



ハンドリング工学特論

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻
システムインテグレーション講座
生産システムインテグレーション領域
若松 栄史



柔軟物体のハンドリング

- 剛体のハンドリングとの相違点
 - ◆ 柔軟物体の予期しない変形による作業の失敗
 - ◆ 柔軟物体の変形を利用した特徴的作業方策(紙めくり、紐結び)
- 現状
 - 特定の作業に特化した作業方策・経験的に得られた作業方策
 - 「何故そんな方策を選択したのか？」
 - 「他にもっと効率的な方策はないのか？」
- 必要とされるもの

柔軟物のモデリング

「どう掴んだらどう変形するの？」

柔軟物のハンドリング手法

「どう掴んだらうまくハンドリングできるの？」



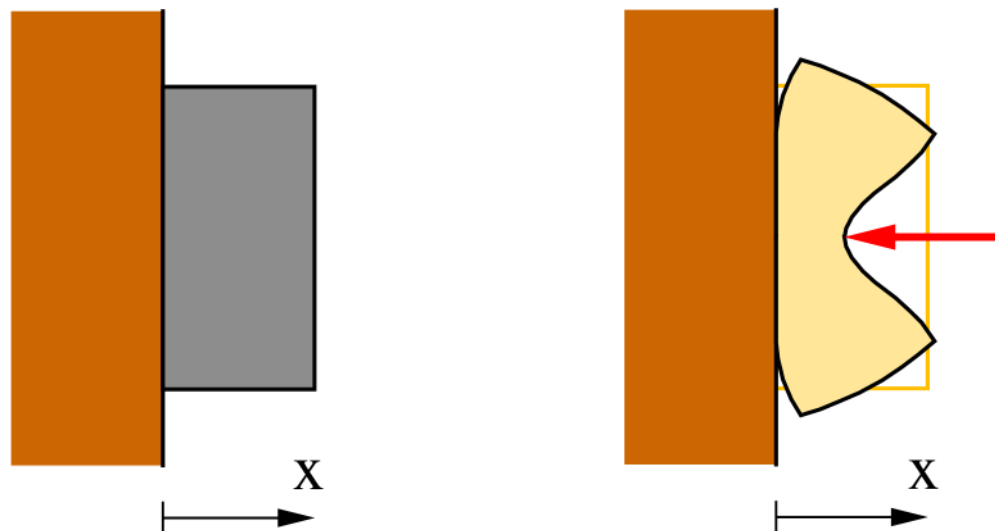


柔軟物ハンドリング



柔軟物体の作業計画手法

- 剛体のマニピュレーション過程 — 接触状態グラフで表現可能
- 柔軟物体のマニピュレーション過程 — 接触状態グラフ表現は可能か？
 - ◆ 接触による運動制約が物体の各点で異なる
 - ◆ 接触状態を明確に区分できない



例：薄板状物体のマニピュレーション過程表現

■ 薄板状物体のマニピュレーションにおける重要項目

マニピュレーションが、対象物と制御物体(マニピュレータ)との機械的接触により達成されるものとする、どう接触できるかによって、どのように操作できるか決まる

したがって、制御物体が薄板状物体の...

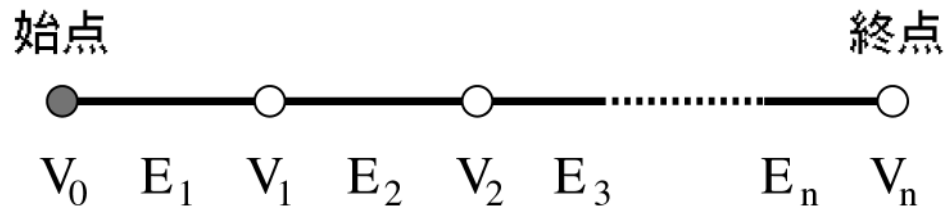
- ◆ 表にも裏にも接触できる
- ◆ 表には接触できるが、裏には接触できない
- ◆ 裏には接触できるが、表には接触できない
- ◆ 表にも裏にも接触できない

...という点に着目して、状態を**定性的に、かつ有限個に**分類する



薄板状物体の接触状態表現①

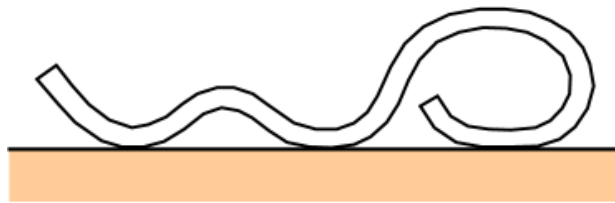
- 作業空間を二次元と仮定
- 頂点と稜線の集合として物体を表現



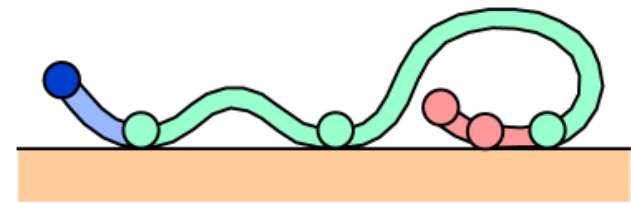
- 各要素の区別
 - ◆ 床面に接触しているか否か？
 - ◆ 表と裏、どちらが接触しているか？
 - ◆ どちら側に折れ曲がっているか？



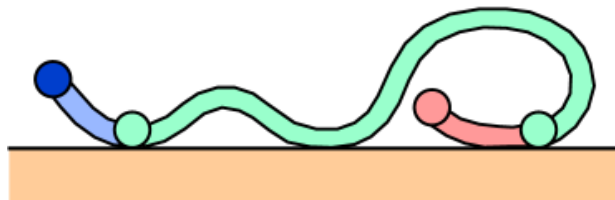
薄板状物体の接触状態表現②



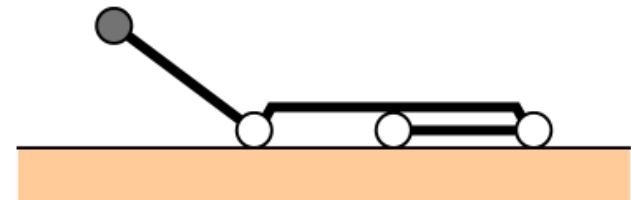
実際の形状



頂点・稜線の分類



シンプル化



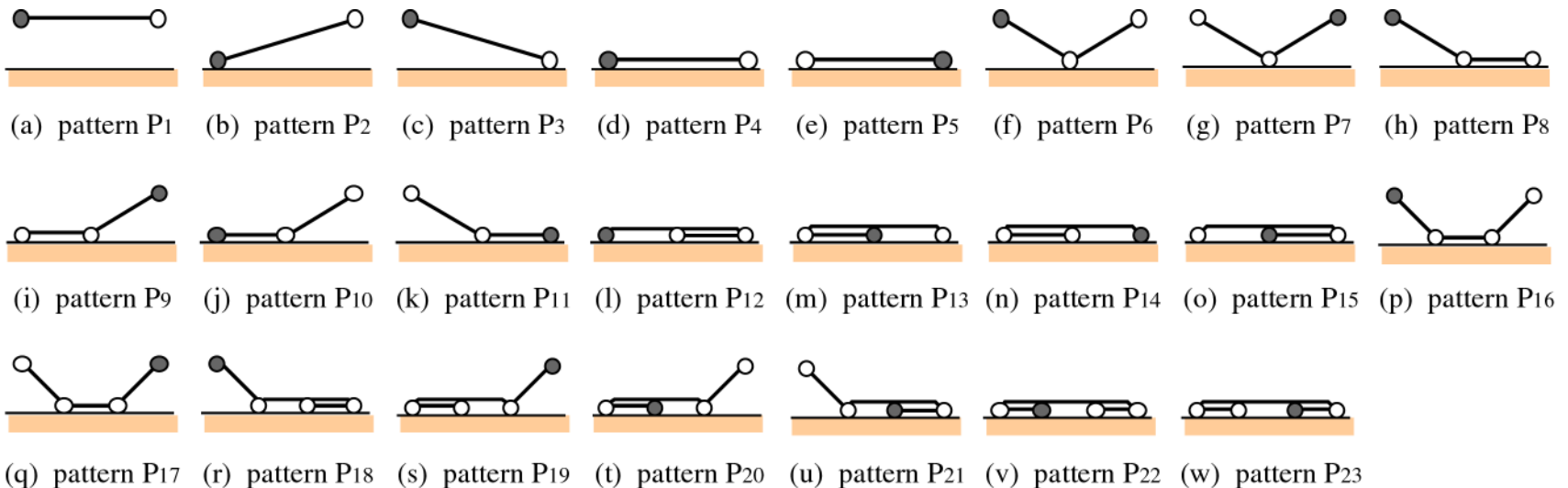
シンボル化

(始点) - (両面接触可) - (表面のみ接触可) - (両面接触不可) - (終点)



薄板状物体の接触状態表現③

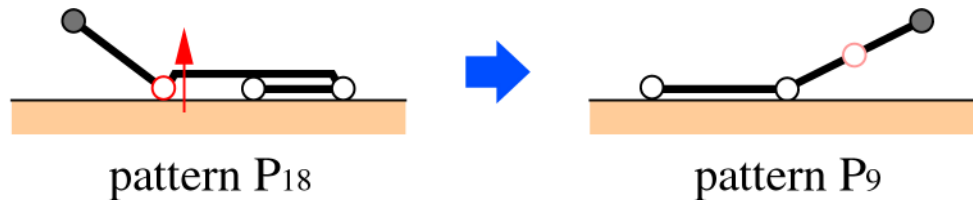
- 接触状態を有限個のパターンで定性的に表現
 - ◆ 単一の環境面に対する接触パターン: 23種類
 - ◆ 要素数: 最大で頂点4点、稜線3本



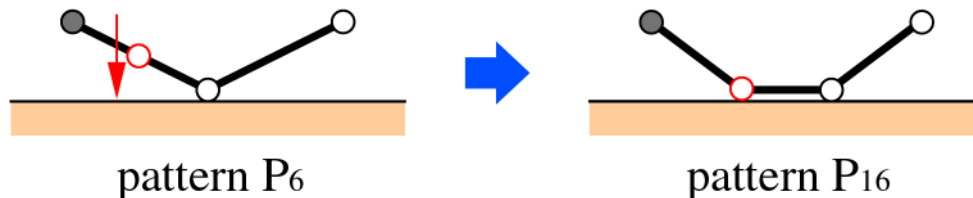
薄板状物体の状態遷移表現①

■ 接触状態の遷移ルール

- ◆ 既に存在する頂点を一つ接触させる／離脱させる



- ◆ 新たに生成した頂点を一つ接触させる／離脱させる



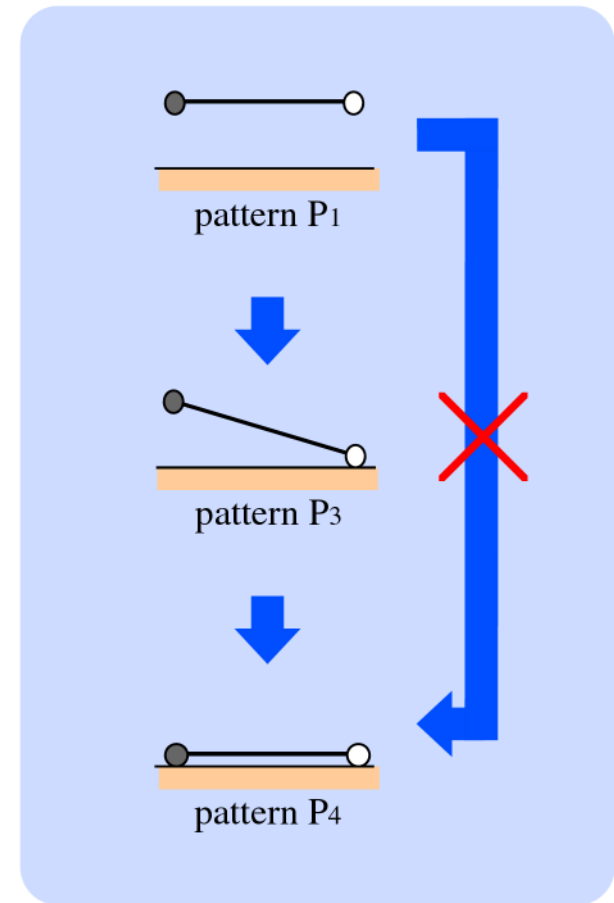
全ての接触パターンが任意の接触パターンに遷移できるわけではない

→ パターン遷移マトリックス: M^t



薄板状物体の状態遷移表現②

$$M^t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

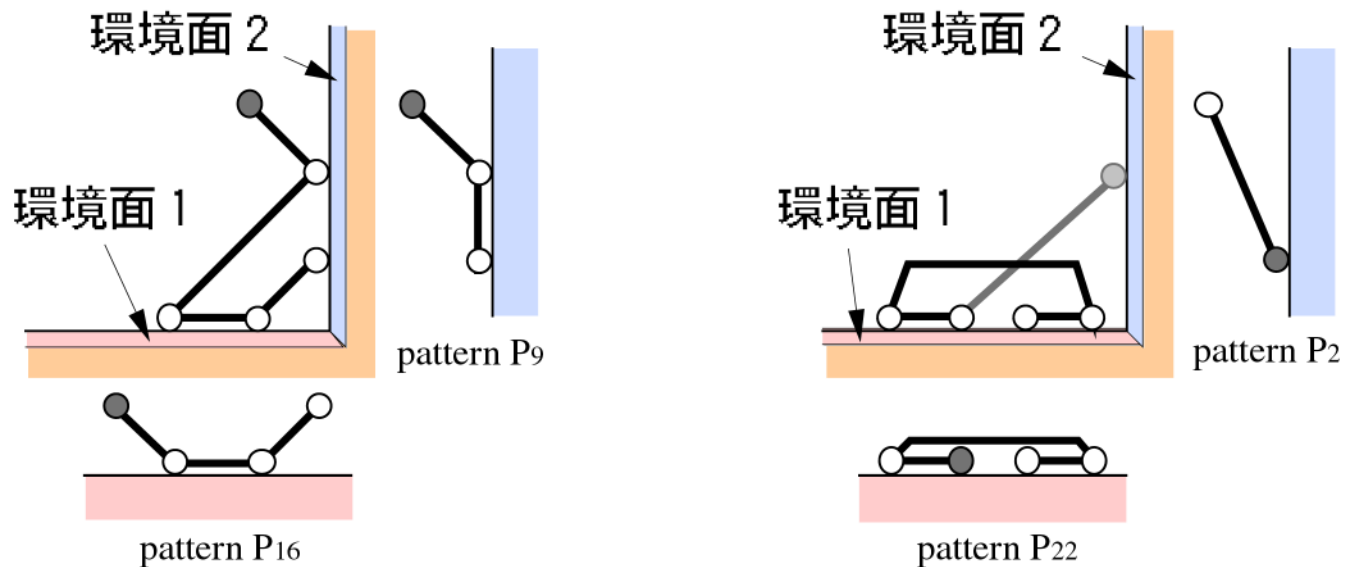


薄板状物体の状態遷移表現③

- 環境面が二面以上存在する場合の接触状態
各面に対する接触パターンの組み合わせで表現

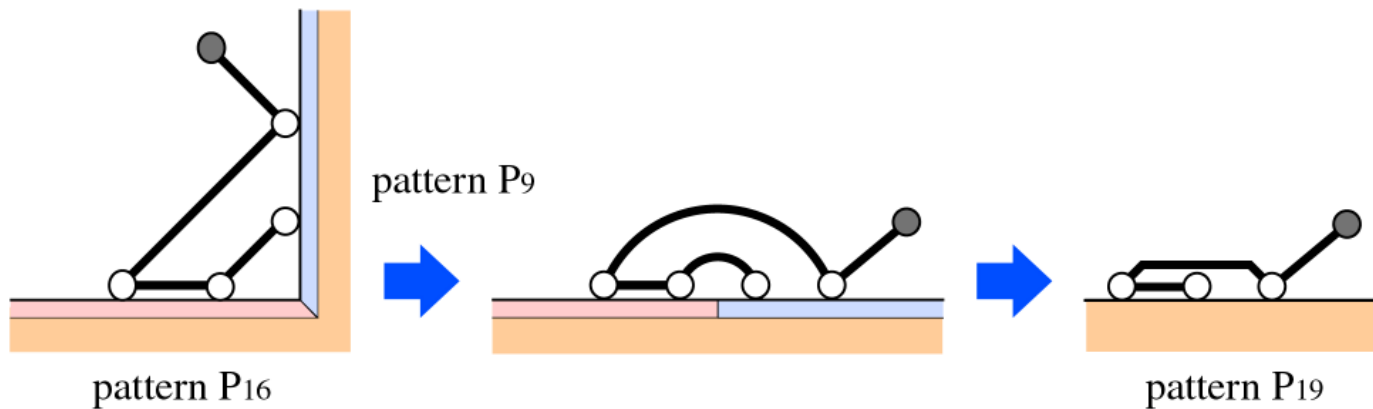
全ての接触パターンが組み合わせ可能なわけではない

→ パターン組み合わせマトリックス: M^c



薄板状物体の状態遷移表現④

■ 接触パターンの合成



パターン組み合わせマトリックス

M_{mn}^c : P_m と P_n の合成後の接触パターン

もし $M_{mn}^c = 0$ ならば、 P_m と P_n の組み合わせは不可能



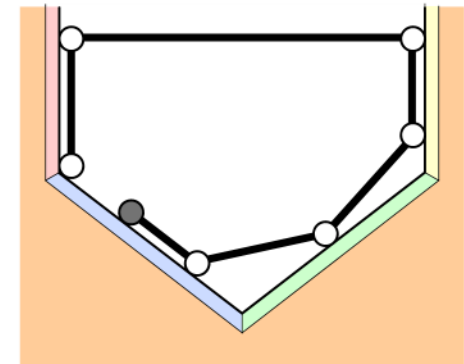
薄板状物体の状態遷移表現⑤

例) 組み合わせ $P_8 - P_{15} - P_6 - P_{16}$ は実現可能か？

$M^c =$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	2	4	4	0	10	12	4	12	10	0	12	0	0	0	10	12	12	12	0	0	0	0
3	5	3	0	5	15	9	0	9	15	5	0	0	0	15	15	9	0	0	15	15	0	0
4	0	4	0	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
5	5	0	0	0	15	0	0	0	15	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0
6	13	8	0	13	A	B	8	18	23	13	0	13	0	15	A	B	18	18	23	23	0	23
7	11	14	14	0	C	D	14	22	20	11	22	0	14	0	C	D	22	22	21	21	22	0
8	13	8	0	13	23	19	0	19	23	13	0	0	0	23	23	19	0	0	23	23	0	0
9	5	0	0	0	15	9	0	0	15	5	0	0	0	0	15	9	0	0	15	15	0	0
10	0	4	0	0	10	12	4	12	0	0	0	0	0	0	10	12	12	12	0	0	0	0
11	11	14	14	0	20	22	14	22	21	0	22	0	0	0	20	22	22	22	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
13	13	0	0	0	23	0	0	0	23	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0
14	0	14	0	0	0	22	0	22	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0
16	13	8	0	13	A	B	8	18	23	13	0	13	0	23	A	B	18	18	23	23	0	23
17	11	14	14	0	C	D	14	22	21	11	22	0	22	0	C	D	22	22	21	21	22	0
18	13	0	0	0	23	19	0	0	23	13	0	0	0	0	23	19	0	0	23	23	0	0
19	13	0	0	0	23	19	0	0	23	13	0	0	0	0	23	19	0	0	23	23	0	0
20	0	14	0	0	20	22	14	22	0	0	0	0	0	0	20	22	22	22	0	0	0	0
21	0	14	0	0	20	22	14	22	0	0	0	0	0	0	20	22	22	22	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0

A = 16 or 23
 B = 18 or 19
 C = 20 or 21
 D = 17 or 22



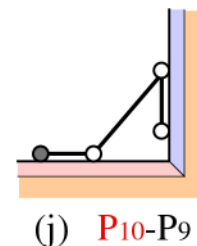
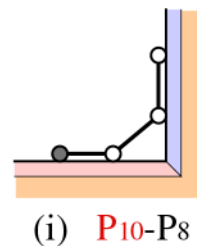
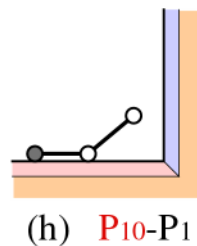
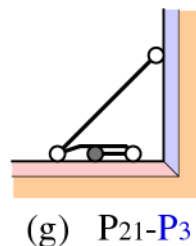
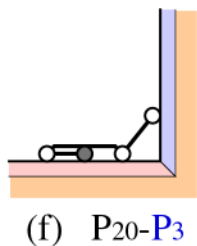
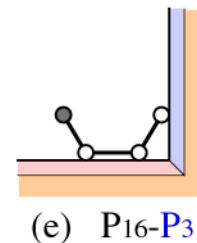
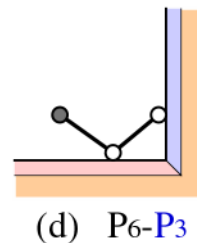
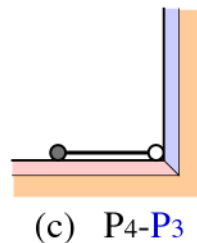
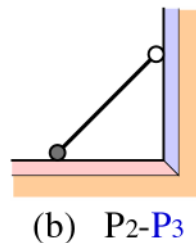
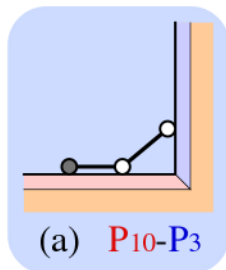
薄板状物体の状態遷移表現⑥

- 環境面が二面以上存在する場合の状態遷移ルール

一回の操作で一つの環境面に対する接触パターンのみが変化する

- ◆ どのパターンに変化可能か？

- ◆ 新しいパターンが他の面に対するパターンと組み合わせ可能か？



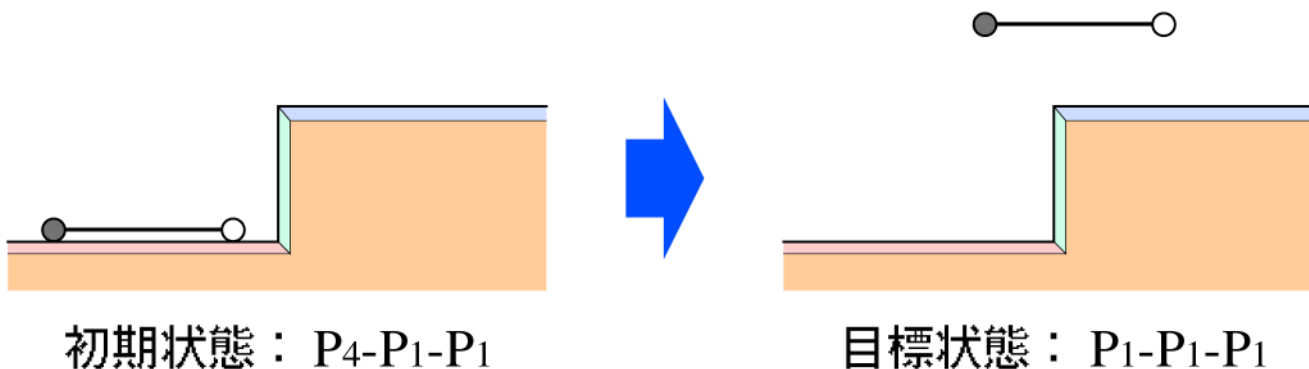
薄板状物体のマニピュレーション過程

■ 薄板状物体のマニピュレーション過程

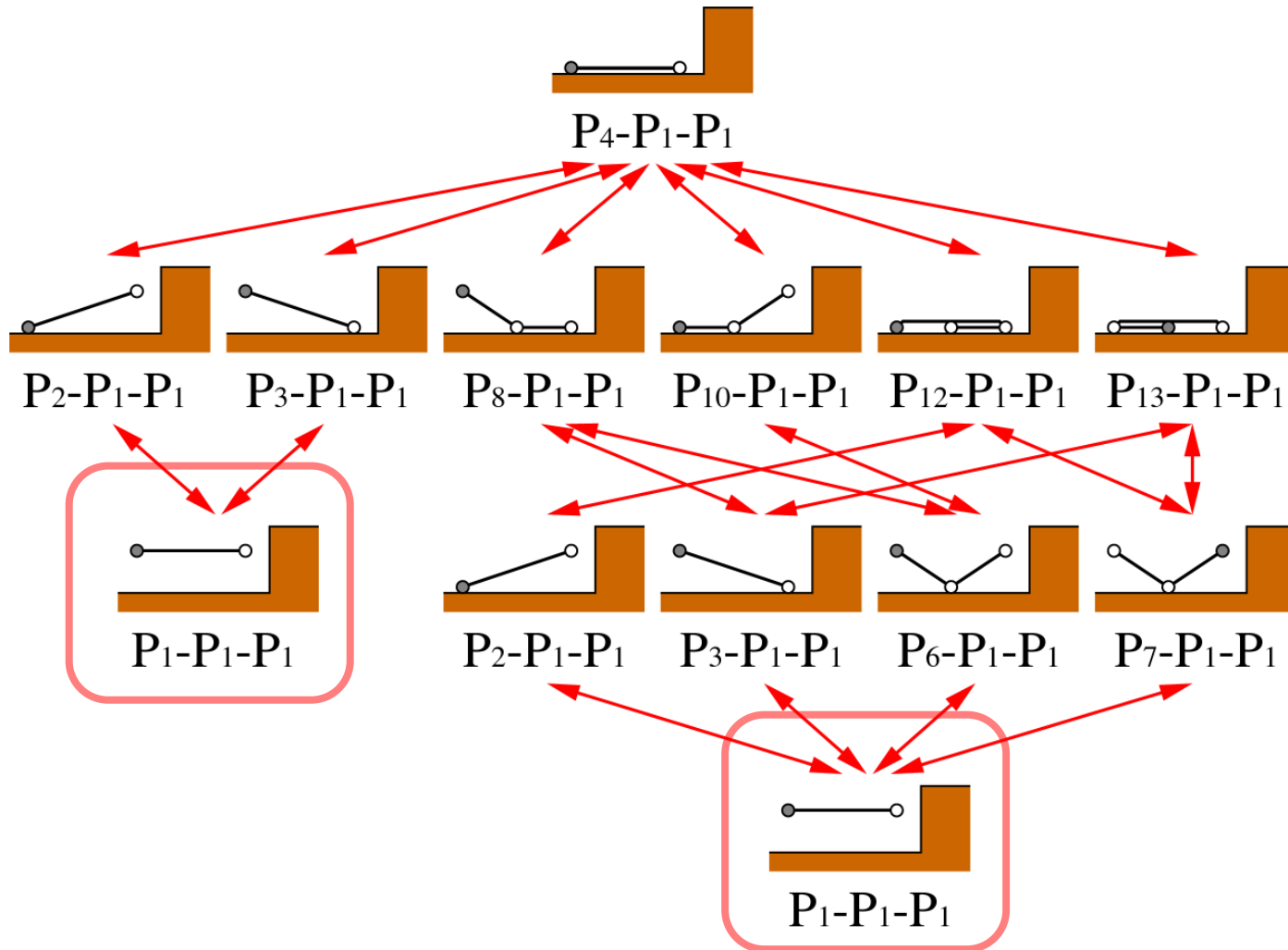
- ◆ 接触状態をノード、状態遷移をアークとする状態遷移グラフで表現可能
- ◆ 状態遷移グラフ:
初期状態と目標状態が与えられれば、**計算機により自動生成可能**

■ ケーススタディ

- ◆ 条件: 3回以内の状態遷移で目標状態に到達すること

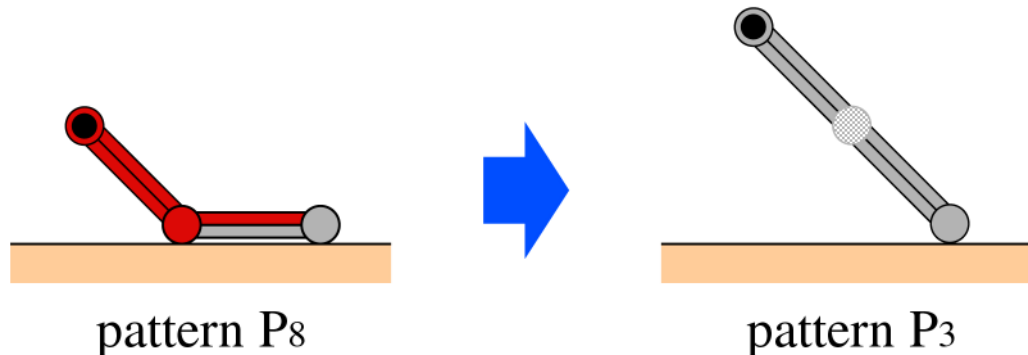


状態遷移グラフ自動生成結果



ハンドリング過程の実現可能性

- ハンドリング過程が制御物体(マニピュレータ等)の**機械的接触**により実現可能か？
- 可能だとすれば、**どの辺りに**制御物体を接触させればいいのか？
- 遷移可能接触領域：
制御物体をそこに接触させることによって、接触状態を遷移させることのできる可能性のある領域→**計算機により特定可能**



ハンドリング計画

■ ケーススタディ②

- ◆ 条件: 7回以内の状態遷移で目標状態に到達すること



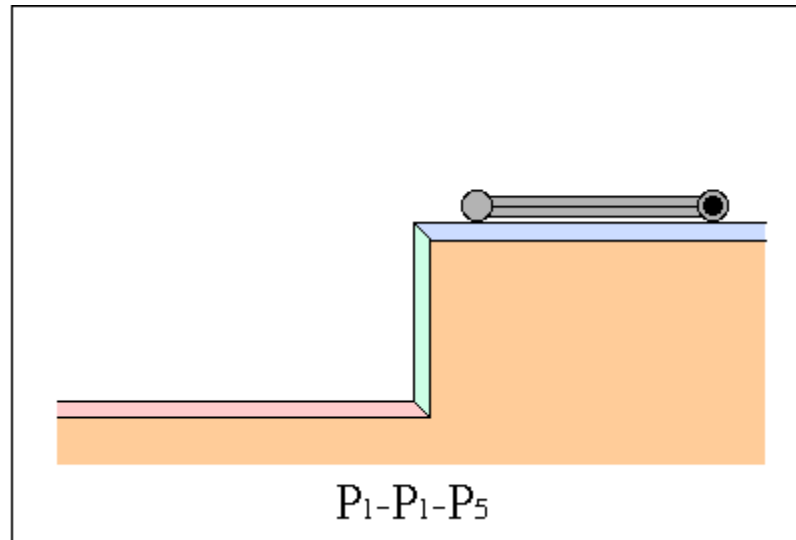
初期状態： P₄-P₁-P₁

目標状態： P₁-P₁-P₅

計算機により、15,154通りのマニピュレーション過程が自動生成

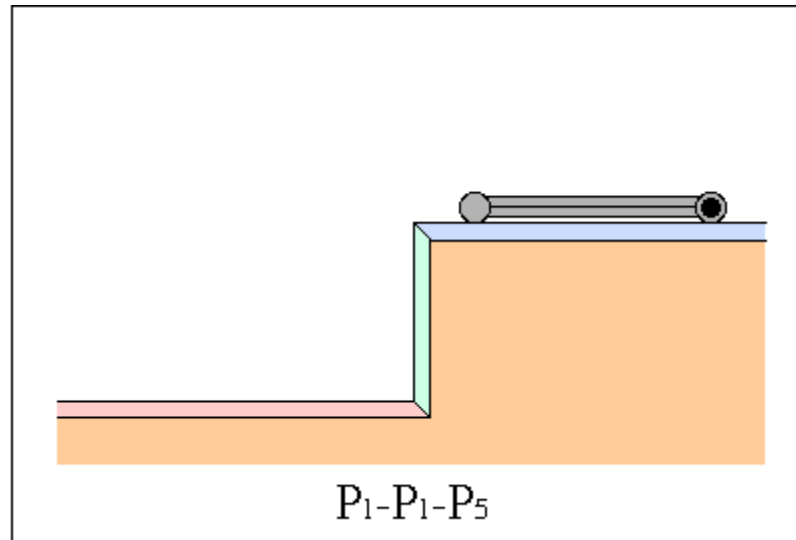


生成されたハンドリング例①



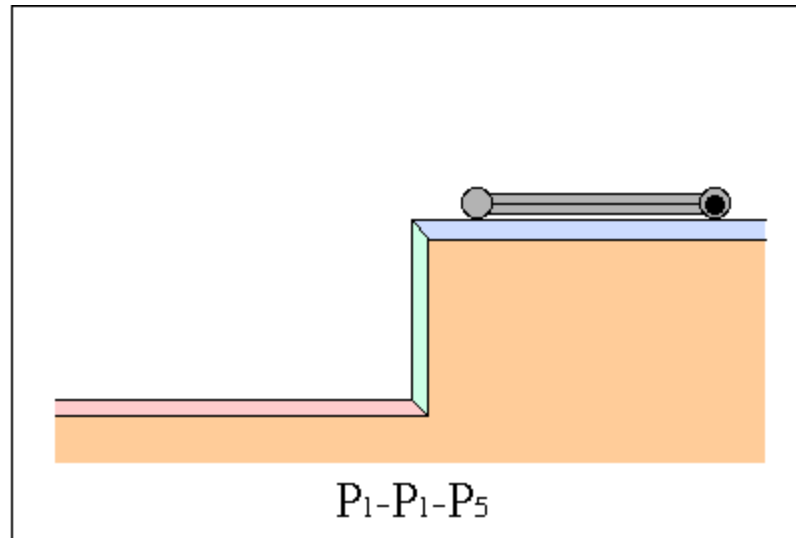
- 物体始点(左端)が常に遷移可能接触領域に
→この点を把持すれば、持ち替えることなく作業達成可能

生成されたハンドリング例②



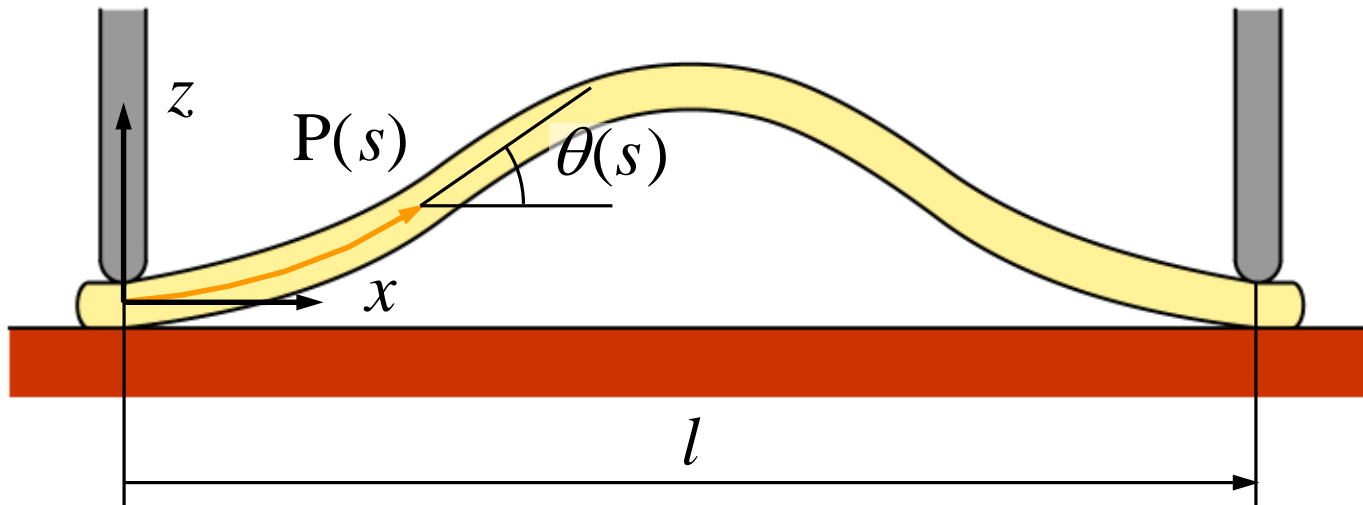
- 遷移可能接触領域が重複しない遷移がある
→ 1回持ち替えるか、2台のマニピュレータが必要

生成されたハンドリング例③



- 遷移可能接触領域が存在しない状態がある →ハンドリング実現不可能

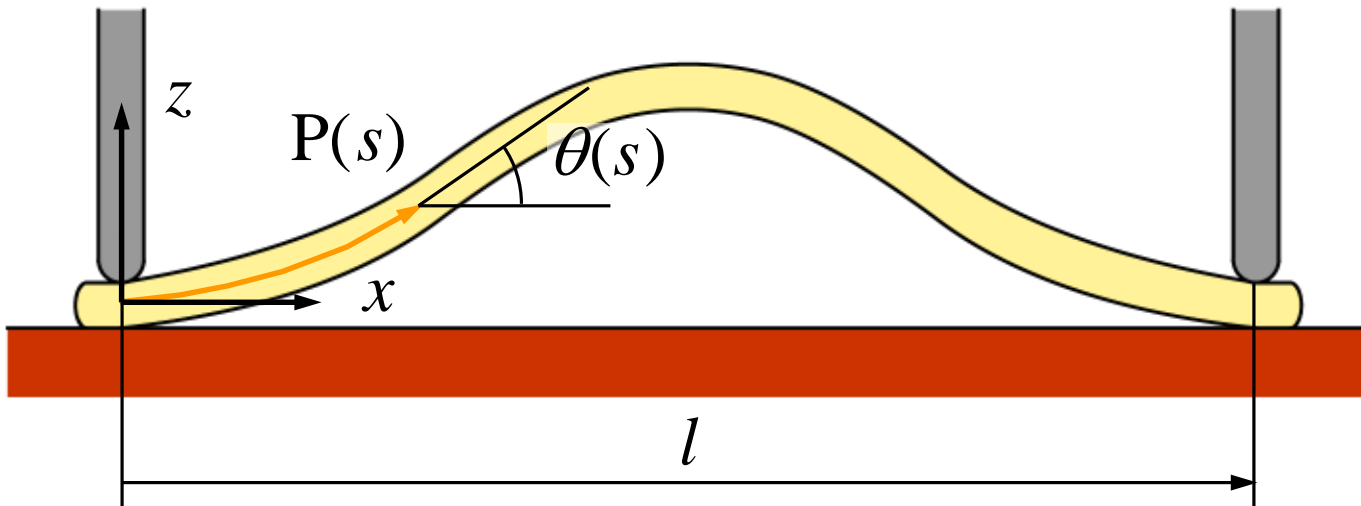
テーブル上の薄板状物体の一様変形



点 $P(s)$ の座標:

$$\begin{bmatrix} x(s) \\ z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^s \cos \theta(s) ds \\ \int_0^s \sin \theta(s) ds \end{bmatrix}$$

薄板状物体のポテンシャルエネルギー



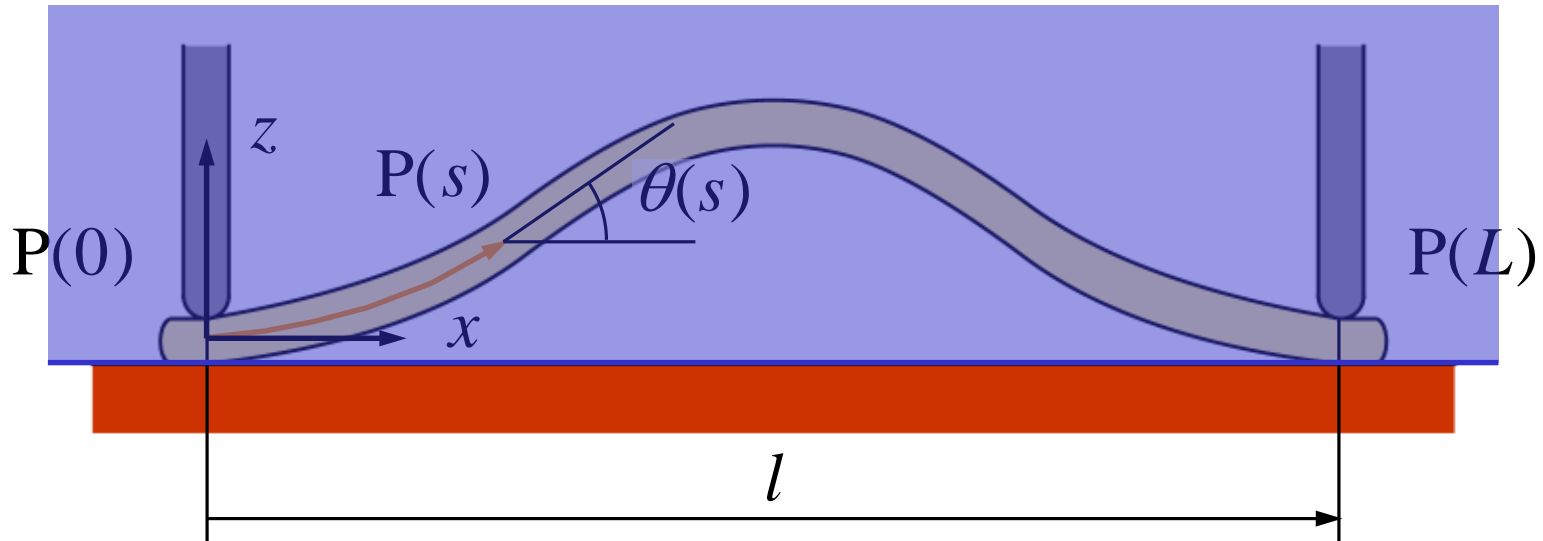
曲げによる弾性ポテンシャル:
$$U_{\text{flex}} = \int_0^L \frac{1}{2} R_f \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds$$

重力ポテンシャル:
$$U_{\text{grav}} = \int_0^L Dg z(s) ds$$

ポテンシャルエネルギー:
$$U = U_{\text{flex}} + U_{\text{grav}}$$



薄板状物体に加えられる幾何学的制約



両端の姿勢に関する制約: $\theta(0) = 0$ $\theta(L) = 0$

右端の位置に関する制約: $x(L) = l$ $z(L) = 0$

紙全体の位置に関する制約: $z(s) \geq 0 \quad \forall s \in [0, L]$

薄板状物体の変形形状の導出手法

静力学の変分原理より

物体の安定な変形形状: **ポテンシャルエネルギーが最小**

幾何学的制約のもとでポテンシャルエネルギーを最小にする

$\theta(s)$ ($0 \leq s \leq L$) を求める

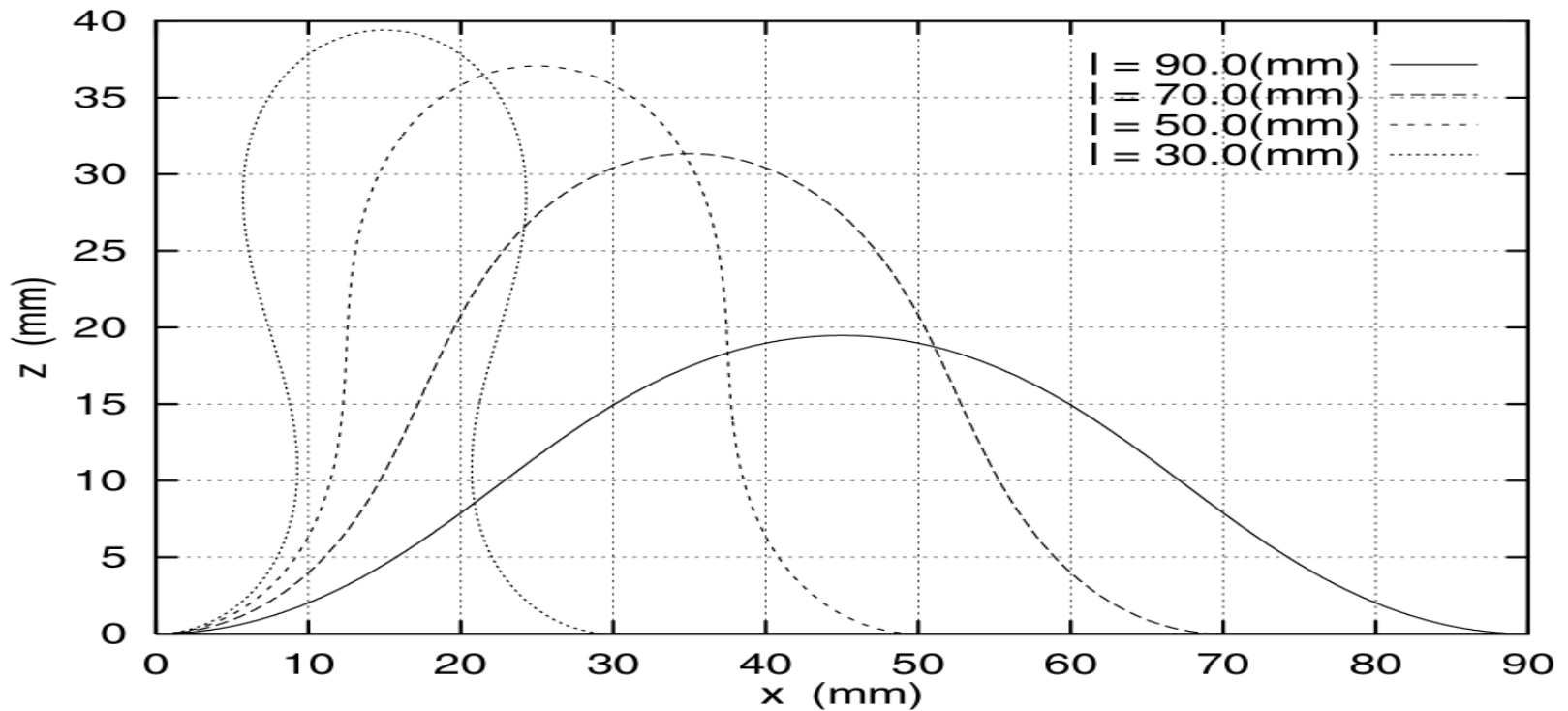
$$\theta(0) = 0, \quad \theta(L) = 0, \quad \int_0^L \cos \theta \, ds = l, \quad \int_0^L \sin \theta \, ds = 0,$$

$$\int_0^s \sin \theta \, ds \geq 0 \quad \forall s \in [0, L] \quad \text{のもとで}$$

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} R_f \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds + \int_0^L Dg \left(\int_0^s \sin \theta \, ds \right) ds \text{ を最小化}$$



薄板状物体の変形形状計算例



重力の影響を考慮しない場合の変形形状

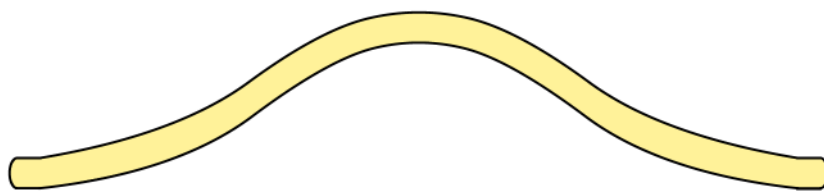


線状物体の変形過程計画①

線状物体のマニピュレーション

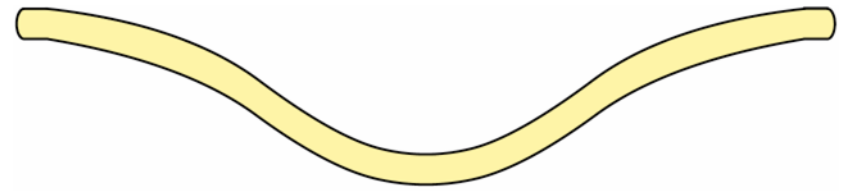
- 物体上の有限個の点を操作し、変形させる過程
- 物体の破損を防ぐために、過度の変形を避ける必要がある

→ 変形の小さい物体の変形過程



$$\theta_0(s) \quad (0 \leq s \leq L)$$

$$\theta(s; 0) \equiv \theta_0(s)$$



$$\theta_1(s) \quad (0 \leq s \leq L)$$

$$\theta(s; 1) \equiv \theta_1(s)$$

$\theta_0(s)$ で表される変形形状から $\theta_1(s)$ で表される変形形状までの変形過程:

$$\theta(s; k) \quad (0 \leq k \leq 1)$$



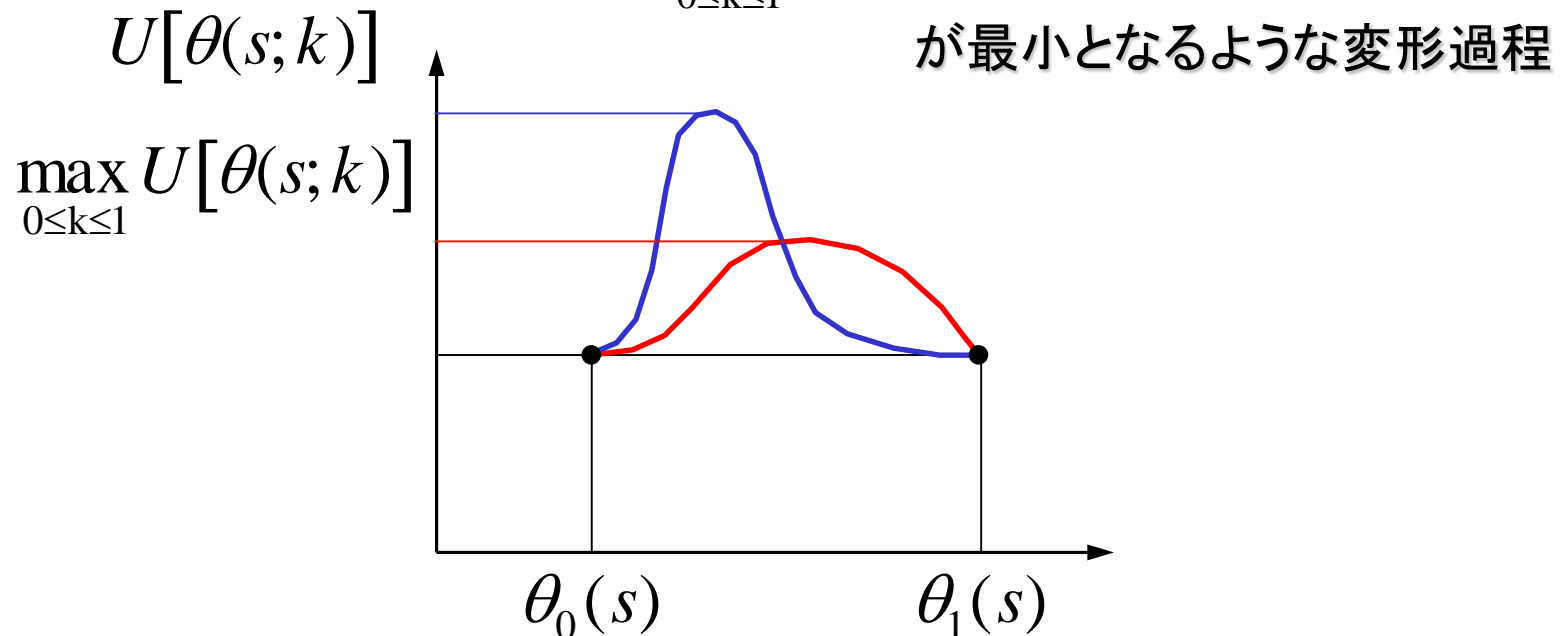
線状物体の変形過程計画②

変形過程中的ポテンシャルエネルギー: $U[\theta(s; k)]$

変形過程中的ポテンシャルエネルギーの最大値: $\max_{0 \leq k \leq 1} U[\theta(s; k)]$

ポテンシャルエネルギーが小さい→変形が小さい

$$\max_{0 \leq k \leq 1} U[\theta(s; k)]$$



線状物体の変形過程計画③

$$\theta(s;k) = \mathbf{a}(k) \cdot \mathbf{e}(s) \quad \theta(s;0) = \mathbf{a}^0 \cdot \mathbf{e}(s), \quad \theta(s;1) = \mathbf{a}^1 \cdot \mathbf{e}(s) \quad \text{とする}$$

$$k=0\text{でのテイラー展開: } \theta(s;k) = \theta(s;0) + \frac{k}{1!} \frac{d\theta}{dk} \Big|_{k=0} + \frac{k^2}{2!} \frac{d^2\theta}{dk^2} \Big|_{k=0} + \dots$$

$$\frac{1}{1!} \frac{d\theta}{dk} \Big|_{k=0} = \mathbf{b}_1^0 \cdot \mathbf{e}(s), \quad \frac{1}{2!} \frac{d^2\theta}{dk^2} \Big|_{k=0} = \mathbf{b}_2^0 \cdot \mathbf{e}(s), \quad \dots \quad \text{とおいて、両辺を}(1-k)\text{倍すると}$$

$$(1-k)\theta(s;k) = (1-k) \left\{ \mathbf{a}^0 + k\mathbf{b}_1^0 + k^2\mathbf{b}_2^0 + \dots \right\} \cdot \mathbf{e}(s) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$k=1\text{でのテイラー展開: } \theta(s;k) = \theta(s;1) + \frac{(k-1)}{1!} \frac{d\theta}{dk} \Big|_{k=1} + \frac{(k-1)^2}{2!} \frac{d^2\theta}{dk^2} \Big|_{k=1} + \dots$$

$$\frac{(-1)}{1!} \frac{d\theta}{dk} \Big|_{k=1} = \mathbf{b}_1^1 \cdot \mathbf{e}(s), \quad \frac{(-1)^2}{2!} \frac{d^2\theta}{dk^2} \Big|_{k=1} = \mathbf{b}_2^1 \cdot \mathbf{e}(s), \quad \dots \quad \text{とおいて、両辺を}k\text{倍すると}$$

$$k\theta(s;k) = k \left\{ \mathbf{a}^1 + (1-k)\mathbf{b}_1^1 + (1-k)^2 \mathbf{b}_2^1 + \dots \right\} \cdot \mathbf{e}(s) \quad \dots \textcircled{2}$$



線状物体の変形過程計画④

①式+②式より

$$\theta(s;k) = \left\{ (1-k)a^0 + ka^1 + (1-k) \sum_{j=1}^{\infty} k^j \mathbf{b}_j^0 + k \sum_{j=1}^{\infty} (1-k)^j \mathbf{b}_j^1 \right\} \cdot \mathbf{e}(s)$$

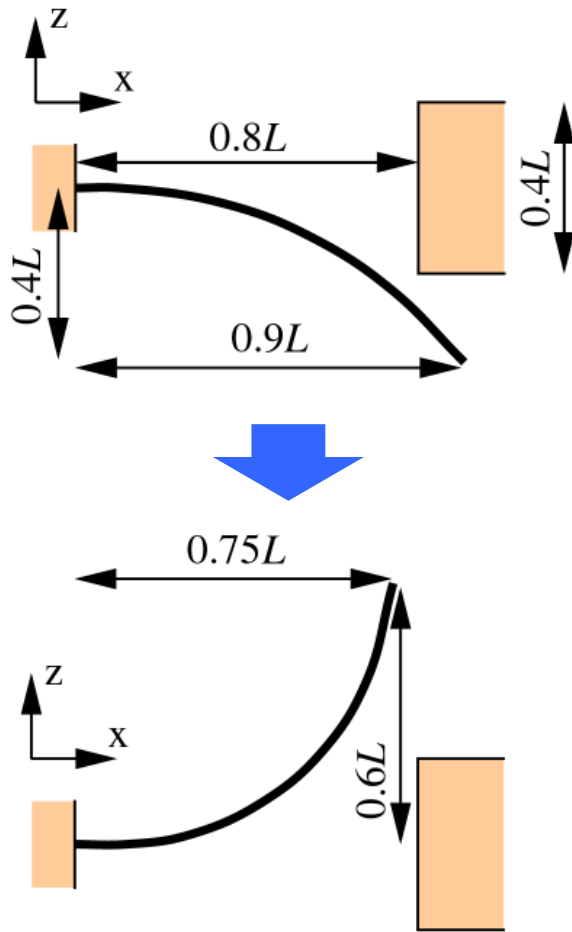
物体の変形形状がどのように推移するかはベクトル群 $\mathbf{b}_j^0, \mathbf{b}_j^1$ に依存する



変形過程中的ポテンシャルエネルギーの最大値が最小となるような
ベクトル群 $\mathbf{b}_j^0, \mathbf{b}_j^1$ を求める



変形の小さい変形過程計算例①

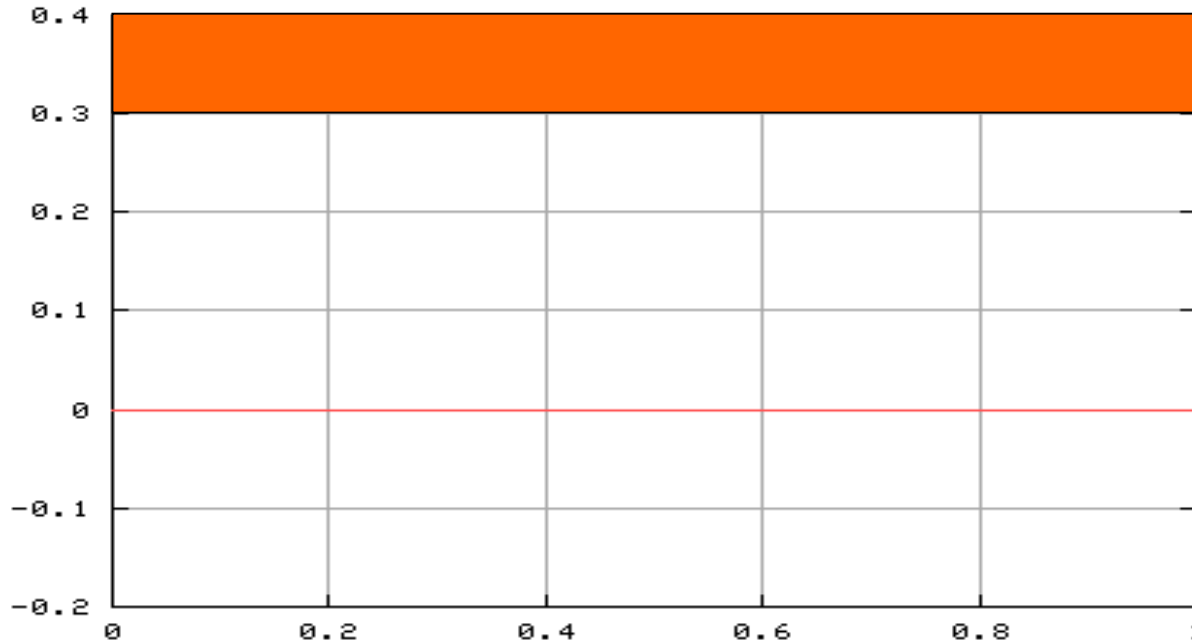
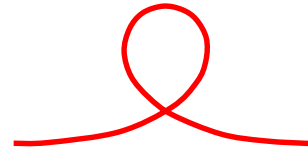


変形の小さい変形過程計算例②

初期形状



目標形状



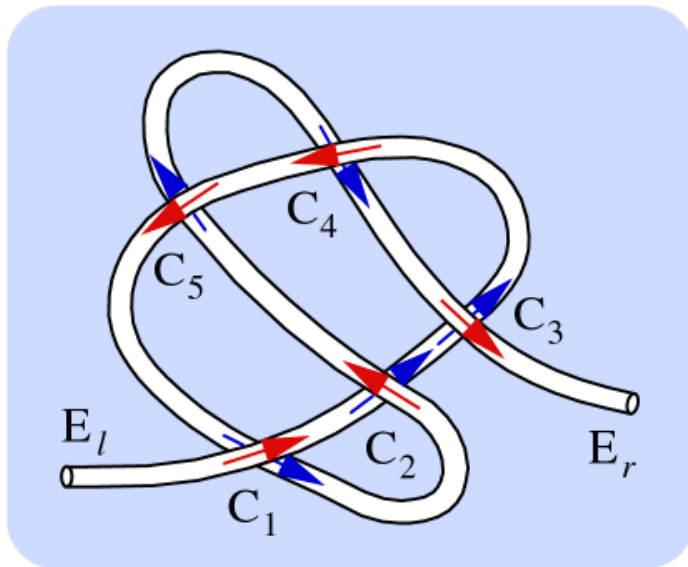
$y \geq 0.3$ 部分に障害物がある場合



線状物体の交差状態表現

三次元形状をある平面に投影→自分自身との交点を有する二次元形状
どのように交わっているか？

→交差の並び方と交差での上下関係、交差の仕方



左端から辿って*i*番目の交差: C_i

上交点: C_i^u 下交点: C_i^l

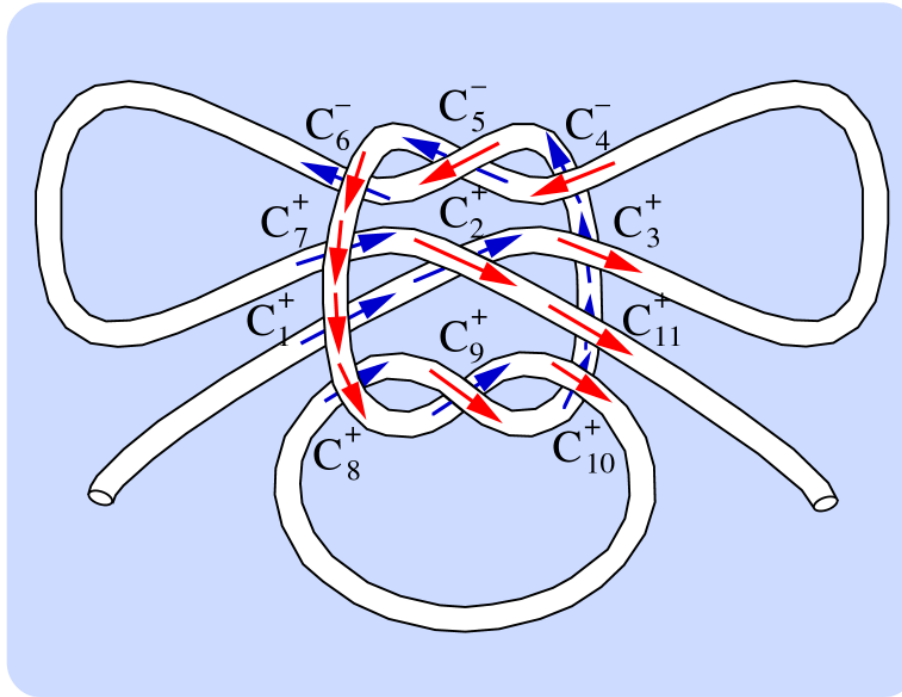


左手交差: C_i^- 右手交差: C_i^+

交差状態: $E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_5^{l-} - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r$



さまざまな結び目の状態表現①



蝶結び

$$E_l - C_1^{l+} - C_2^{l+} - C_3^{u+} - C_4^{u-} - C_5^{l-} - C_6^{u-} - C_7^{u+} - C_1^{u+} - C_8^{u+} - C_9^{l+} - C_{10}^{u+} - \\ - C_8^{l+} - C_9^{u+} - C_{10}^{l+} - C_{11}^{l+} - C_3^{l+} - C_4^{u-} - C_5^{u-} - C_6^{l-} - C_7^{l+} - C_2^{u+} - C_{11}^{u+} - E_r$$



さまざまな結び目の状態表現②

$$\begin{aligned}
 & E_l - C_1^{l-} - C_2^{l+} - C_3^{u+} - C_4^{u-} - C_5^{u-} - C_6^{u+} - C_7^{u+} - C_8^{u-} - C_9^{l-} - C_{10}^{l+} - C_{11}^{u-} - C_{12}^{l-} - \\
 & - C_{13}^{l+} - C_{14}^{u+} - C_{15}^{u-} - C_{16}^{l-} - C_{17}^{l+} - C_{18}^{l-} - C_{19}^{l+} - C_{20}^{l-} - C_{21}^{l+} - C_{22}^{u+} - C_{23}^{u-} - C_{24}^{l-} - \\
 & - C_{25}^{u+} - C_{26}^{l-} - C_{27}^{l+} - C_{28}^{u+} - C_{29}^{u-} - C_{30}^{u-} - C_{31}^{u+} - C_{32}^{u+} - C_{33}^{u-} - C_{34}^{l-} - C_{35}^{l+} - C_{36}^{l-} - C_{37}^{l+} - \\
 & - C_{38}^{u+} - C_{39}^{u-} - C_{40}^{u-} - C_{41}^{u+} - C_{42}^{u+} - C_{43}^{u-} - C_{44}^{l-} - C_{45}^{l+} - C_{46}^{u-} - C_{47}^{l-} - C_{48}^{l+} - C_{49}^{l+} - C_{50}^{u+} - C_{51}^{u-} - C_{52}^{u-} - \\
 & - C_{53}^{l-} - C_{54}^{l+} - C_{55}^{l-} - C_{56}^{l+} - C_{57}^{l-} - C_{58}^{l+} - C_{59}^{u+} - C_{60}^{u-} - C_{61}^{l-} - C_{62}^{l+} - C_{63}^{u+} - C_{64}^{u-} - C_{65}^{l-} - C_{66}^{l+} - \\
 & - C_{67}^{u+} - C_{68}^{u-} - C_{69}^{u-} - C_{70}^{u+} - C_{71}^{u+} - C_{72}^{u-} - C_{73}^{l-} - C_{74}^{l+} - C_{75}^{l-} - C_{76}^{l+} - C_{77}^{u+} - C_{78}^{u-} - C_{79}^{u-} - \\
 & - C_{80}^{u+} - C_{81}^{u+} - C_{82}^{u-} - C_{83}^{l-} - C_{84}^{l+} - C_{85}^{u-} - C_{86}^{l-} - C_{87}^{l+} - C_{88}^{u+} - C_{89}^{u-} - C_{90}^{l-} - C_{91}^{l+} - C_{92}^{l-} - \\
 & - C_{93}^{u+} - C_{94}^{u+} - C_{95}^{u-} - C_{96}^{l-} - C_{97}^{l+} - C_{98}^{u-} - C_{99}^{l-} - C_{100}^{l+} - C_{101}^{u+} - C_{102}^{u-} - C_{103}^{l-} - C_{104}^{l+} - \\
 & - C_{105}^{u+} - C_{106}^{u+} - C_{107}^{u-} - C_{108}^{l-} - C_{109}^{l+} - E_r
 \end{aligned}$$

梅結び



線状物体の状態遷移と結び目理論

結び目理論:

位相幾何学の一分野で、紐の結ばれた／絡まった状態に関する研究



「右の二つの結び目は同じものか？」



ライデマイスター移動:

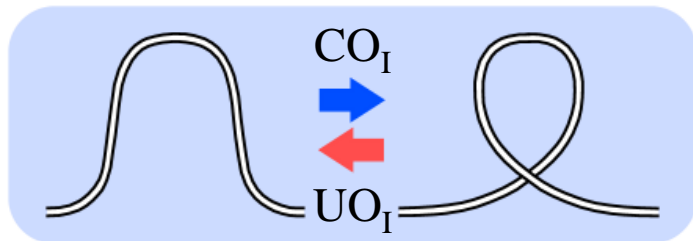
結び目の位相を変えない基本操作＝あやとりの操作



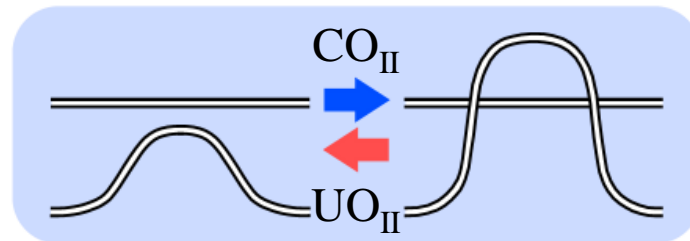
線状物体の基本操作(状態遷移)に応用



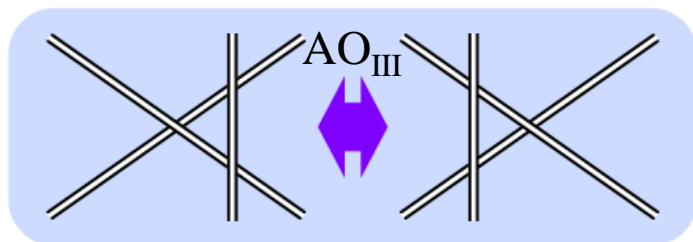
状態遷移のための基本操作



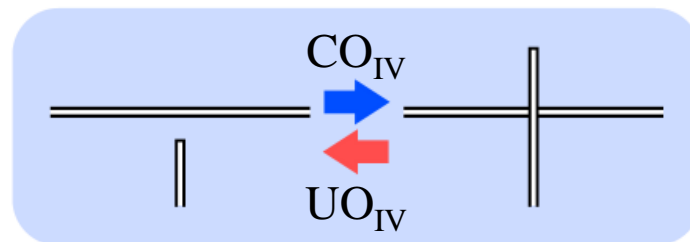
操作 I
(ライデマイスター移動 I)



操作 II
(ライデマイスター移動 II)



操作 III
(ライデマイスター移動 III)



操作 IV

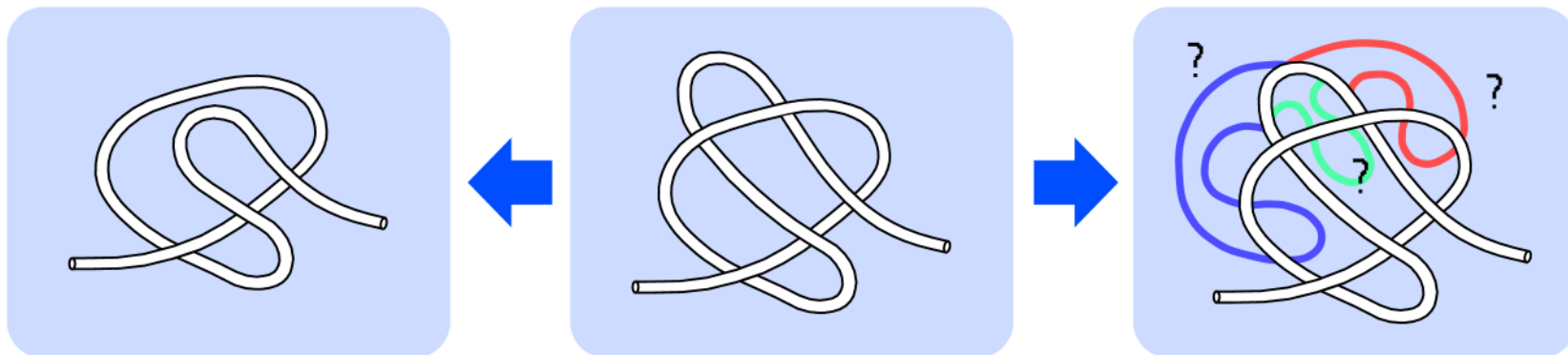
交差操作:

解離操作:

入替操作:



交差操作と解離操作



解離操作 II

交差操作 II

解離操作後の(交差数の少ない)状態数

≪ 交差操作後の(交差数の多い)状態数



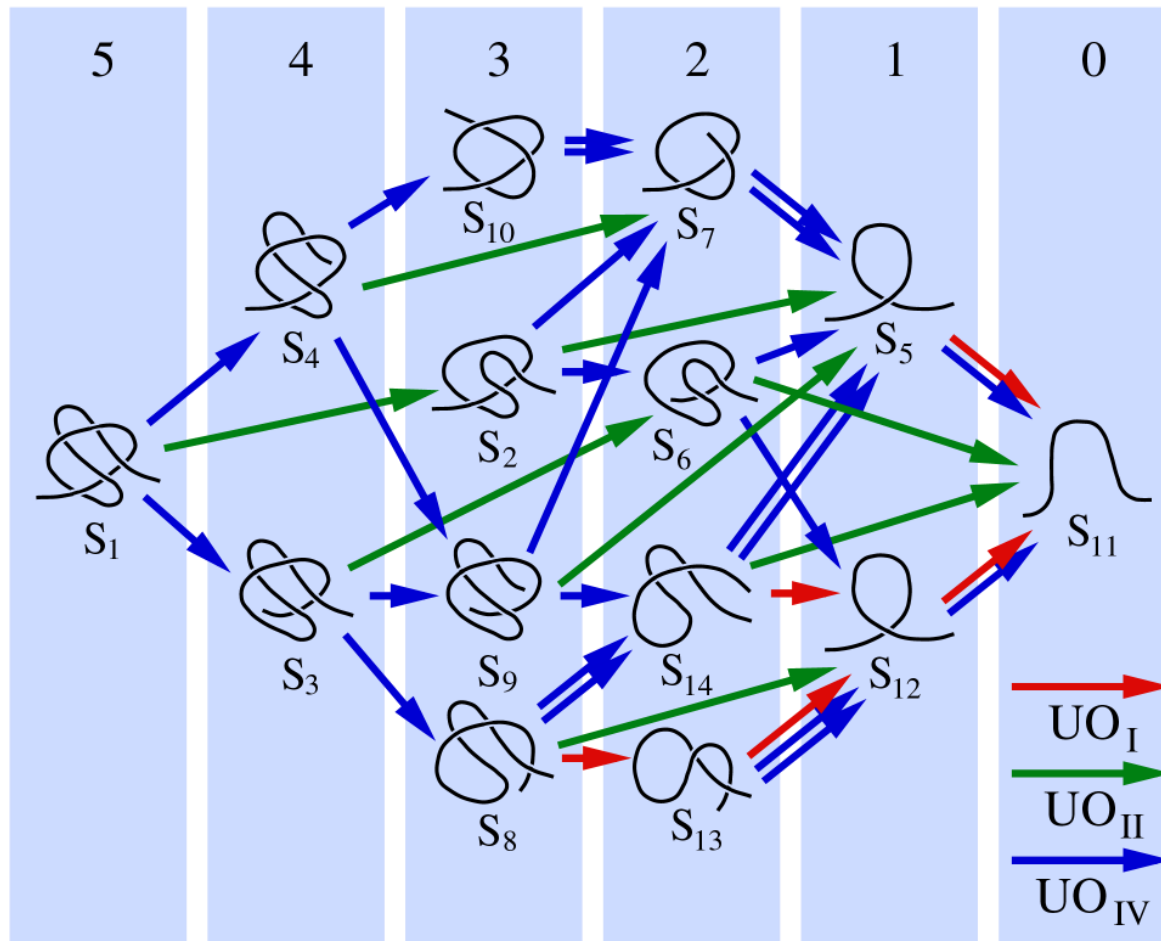
初期状態と目標状態が与えられた場合、交差数の多い状態から交差数の少ない状態へと、可能性のある状態遷移経路、

すなわちマニピュレーション過程を自動生成可能



マニピュレーション過程の生成例

number of crossings



生成されたグラフと計算時間

- 引き解け結び(交差数5)
 - ◆ 入替操作を含まない場合: 状態数14、操作数39、計算時間10ms以内
 - ◆ 入替操作を含む場合: 状態数21、操作数68、計算時間10ms
- 蝶結び(交差数11)
 - ◆ 入替操作を含まない場合: 状態数53、操作数153、計算時間15ms
 - ◆ 入替操作を含む場合: 状態数932、操作数4282、計算時間0.5s
- 梅結び(交差数54)
 - ◆ 入替操作を含まない場合: 状態数77796、操作数398841、計算時間6h10m
 - ◆ 入替操作を含む場合: (メモリ不足により計算不能)

※使用した計算機の仕様:

CPU: 833MHz Alpha 21264、メモリ: 1GB、OS: Tru64UNIX、コンパイラ: Compaq C Compiler V6.4、最適化オプション: -O4



動作計画① ～把持位置～

状態遷移経路は計算機により自動生成可能

→状態遷移を実現できるような把持点とその移動方向の決定が必要

把持位置:

- ターゲット交点

交差／解離操作によって生成／消去される交点

- ターゲット線分

ターゲット交点に挟まれる線分、あるいは端点とターゲット交点に挟まれる線分

解離操作／入替操作:ターゲット線分かそれに隣接する両線分を把持

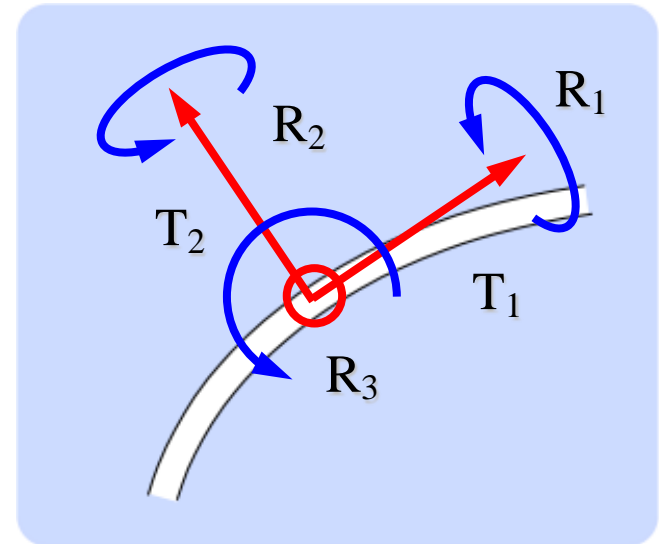
交差操作:ターゲット線分かターゲット交点を把持



動作計画② ～移動方向～

移動方向:

- 中心軸方向の並進: T_1
- 中心軸および射影軸に垂直な方向への並進: T_2
- 中心軸周りの回転: R_1
- 中心軸および射影軸に垂直な軸回りの回転: R_2
- 射影軸回りの回転: R_3



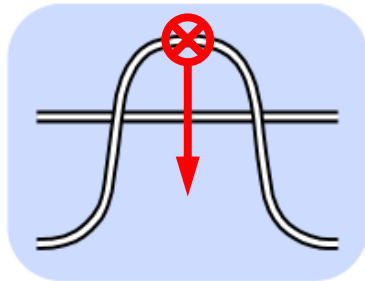
※射影軸方向の並進は交差状態を変化させないので、移動方向からは除外する



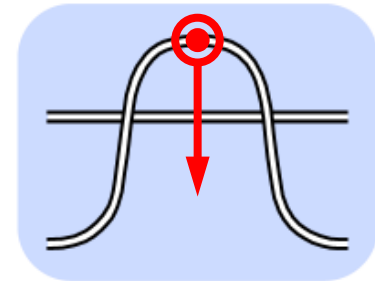
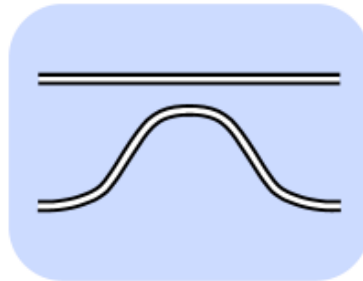
動作計画③ ～接近方向～

接近方向:

状態遷移を実現できるかどうかは、射影面に対するマニピュレータの接近方向に依存する



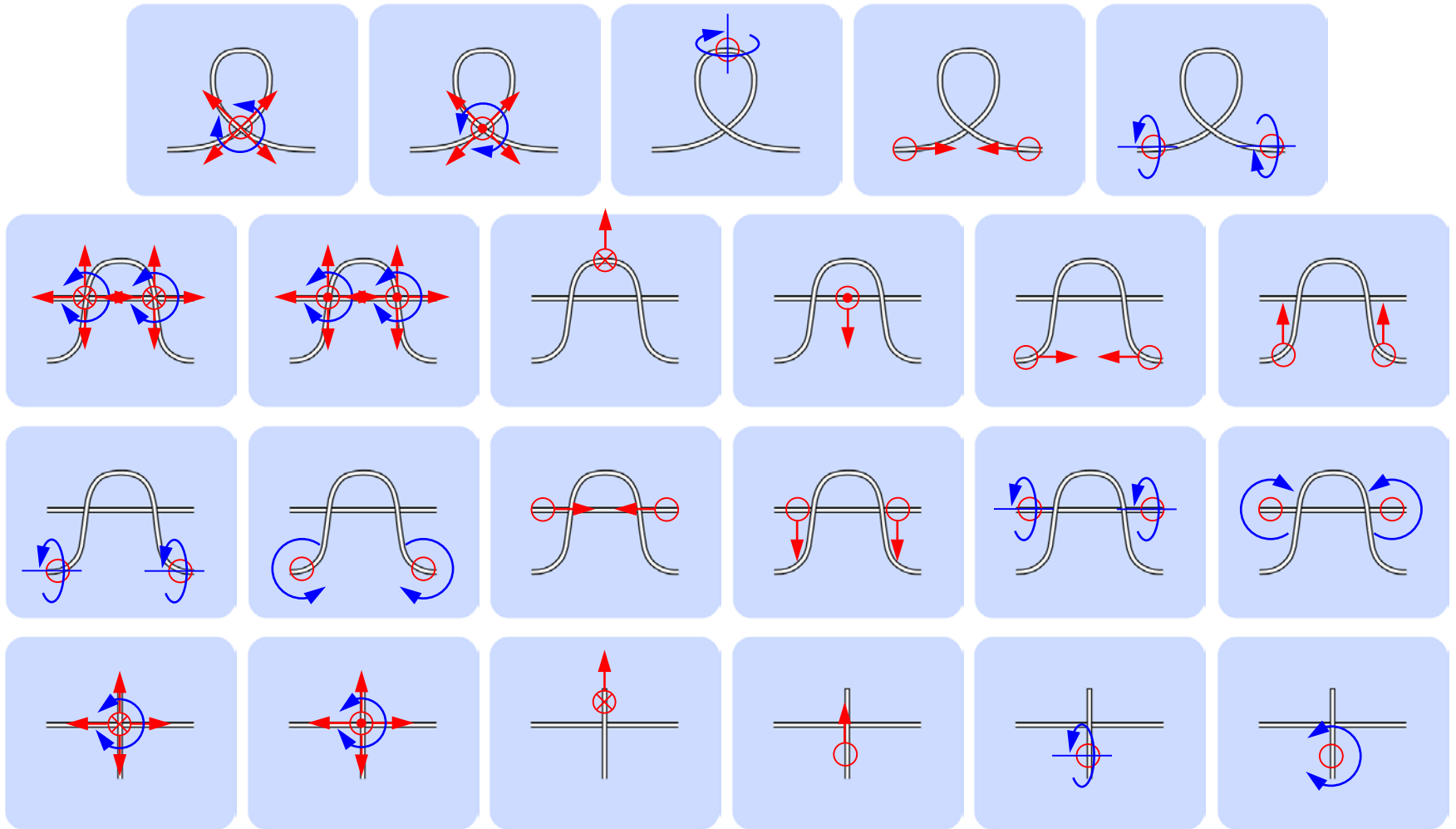
表側からの接近把持



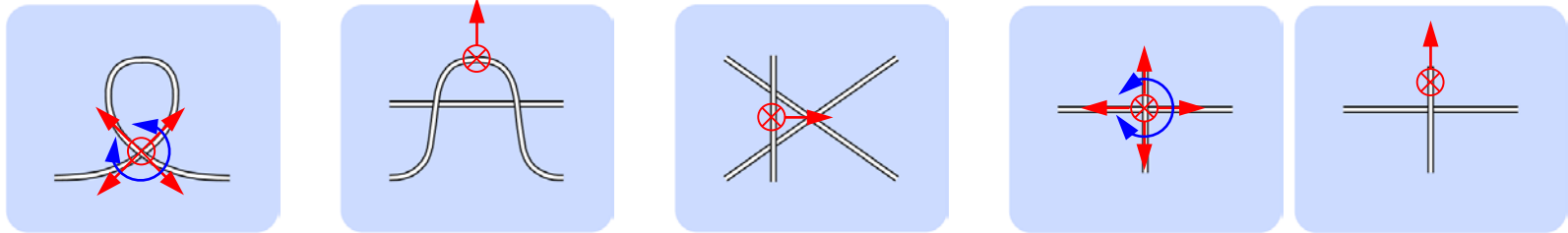
裏側からの接近把持

把持位置と移動方向、接近方向の適切な組み合わせにより、要求される状態遷移を実現できる

交差操作のための動作計画



単腕マニピュレータによる結び操作



- 表側からの接近によるターゲット上交点／線分の把持により実現可能
- 移動方向は T_1 、 T_2 、 R_3 →射影平面内運動



線状物体がテーブル上に置かれている
場合には、**単腕のSCARA型ロボット**
により、**任意の結び操作を実現可能**



実用的な自動化により、生産における複
雑な柔軟物体操作が可能となる





マニピュレーション計画

初期交差状態と目標交差状態が与えられれば、可能性のあるマニピュレーション過程を計算機により自動生成可能

(過程の表現は線状物体の物理的／幾何学的特性に依存しない)

各状態遷移に必要な動作:

把持位置、移動方向、接近方向の適切な組み合わせとして用意



定性的なマニピュレーション計画の候補を計算機により生成可能

