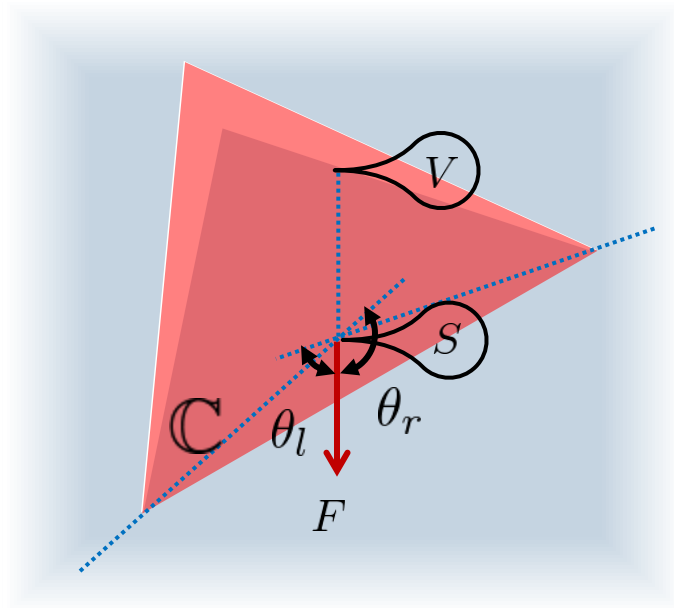
ベジエ近似



近似後出力

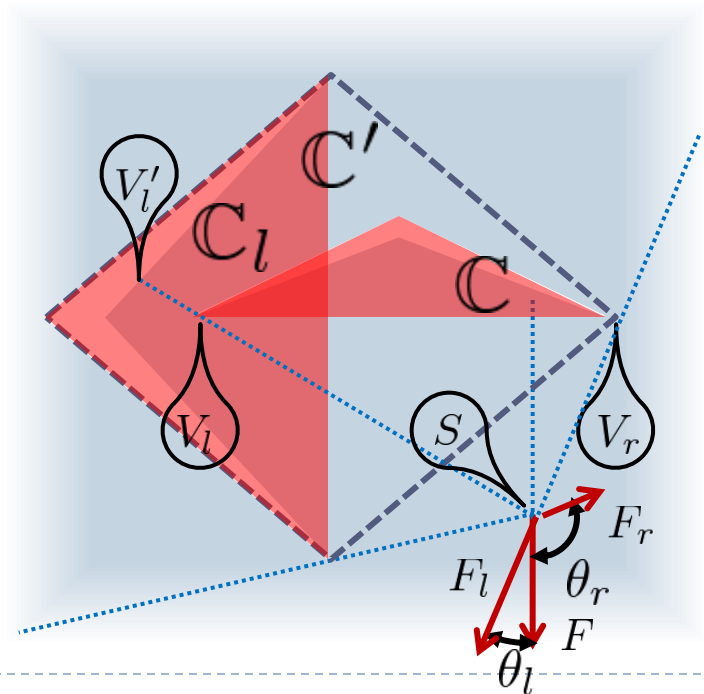
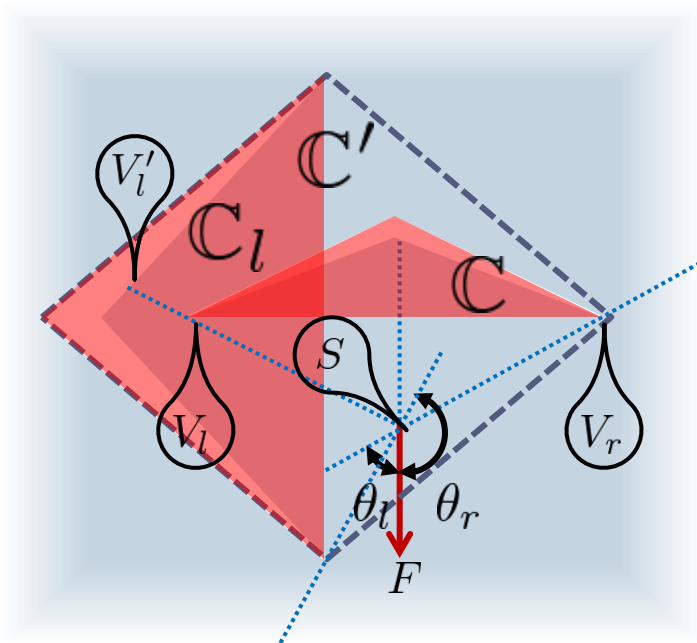
# 切られた線で作られる凸包

- ▶ ある凸包CにVが含まれるとする
  - ▶ 凸包CにSも含まれるならずれる
  - ▶ 凸包CにSが含まれないならSからとCへの接線方向に力の分解が行われる



# 交差する2つの凸包で作られる凸包

- ▶ 作られた凸包 $C'$ に $V$ が含まれるとする
  - ▶ 凸包 $C'$ に $S$ も含まれるならずれる
  - ▶ 凸包 $C'$ に $S$ が含まれないなら $S$ からと $C'$ への接線方向に力の分解が行われる



# 独立な凸包

- ▶ 独立な凸包の集まりを考える
- ▶ 凸包の頂点から切るときはループ以外ではずれない
- ▶ ずれ判定での $S$ と $V$ は必ず同じ凸方には入らない

