

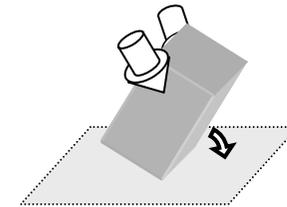
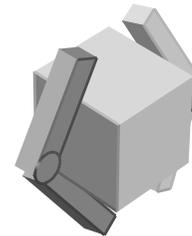
# 多指ハンドのための剛体モデル による接触力計算の効率化

---

○前田 雄介, 榎田 諭, 後藤 純伸  
(横国大)

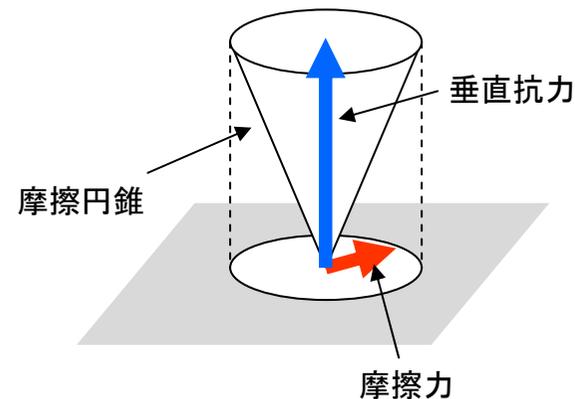
# 研究背景

- 接触力の解析：  
多指ハンドによる物体操作をはじめ、  
ロボット工学のさまざまな分野で必要
  - 把持
  - マニピュレーション
  - フィクスチャリング
  - 歩行
- 剛体モデル＋クーロン摩擦
  - 広く使用されている



# クーロン摩擦

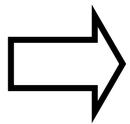
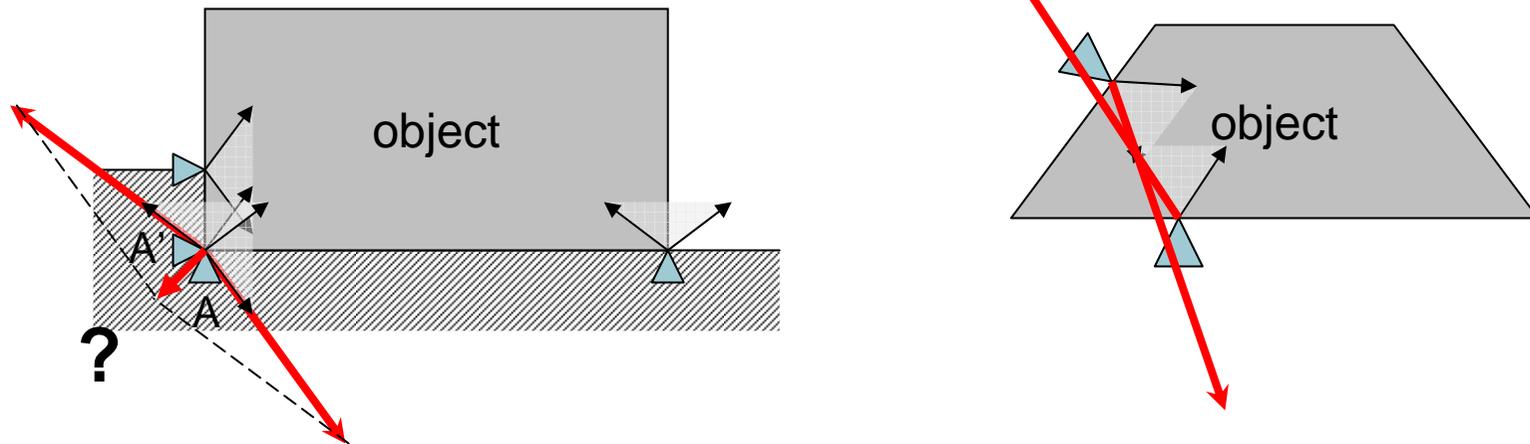
- 摩擦係数によって摩擦力が制約される
  - 摩擦円錐
  - 局所的な制約



- 摩擦円錐に入っている力はすべて発生可能？

# 摩擦力の組み合わせ

(例)

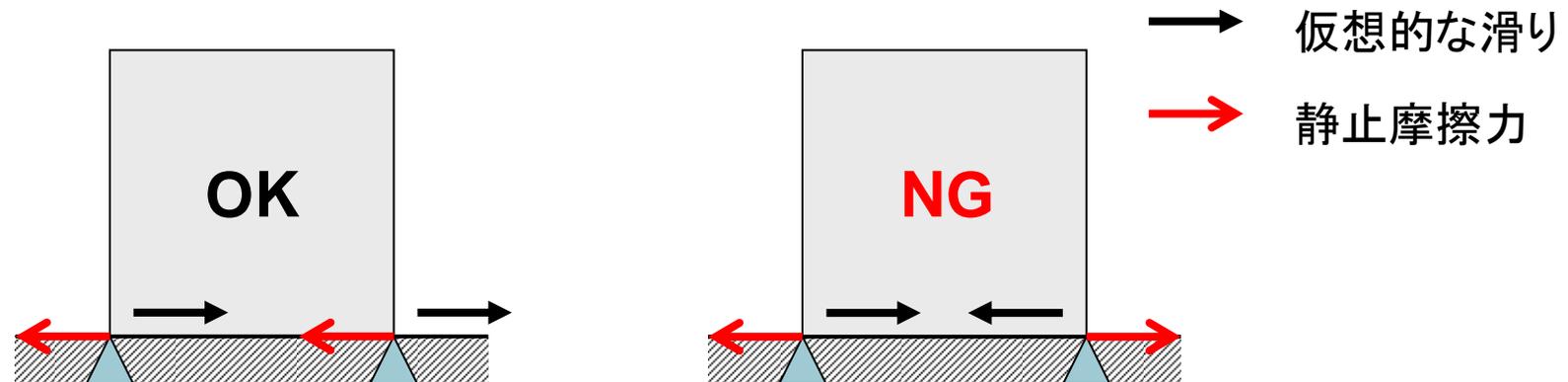


局所的に発生可能な接触力の  
任意の組み合わせが発生可能なわけではない

# 摩擦力の組み合わせに対する制約

[小俣 95, 01]

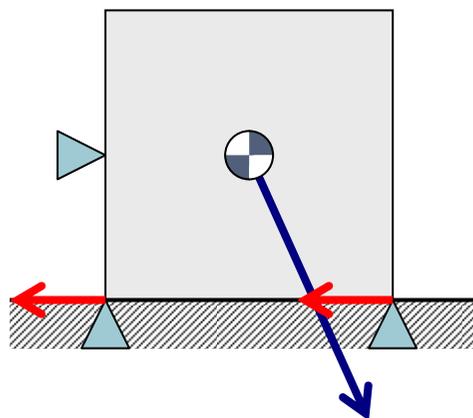
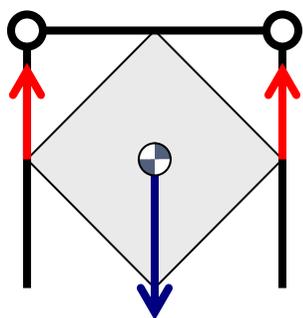
- 静止摩擦力は物体が滑ろうとするのを妨げようとする方向にのみ働く
- したがって、起こりえない滑りに対応する方向の摩擦力は発生しない



摩擦力の組み合わせに対する大域的な制約

# 摩擦力の組み合わせに対する制約の改良

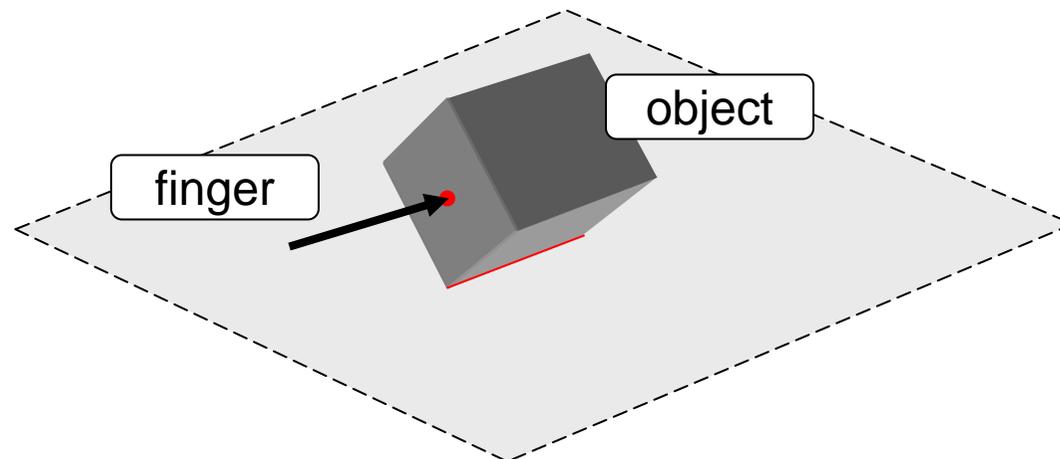
- [小俣 01] の方法では不合理な結果が
  - 実際に起こりうる解が排除されてしまう



- 改良 [Maeda 07] により, より妥当な結果が求まる

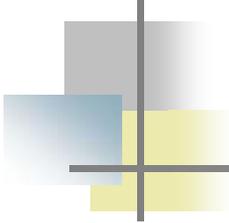
# 摩擦力の組み合わせに拘束を課さない と正しく評価できない例

- 摩擦力の組み合わせに制約を課しないと、外乱に対するロバスト性があると判断してしまう



# 摩擦力に対する大域的制約の まとめ

	制約条件の性質	計算量
制約なし	甘い (起こりえない摩擦力が 許容されてしまう)	少
[小俣 01] の 制約	おおむね辛い (起こりうる摩擦力が 排除されてしまう)	中
[Maeda 07] の 制約	おおむね正確	大



# 本発表の目的

---

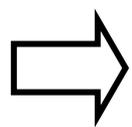
- 剛体モデルによる接触力計算の効率化のために,
  - [Maeda 07] の手法を使わないですむ条件を調べる
  - [Maeda 07] の手法の計算を簡略化できる条件を調べる

# [小俣 01] における摩擦力の制約の求め方

- 仮想的な滑りの制約から考える

$$\begin{matrix} \text{接触点に関する} \\ \text{wrench 行列} \\ \mathbf{W}^T \end{matrix} \begin{matrix} \text{ロボットの} \\ \text{ヤコビ行列} \\ \mathbf{J} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ロボットの(仮想)} \\ \text{関節角速度} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ -\dot{\theta} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{対象物の(仮想)} \\ \text{速度・角速度} \\ \mathbf{T}\dot{\mathbf{Y}} \end{matrix} \begin{matrix} \text{接触点の} \\ \text{(仮想)} \\ \text{滑り速度} \\ \text{接触点の} \\ \text{接線方向を表す行列} \end{matrix}$$

- この制約条件を満たす  $\dot{\mathbf{Y}}$  だけが起こりうる仮想滑り



$\dot{\mathbf{Y}}$  のとりうる範囲を求めると、その反対方向が発生可能な摩擦力の範囲

# 改良された制約条件

## [前田 04, Maeda 07]

- 制約条件の緩和: 接触点の部分集合に対して, 滑りの制約を考える

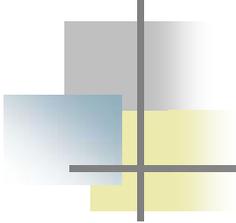
$$\textcircled{B} \begin{bmatrix} W^T & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ -\dot{\theta} \end{bmatrix} = T\dot{Y}$$

$B$ : 着目する接触点を示す選択行列

- 選択された接触点は, 滑りの制約を満たさなければならない
- 選択されていない接触点は, 滑りの制約を満たさなくて良い(その代わりに, 摩擦力は発生できない)

$B$  を単位行列とすると:[小俣 01] と同じ解が得られる

それ以外: 他の新しい解が得られる

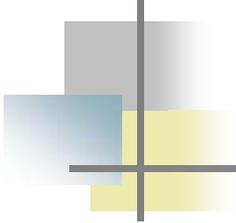


## [Maeda 07] の手法の問題点

---

- 接触点の部分集合をすべて列挙して、それぞれについて計算
  - 組み合わせ計算が必要
  - 計算量が接触点数について指数的に増大

⇒ 計算量の低減が求められる



## 「不完全な接触」[張 96] とその拡張

- 関節速度を接触点速度に変換するヤコビ行列がフルランクにならない接触点
  - 自由度が足りない接触点
  - [張 96] では指上の接触点が一点しかない場合のみを扱っていたので、接触点が複数ある場合に拡張して考える

「不完全でない接触」: 他の接触点の並進速度に影響することなく任意の並進速度を発生可能な接触点

「不完全な接触」: そうでない接触点

# [Maeda 07] の手法を使わないです む条件

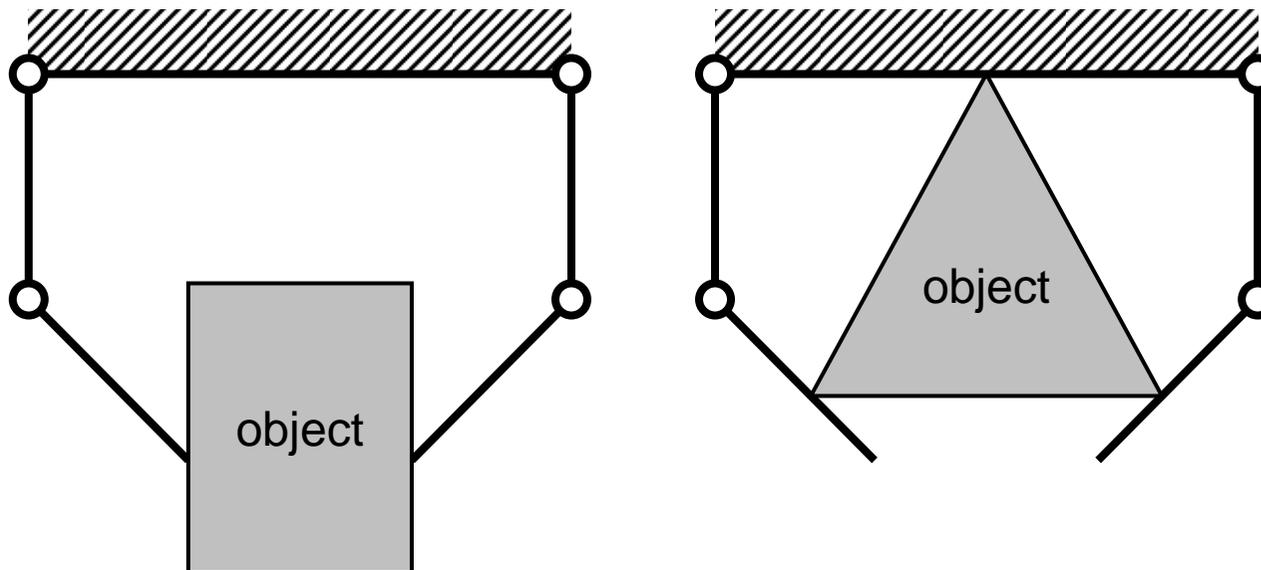
- 仮想滑りの制約から摩擦力の制約が導かれる
- 仮想滑りに全く制約がなければ, 摩擦力の制約もない

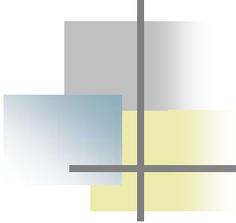
$$\text{Im} \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T & \mathbf{J} \end{bmatrix} \subseteq \text{Im} \mathbf{T}$$

であれば, 制約を考えなくてよい  
(摩擦円錐内の任意の力を出せるとしてよい)

# [Maeda 07] の手法を使わないです む例

- 全接触点が不完全でない場合
  - 指先把持ならば多くの場合成立  
(ただし接触点は点接触)
- 不完全な接触が一点あってもよい



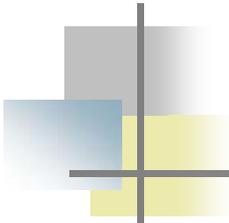


## [Maeda 07] の計算の簡略化

- 仮想滑りの制約から摩擦力の制約が導かれる

$$B \begin{bmatrix} W^T & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ -\dot{\theta} \end{bmatrix} = T\dot{Y}$$

- 選択行列  $B$  を変えても実現可能な仮想滑り  $\dot{Y}$  が増えない場合は, その組み合わせを無視できる

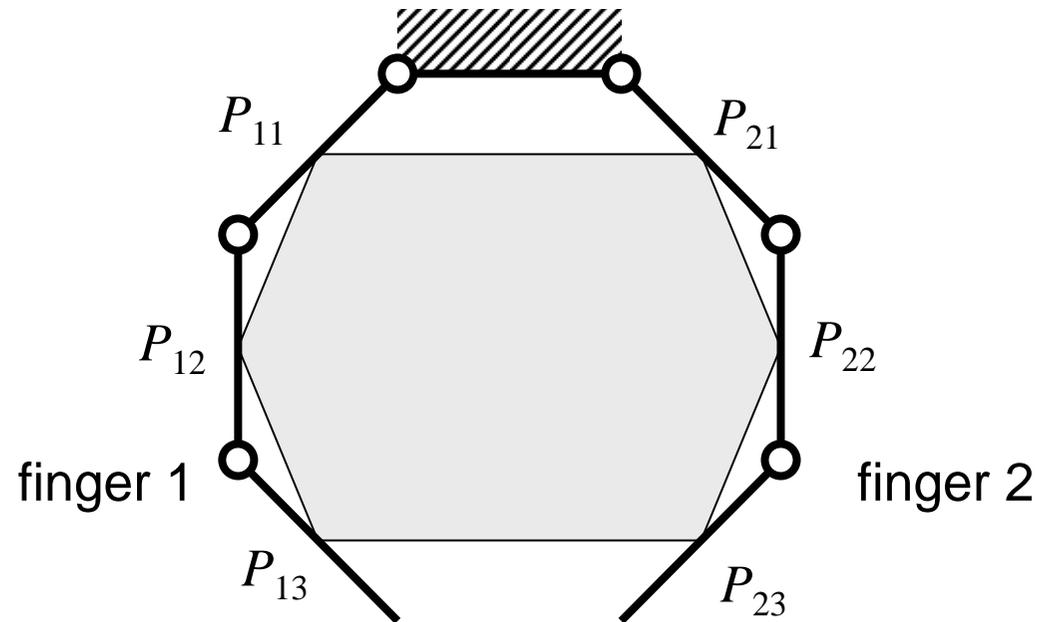


## 計算簡略化の具体的条件

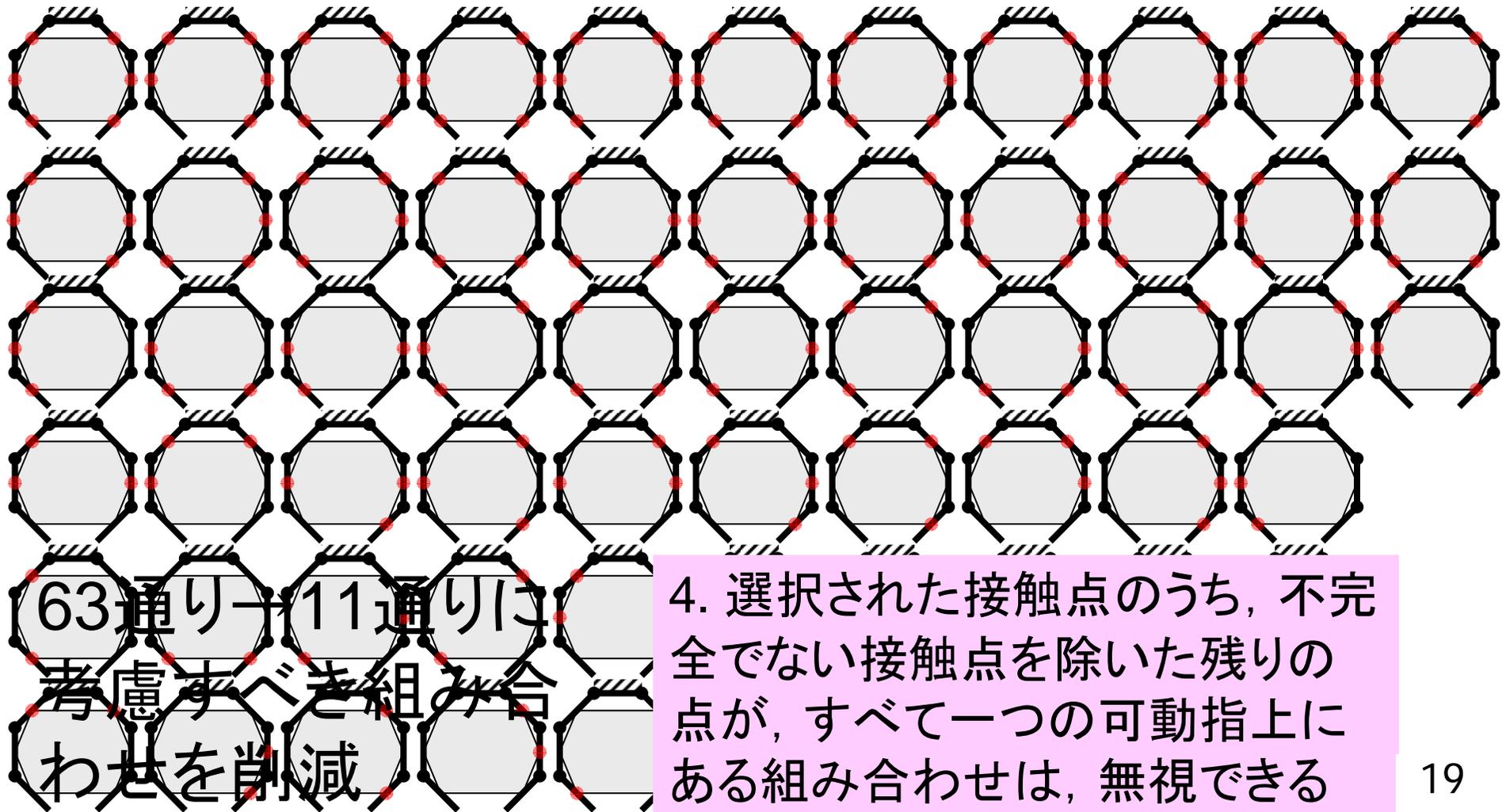
特異的なケースを除くと、

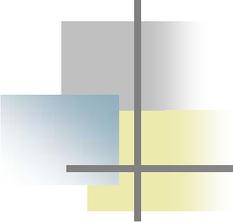
1. 先端リンク上の接触点が一点も選択されていない指がある組み合わせは、無視できる。 [前田 06]
2. 選択されていない接触点の中に不完全でない接触点がある組み合わせは、無視できる。
3. 選択された接触点のうち不完全な接触が高々1つである組み合わせは、無視できる。
4. 選択された接触点のうち、不完全でない接触点を除いた残りの点が、すべて一つの可動指上にある組み合わせは、無視できる。

# 計算削減の例(二次元の場合)



# 考慮すべき組み合わせ





# まとめ

---

- 剛体モデルによる接触力計算の効率化のために,
  - 計算量の多い [Maeda 07] の手法を使わないですむ条件を求めた
  - [Maeda 07] の手法において考慮すべき組み合わせを削減できる条件を求めた
- 今後の展望
  - さらなる計算量の低減
  - アルゴリズムの実装
  - 把持計画／マニピュレーション計画への応用 [小田 08]