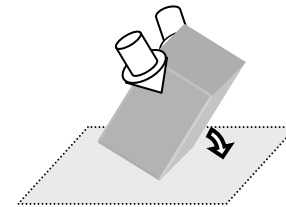
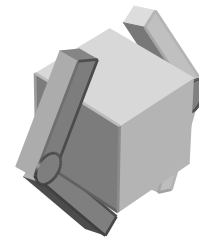


パワーグラスプを含む
ロボットマニピュレーションにおける
接触力の解析
—計算量削減へのアプローチ—

前田 雄介, 小田 浩太郎, 榎田 諭
(横国大)

研究背景

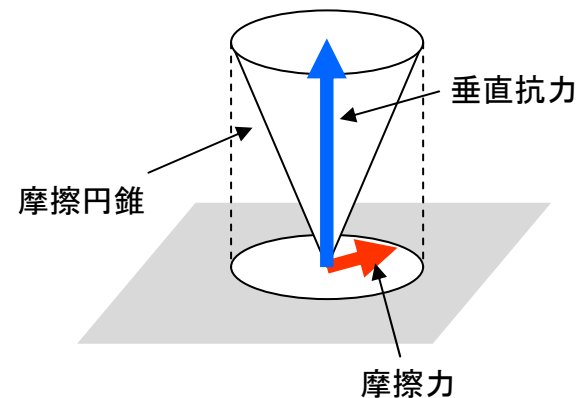
- 接触力の解析：
ロボット工学のさまざまな分野で必要
 - 把持
 - マニピュレーション
 - フィクスチャリング
 - 歩行
- 剛体モデル＋クーロン摩擦
 - 広く使用されている



クーロン摩擦

- 摩擦係数によって摩擦力が制約される

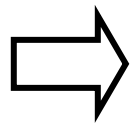
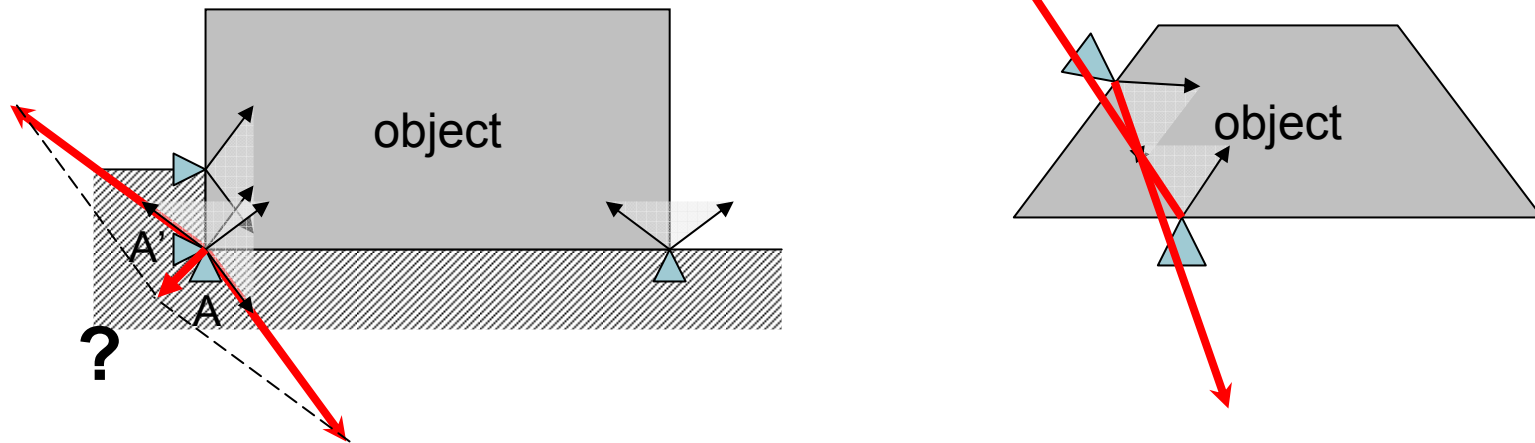
- 摩擦円錐
- 局所的な制約



- 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)

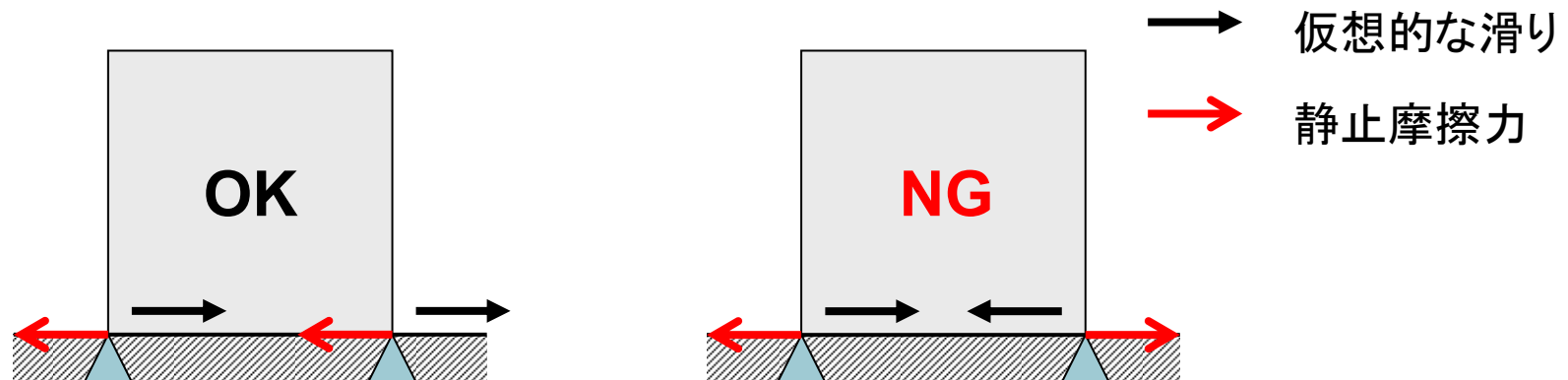


局所的に発生可能な接触力の
任意の組み合わせが発生可能なわけではない

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

摩擦力の制約の求め方 [小俣 01]

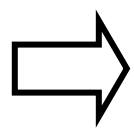
- 仮想的な滑りを考える

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

接触点の(仮想)滑り速度

接触点の接線方向を表す行列

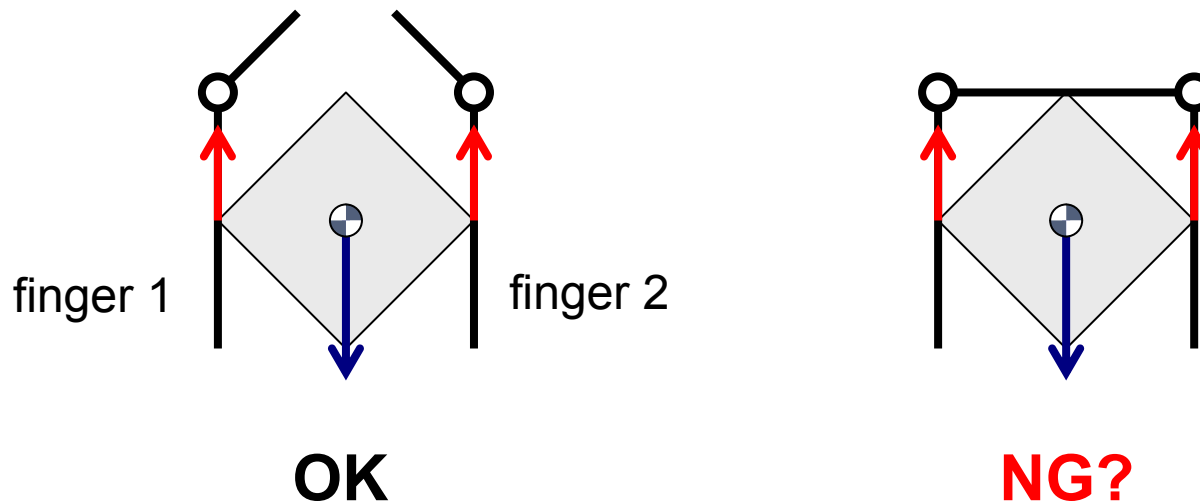
- この制約条件を満たす $\dot{\mathbf{Y}}$ だけが起こりうる仮想滑り



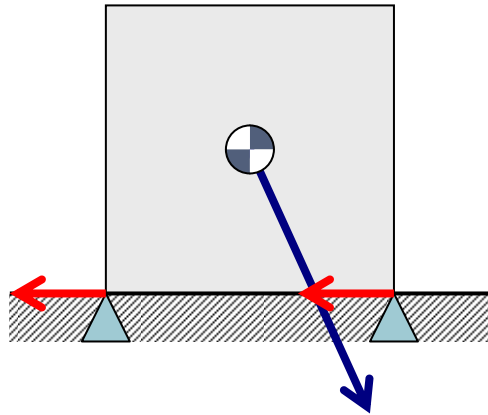
$\dot{\mathbf{Y}}$ のとりうる範囲を求めると、その反対方向が発生可能な摩擦力の範囲

接触力のパラドックス (1)

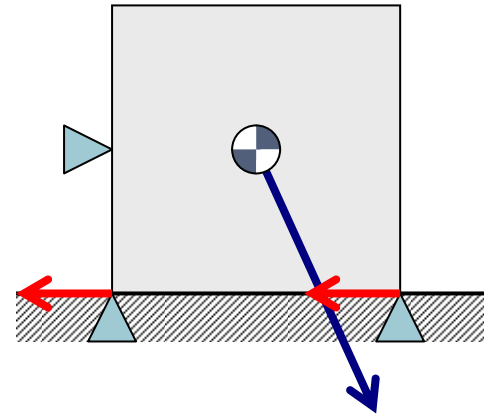
- 接触点が増えると、かえって発生可能な接触力が減る場合がある



接触力のパラドックス (2)



OK



NG?



パラドックスの原因

- [小俣 01] の問題点：
「仮想」滑りに対して、実際の滑りの制約条件を適用
 - 仮想滑りを排除し過ぎている
 - 結果として、発生しうる摩擦まで排除している



仮想滑りのための、より緩和された制約条件を求める必要がある

新しい制約条件

[前田 04, 小田 06]

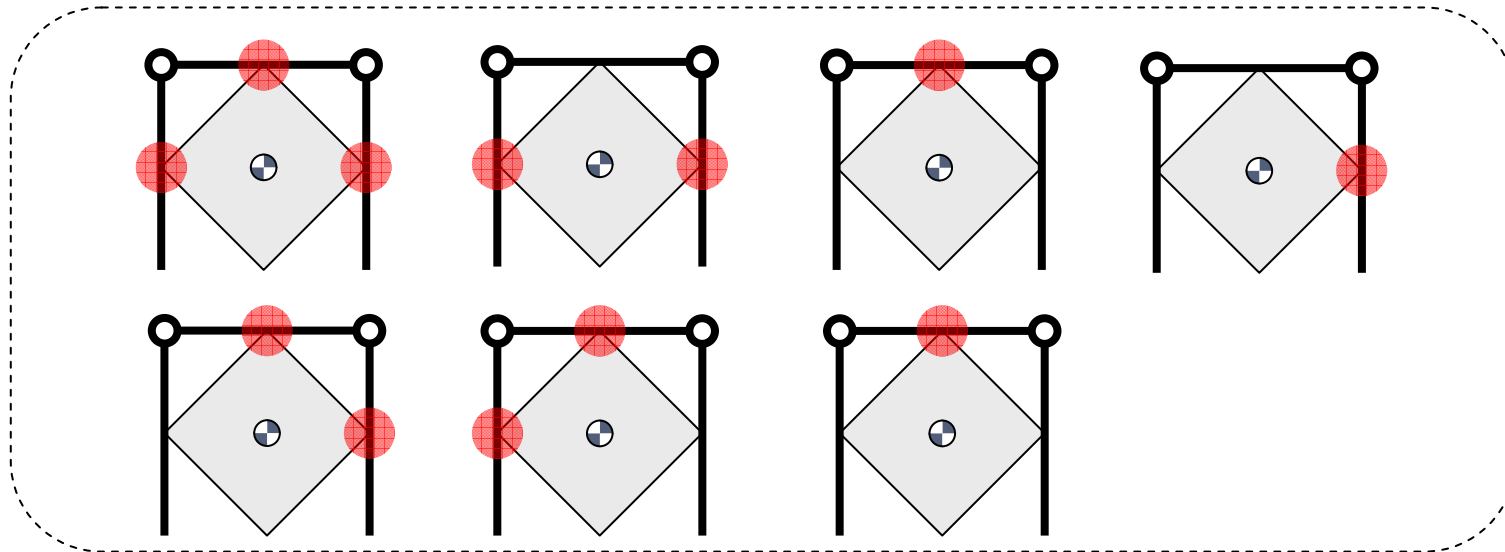
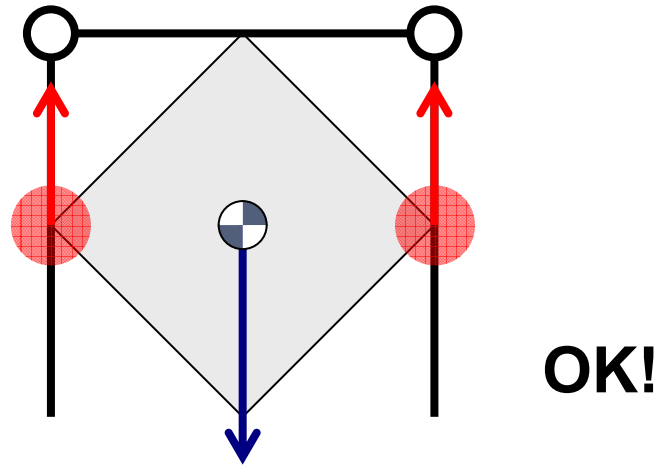
- 制約条件の緩和: 接触点の**部分集合**に対して, 滑りの制約を考える

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

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)
- すべての部分集合の組み合わせに対して接触力を求め, その**和集合**を発生可能な接触力の集合とする

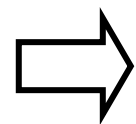
新しい制約条件の適用例





新しい制約条件の問題点

- 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




計算量の低減が必要



本発表の目的

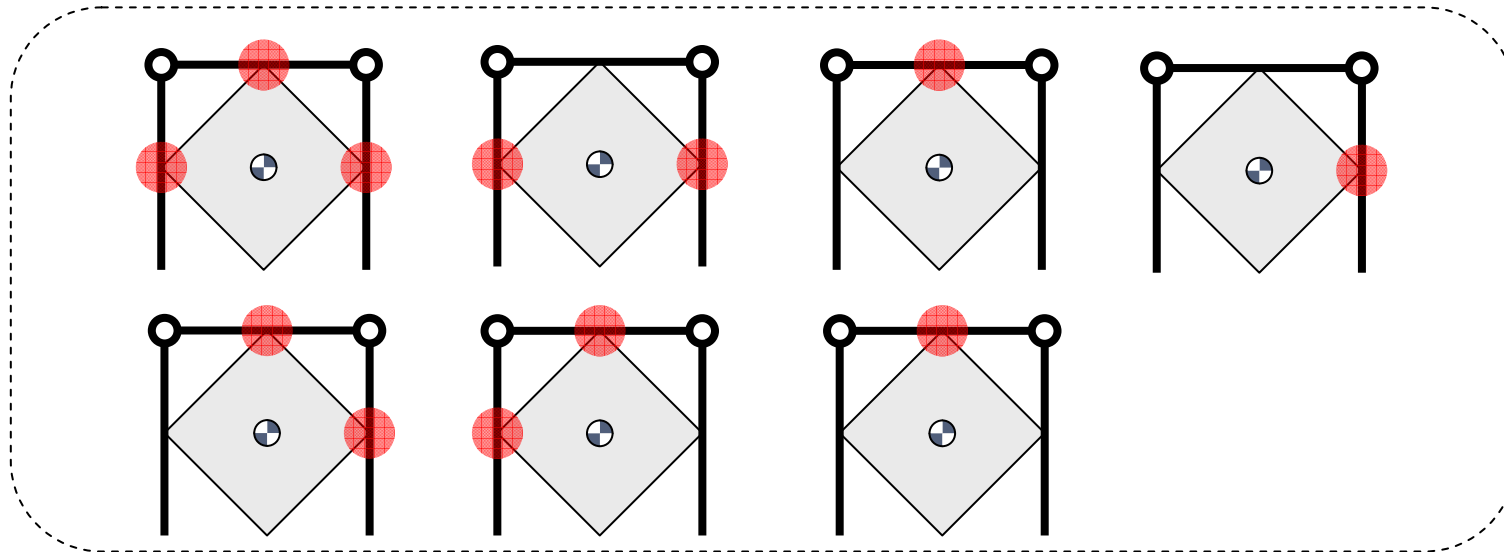
- 剛体モデル＋クーロン摩擦下における、仮想滑りの制約を考慮した接触力の計算法について、計算量を削減するための手法を示す
 - アプローチ：不必要な組み合わせを除外



組み合わせを除外するための 一つの十分条件

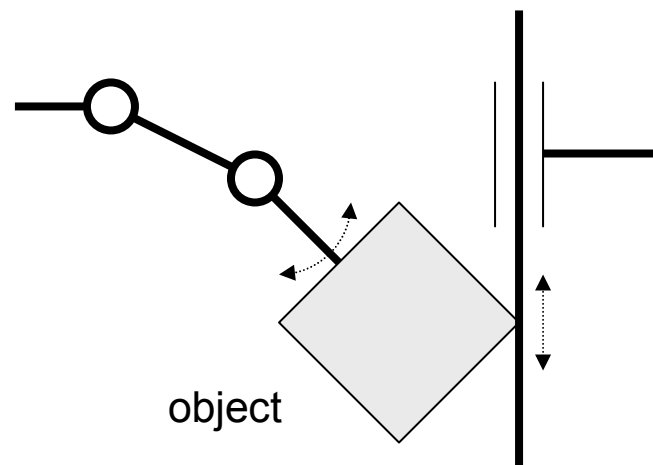
- 指の先端リンクに接触点が一点しかなく、ある行列 Z が正則であること
- この場合、その接触点を選択しない組み合わせはすべて計算から除外できる
 - 証明: 略
 - 方針: その接触点を選択から外して滑りの制約条件を緩めても、新たな仮想滑りが可能にならないことを示す.
 - Z はほとんどの場合正則

計算量低減の例



計算量を低減できない特殊な場合

- 行列 Z が正則でない場合：
 - 先端の関節の動きによる接触点の運動方向が、接触点の接平面方向になる場合





まとめ

- 剛体モデル・クーロン摩擦下での接触力について、従来方法より計算量を低減するための一つの十分条件を示した
- 今後の展望：
 - 種々の問題への応用
 - さらなる計算量の低減
 - 滑り成分の符号を使わない定式化