

グラスプレス・マニピュレーションにおける接触力の準静力学的解析

Quasi-static Analysis of Contact Forces in Graspless Manipulation

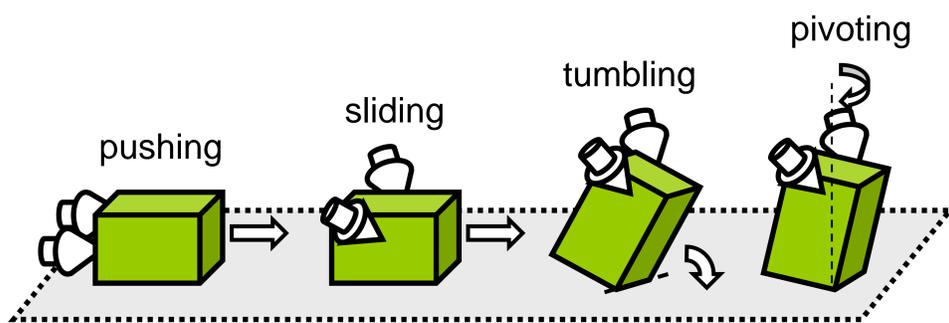
○ 正 榎田諭, 後藤純伸, 正 前田雄介
(横浜国立大学)

*Satoshi MAKITA,
Yoshinobu GOTO,
Yusuke MAEDA
(Yokohama National University)

Abstract

In quasi-static manipulation, such as graspless manipulation, contact forces are different according to the situation whether a manipulated object is stationary or moving. This paper presents quasi-static analysis of contact forces in graspless manipulation, as improvement of our previous study on robustness measure of graspless manipulation. Our previous analysis uses a modified constraint on static friction, which is originally derived by Omata et al. in static analysis for power grasps. However, when we adapt the constraint to quasi-statics, considering quasi-static motion of objects, particularly sliding contact points and kinetic friction, is not appropriate. Thus, we improve our quasi-static analysis method, and evaluate robustness of graspless manipulation more accurately than our previous work.

グラスプレス・マニピュレーション (Graspless manipulation)



操作状態によって、加わる接触力、外乱に対するロバスト性が異なる

- 対象物を完全には把持しないで操作する
- 環境との接触を有する(環境の支えを利用する)
- 不完全な拘束
- 準静的な操作(実際に滑っている接触点が存在する)
- 静止摩擦力と動摩擦力が混在

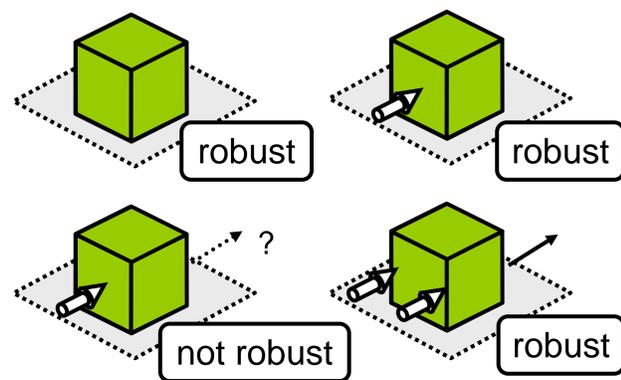
研究目的

[Maeda 2006]で取り組んだ力学解析上の問題点を改良する

- グラスプレス・マニピュレーション中の対象物に加わる接触力の解析
- 静止摩擦力に関する制約条件[小俣1995]を準静力学に適用

準静的な操作中の対象物における「実際に滑っている接触点」と「動摩擦力」を適切に扱う([Maeda 2006]では不十分であった問題)

- 操作中の対象物の外乱に対するロバスト性の評価[Maeda 2006]を改良



摩擦力を過大に見積もる場合があった

力学モデルにおける仮定

接触力モデルの仮定

- 対象物, ロボットの指, 環境は全て剛体
- 摩擦あり点接触
- クーロン摩擦
- 摩擦円錐を凸多角錐で近似(行列 C で表現)

ロボット指の制御方式における仮定

- 位置制御された指は動かない環境と等価
- 力制御された指はトルク一定で制御
- 位置と力のハイブリッド制御された指は指先のみで接触する直動関節と等価

静止摩擦力の制約条件

静止摩擦力 = 滑ろうとする仮想的な運動(仮想滑り)を妨げる力

仮想滑りの制約条件(=静止摩擦力の制約条件)

$$B \left(\underline{W}^T \underline{V} - \underline{J} \dot{\theta} \right) = \underline{TS}q, \quad q > 0$$

対象物の仮想運動

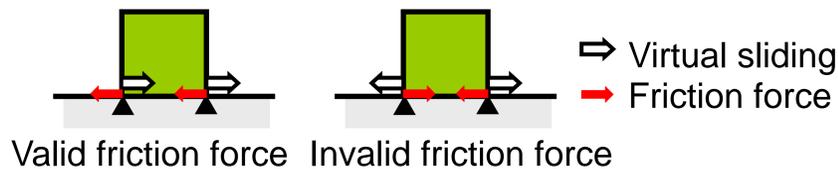
仮想滑り

ロボット指の関節の仮想運動

S : 仮想滑りの方向を表す行列

B : 仮想滑りが起こる接触点を部分的に選択する行列

行列 B を導入しない場合, 右図のような実際には起こりうる仮想滑りを除外してしまう



動摩擦力が起こる(実際に滑っている)接触点

- 行列 D で選択される
- 仮想滑りは起こりうる [Maeda 2006]からの改良点(接触点が離脱, めりこみしない, 行列 B で選択される)
- 静止摩擦力は発生しない
- 動摩擦力の方向 = 実際の滑りと逆向き

$$\begin{cases} \underline{T}^T \underline{DC}k & \text{Kinetic friction force} \\ \underline{T}^T (\underline{B} - \underline{D})\underline{C}k & \text{Static friction force} \\ \underline{T}^T (\underline{I}_{3M} - \underline{B})\underline{C}k & \text{Non-friction} \end{cases}$$

準静力学的な接触力解析(発生しうる接触力の集合を求める)

$$\begin{cases} WCk = -(Q_{\text{known}} + Q_{\text{dist}}) & \text{対象物に加わる力のつりあいの条件(接触力と既知, 未知の外力)} \\ T^T (I_{3M} - B) Ck = 0 & \text{仮想滑りの発生しない点では静止摩擦力が発生しない} \\ J^T Ck = \tau & \text{ロボット指から加わる接触力と関節トルクの関係} \\ ST^T (B - D) Ck \leq 0 & \text{静止摩擦力は仮想滑りと逆向きにはたらく} \\ k \geq 0 & \text{(動摩擦力は仮想滑りの方向による制約を受けない)} \end{cases} \quad \text{[Maeda 2006] からの改良点}$$

仮想滑りの制約条件を満たす B, S を求める



各 B, S の組み合わせについて線形不等式系を解く



それぞれの取りうる Ck (凸超多面体) の和集合が発生可能な接触力

グラスプレス・マニピュレーションにおける操作のロバスト性の評価

$z = \min_i z_i$ 最も弱い方向に対する(操作を乱されない)ロバスト性

$z_i = \max_{\zeta, k, B, S} \zeta$ ある方向の外乱力に対して耐えられる最大値

subject to

$$\begin{cases} \zeta (R^{1/2})^{-1} l_i + Q_{\text{known}} + WCk = 0 \\ T^T (I_{3M} - B) Ck = 0 \\ J^T Ck - \tau = 0 \\ ST^T (B - D) Ck \leq 0 \\ k \geq 0 \end{cases}$$

$R := \begin{bmatrix} I_3 & O \\ O & M_0 J_0^{-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 力とモーメントを同時に扱うための正定値対称行列

l_i : 六次元単位超球に内接する六次元超多面体の頂点を表す単位ベクトル

各 B, S と有限数の l_i の組み合わせについて線形計画問題を解く

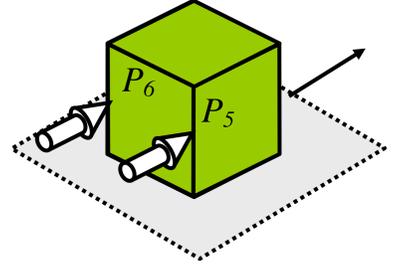
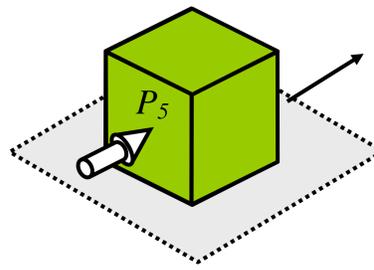
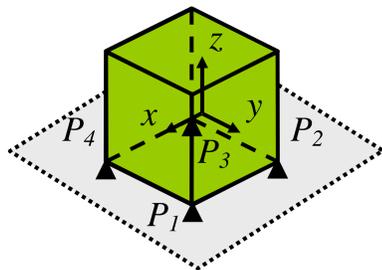
操作のロバスト性評価の計算例

- Linux PC (CPU: Core2 Quad-2.66 GHz) で計算する
- l_i を76方向にとる
- 摩擦円錐を凸32角錐の近似する
- 原点を対象物の重心とする

- (対象物の質量) = 1, 質量分布は一様
- (重力加速度) = 9.8
- (静止摩擦係数) = (動摩擦係数) = 0.3

押し操作

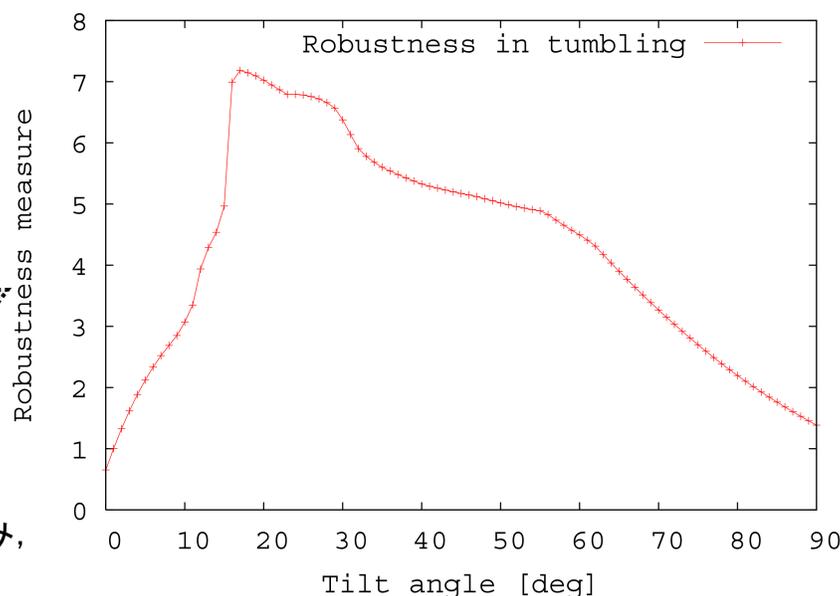
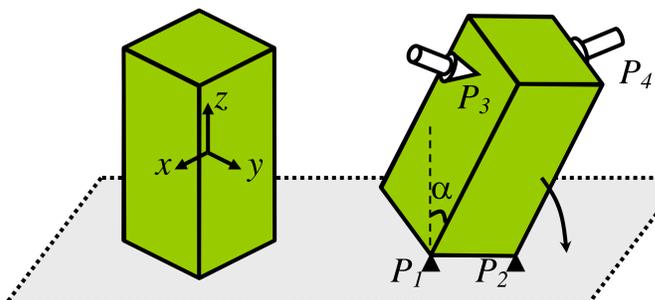
- 2×2×2 の立方体
- 位置制御指で押す



| 操作状態 | 静止 | 一本指で押す | 二本指で押す |
|---------------|----------------|-------------|-----------------|
| 外乱に対するロバスト性 | 2.94 (最大静止摩擦力) | 0 (ロバストでない) | 0.88 (ある程度ロバスト) |
| 計算時間 [CPU 秒] | 5.3 | 0.31 | 0.68 |
| B, S の組み合わせ | 196 | 35 | 45 |

転がし操作

- 1×1×2 の直方体
- 位置制御指とハイブリッド制御指ではさみ, 1 [deg] ずつ倒す



- 計算時間: 9.4 [CPU 秒] (一つの角度における平均)
- B, S の組み合わせ: 326通り

力のつりあいの取りやすい姿勢のとき, ロバスト性が高い

結論

- 物体操作中の対象物に加わる接触力の準静力学的解析
- グラスプレス・マニピュレーションの操作のロバスト性の評価の改良

今後の展望

- 計算量の削減
- 動作計画への応用