

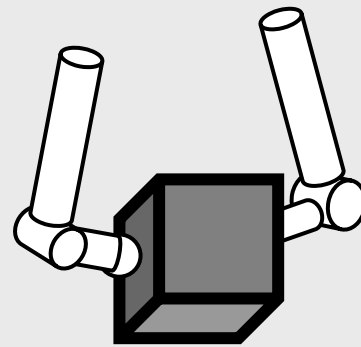
# 把持動作とグラスプレス・マニピュレーションに 適用可能な関節トルク最適化手法

榎田 諭, 中村 志伸, 前田 雄介  
(横浜国立大学)

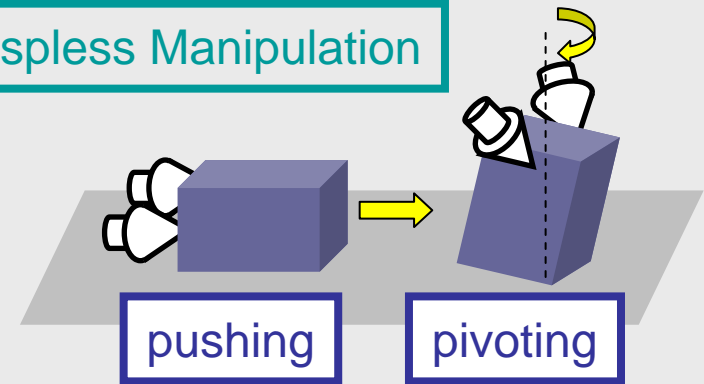
- |              |            |
|--------------|------------|
| 1. 序論        | (pp.2-4)   |
| 2. 力学モデル     | (pp.5-8)   |
| 3. 最適化手法     | (pp.9-12)  |
| 4. 計算例       | (pp.13-14) |
| 5. 結論, 今後の展望 | (p.15)     |

第25回日本ロボット学会学術講演会  
千葉工業大学  
2007年9月13日～15日

# 1. 序論

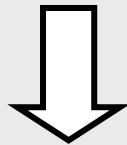


Graspless Manipulation



## 器用なマニピュレーション

□ 把持 / 非把持操作を柔軟に組み合わせる

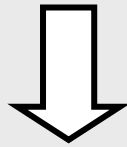


把持操作およびグラスプレス・マニピュレーションにおける関節トルクの最適化

従来研究

➤ パワーグラスプの最適関節トルク計算法 [小俣2002]

静止摩擦力の制約条件を考慮した不静定接触力の解析  
[小俣2001]に基づいた関節トルク最適化手法[小俣2002]



制約条件が厳しすぎるために不静定接触力が求まらない  
場合が存在した



緩和した制約条件を導出し, より正確に不静定接触力を求  
めた[小田2006][前田2006]

# 研究目的

## 新しい静止摩擦力の制約条件を用いた 最適関節トルク計算法の構築

– 把持／非把持操作の両方に適用可能

### • Approach

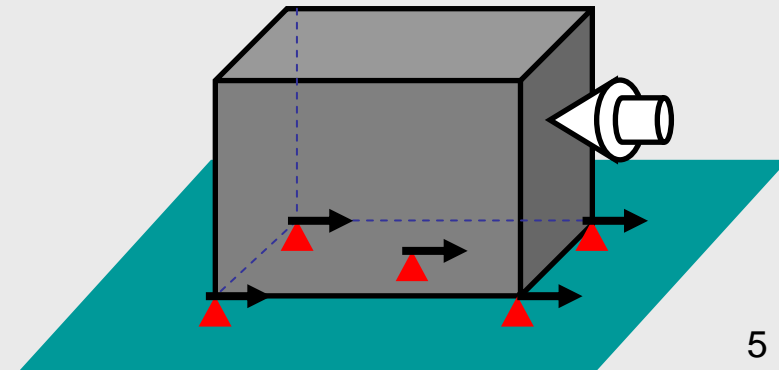
- 小俣らの計算法に新しい制約条件を適用
- 最適化における評価関数を修正

## 2. 力学モデル

### ・ 仮定

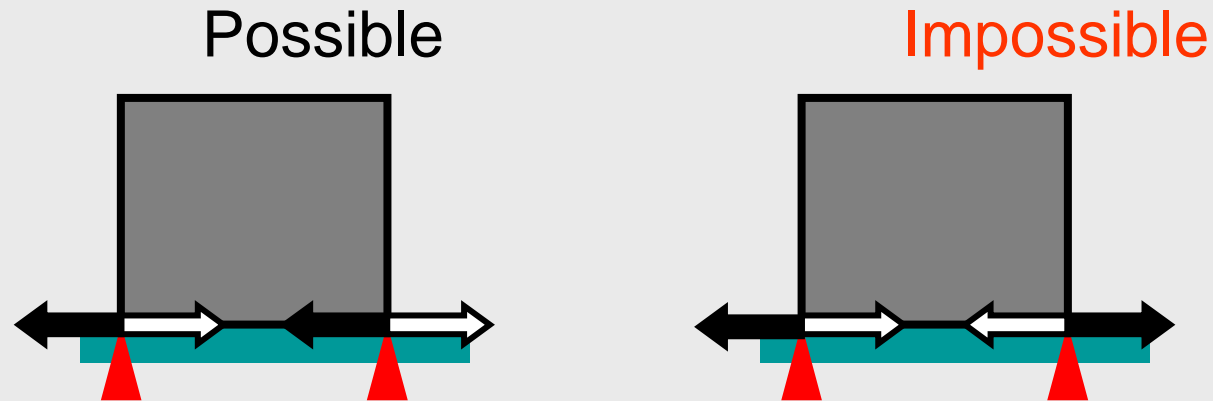
- 対象物, ロボット, 環境はすべて剛体
- すべての接触を有限の点接触群で近似
- 各接触点ではクーロン摩擦が発生
- 各摩擦円錐を凸多角錐で近似
- すべての非駆動リンク, ハンドの手のひらおよび環境との接触は一番目の指の接触点と仮定

接触力は不静定となる



# 静止摩擦力の制約条件 [小俣2001, 2002]

静止摩擦力は仮想滑りを妨げる方向に働く

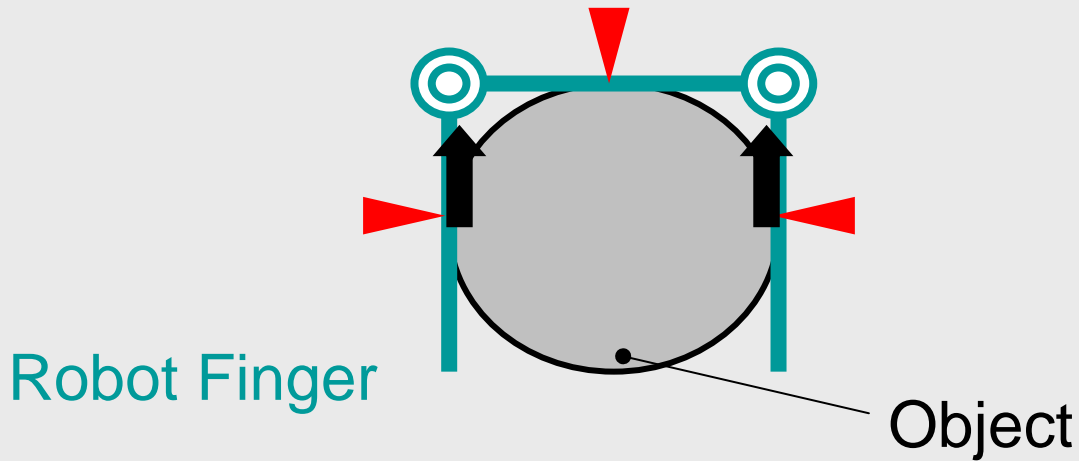


⇒ : Virtual Sliding      → : Static Frictional Force

起こりえない仮想滑りの組み合わせを除外

⇒ 発生可能な静止摩擦力を計算

# 不合理な結果



小俣らの制約条件によって、あらゆる仮想滑りの組み合わせが除外されてしまう

# 改良した仮想滑りの制約条件 [Maeda and Makita 2006]

仮想滑りの制約条件を選択された接触点についてのみ適用する

The diagram illustrates the equation for the modified virtual sliding constraint. It shows the following components and their labels:

- Selection Matrix** ( $B$ ): A red circle around the matrix  $B$ .
- Wrench Matrix** ( $W^T$ ): A blue circle around the matrix  $W^T$ .
- Jacobian Matrix** ( $J$ ): A blue circle around the matrix  $J$ .
- Virtual Object Velocity** ( $V$ ): A blue circle around the vector  $V$ .
- Virtual joint Velocity** ( $\dot{\theta}$ ): A blue circle around the vector  $\dot{\theta}$ .
- Tangent Vectors** ( $T$ ): A blue circle around the matrix  $T$ .
- Virtual Sliding Velocity** ( $\dot{Y}$ ): A blue circle around the vector  $\dot{Y}$ .

The equation is represented as:

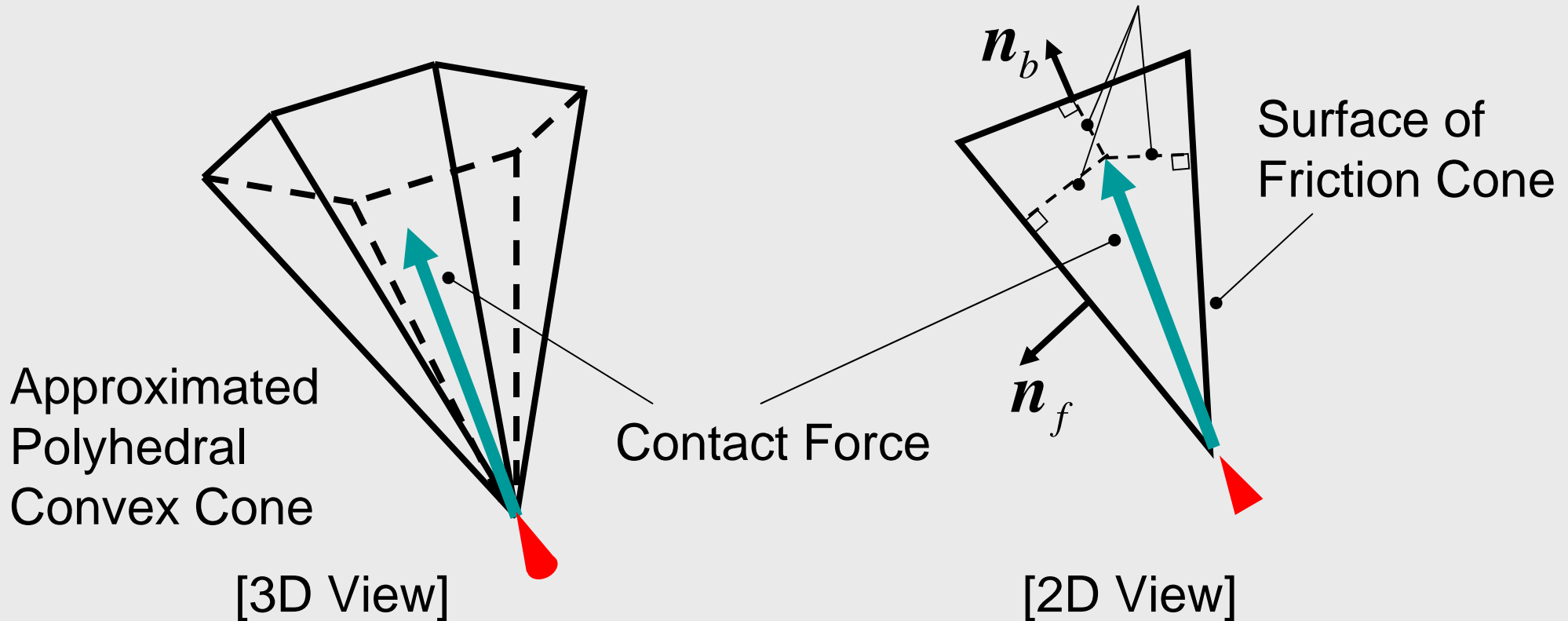
$$B W^T J \begin{bmatrix} V \\ -\dot{\theta} \end{bmatrix} = T \dot{Y}$$

不静定接触力を正確に見積もって、最適関節トルクを計算する



# 3. 関節トルク最適化手法

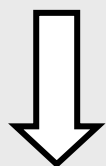
不静定接触力と摩擦円錐との距離(マージン)を考える



マージンを最大にして, 強固な把持(拘束)を行う

# 評価関数の修正

不静定接触力と摩擦力との間の最小マージンを最大化する  
[小俣2002]



前提：不静定接触力が常に有界になる

【新しい静止摩擦力の制約条件の適用】

不静定接触力の有界性が成り立たない場合が少なくない  
(最小マージンが常に0になる)



【評価関数の修正】

最良の不静定接触力と摩擦円錐との最小マージンを最大化

不静定接触力がマージンを最大化する最適値を取ると仮定して最小マージンを最大化(アルゴリズム1)

max  $e$

subject to

$$A^T Ck = \omega$$

$$T^T (I_3 - D - B) Ck = \mathbf{0}$$

$$ST^T Ck \leq \mathbf{0}$$

$$e\mathbf{1} \leq N^T Ck \leq a\mathbf{1} - e\mathbf{1}$$

$$(I - D^*)(e\mathbf{1} - H^T Ck) \leq \mathbf{0}$$

$$\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$$

$$k \geq \mathbf{0}$$

力のつりあい

仮想滑りの発生しない接触点  
では摩擦力も発生しない

静止摩擦力の制約条件

不静定接触力と摩擦円錐と  
の間のマージン

関節トルクの制限

ロバストな拘束を実現するために、関節トルクが大きくなる...

## 適当なマージン $e_0$ を実現する最小の関節トルクを求める (アルゴリズム2)

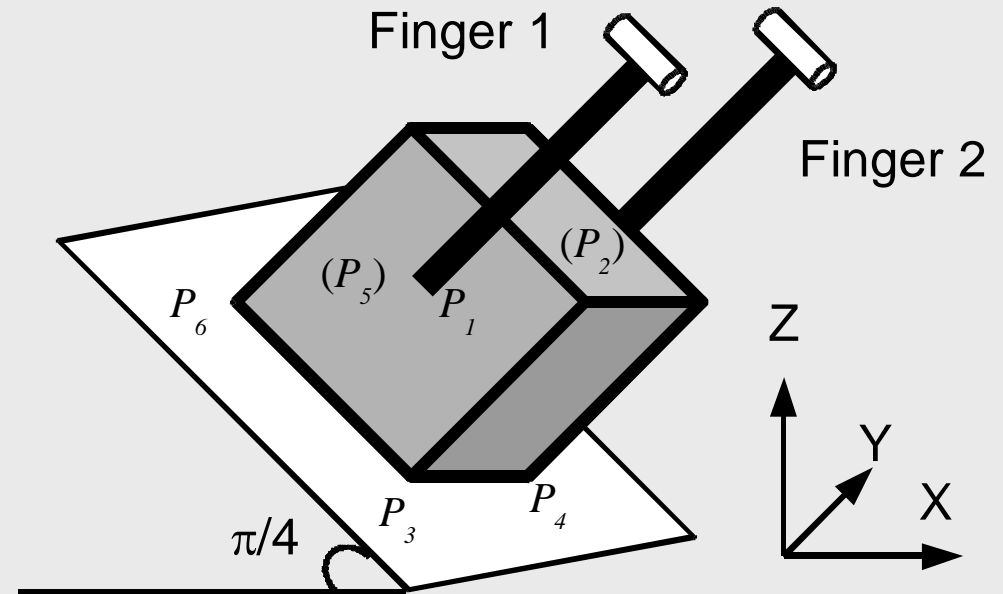
$$\begin{array}{l} \min \tau_{\max} \\ \text{subject to } \left\{ \begin{array}{l} A^T Ck = \omega \\ T^T (I_3 - B) Ck = \mathbf{0} \\ ST^T Ck \leq \mathbf{0} \\ e_0 \mathbf{1} \leq N^T Ck \leq a \mathbf{1} - e_0 \mathbf{1} \\ (I - D^*)(e_0 \mathbf{1} - H^T Ck) \leq \mathbf{0} \\ -\tau_{\max} \mathbf{1} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \tau_{\max} \mathbf{1} \\ k \geq \mathbf{0} \end{array} \right. \end{array}$$

# 4. 計算例

準静的なガラスプレス・マニピュレーション(3次元)の例

## • 仮定

- 外力  $\omega_{\text{ext}} = [0.0 \quad -1.0 \quad 0.0]^T$
- 摩擦係数: 0.5
- 摩擦円錐を凸8角錐で近似
- 原点は対象物の中心点
- 関節トルクの制限:  $-2.0 \leq \tau \leq 2.0$
- 摩擦円錐の高さ  $a = 50$



## アルゴリズム1 マージン $e$ の最大化

上方向に滑らせる

$$e = 0.66, \quad \tau = [2.00, -2.00]^T$$

下方向に滑らせる

$$e = 0.87, \quad \tau = [2.00, -2.00]^T$$

## アルゴリズム2 関節トルク $\tau$ の最小化

上方向に滑らせる

$$e_0 = 0.1 \text{ (const.)}, \quad \tau = [0.48, -0.48]^T$$

下方向に滑らせる

$$e_0 = 0.1 \text{ (const.)}, \quad \tau = [0.065, -0.065]^T$$

最適関節トルクを計算することができた

## 5. 結論

- ・ 関節トルク最適化手法を提案した
  - 把持操作とグラスプレス・マニピュレーションの両方に適用可能
  - 新しい静止摩擦力に関する制約条件を適用
  - 2通りの評価関数を用いた最適化が可能

## 今後の展望

- 計算時間の削減
- 他の評価関数を用いた最適化手法の構築