

# グラスプレス・マニピュレーション における操作の确实性の解析

横浜国立大学 ○榎田 諭  
前田 雄介

1. 序論
2. 力学モデル
3. 接触力の制約条件
4. 操作の确实性
5. 計算例
6. 結論

# 1. 序論

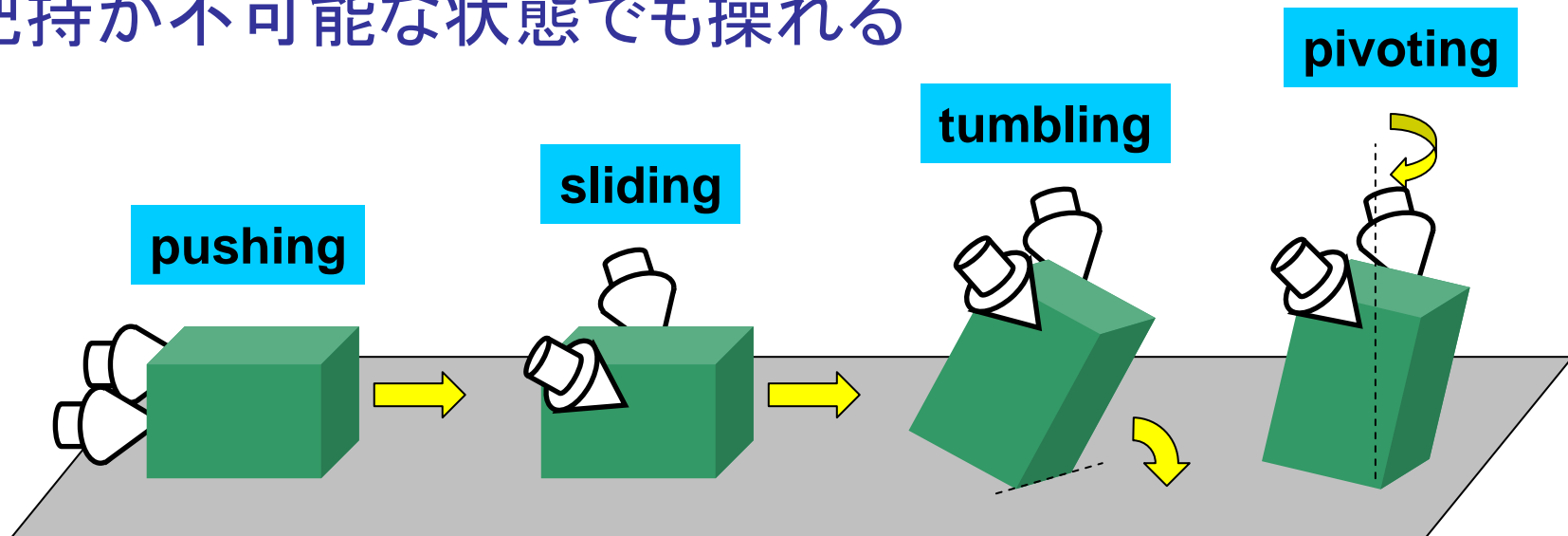
## グラスプレス・マニピュレーションとは

物体を把持しない(grasp-less)で操る



※環境と接触した状態で操作する

- 可搬重量以上のものを動かすことができる
- 把持が不可能な状態でも操れる

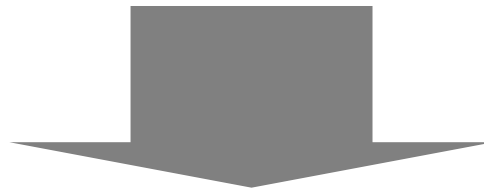


## ピックアンドプレイス

- 対象物を完全に把持する

## グラスプレス・マニピュレーション

- 把持が不完全



グラスプレス・マニピュレーションは、  
外乱の影響を受けやすく、  
ロボットに動作を与えるのが難しい。

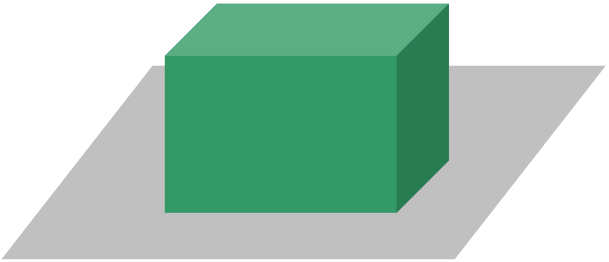
ロボットの動作計画をする場合、操作が確実に行えるかどうか調べる必要がある。

## 操作の確実性

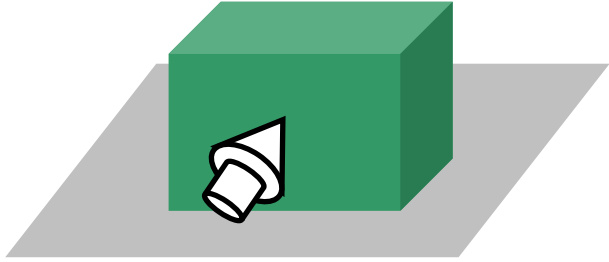
操作中の対象物が外乱に対してどの程度まで耐えることができるかを定量的に評価する指標

[前田2001]

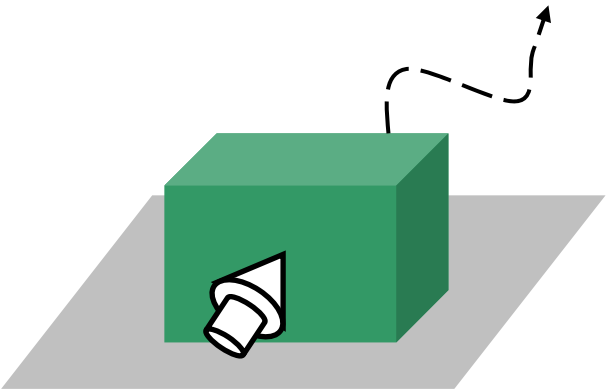
重力や摩擦力が働く



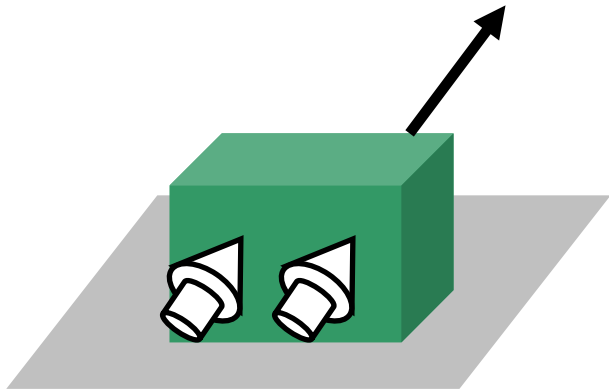
安定



安定



不安定



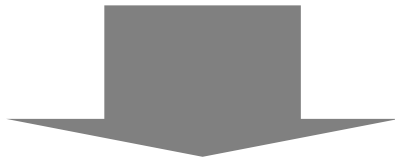
安定

[前田2001]で、操作の確実性の評価法は提案されている。



しかし

対象物に加わりうる摩擦力に関して、考慮されていない制約条件があった。



※実際には発生しえない摩擦力の組み合わせを排除していなかった。

発生しえない接触力の影響で、操作の確実性を過大評価してしまう場合が存在した。

# 研究目的

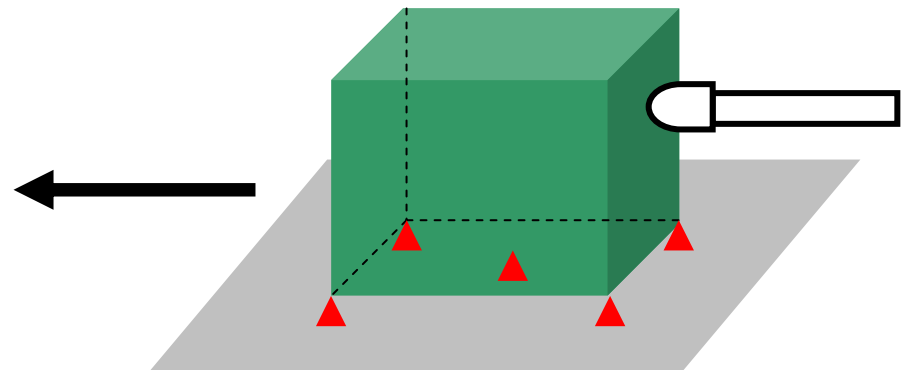
グラスプレス・マニピュレーションにおける操作の确实性を評価する上で、従来の方法における問題点を解決した、より評価精度の高いアルゴリズムの開発を行う。

〔 パワーグラスプの把持力と安定性についての理論  
[小俣2001]を応用する。 〕

## 2. 力学モデル

### 操作の确实性を求めるための前提条件

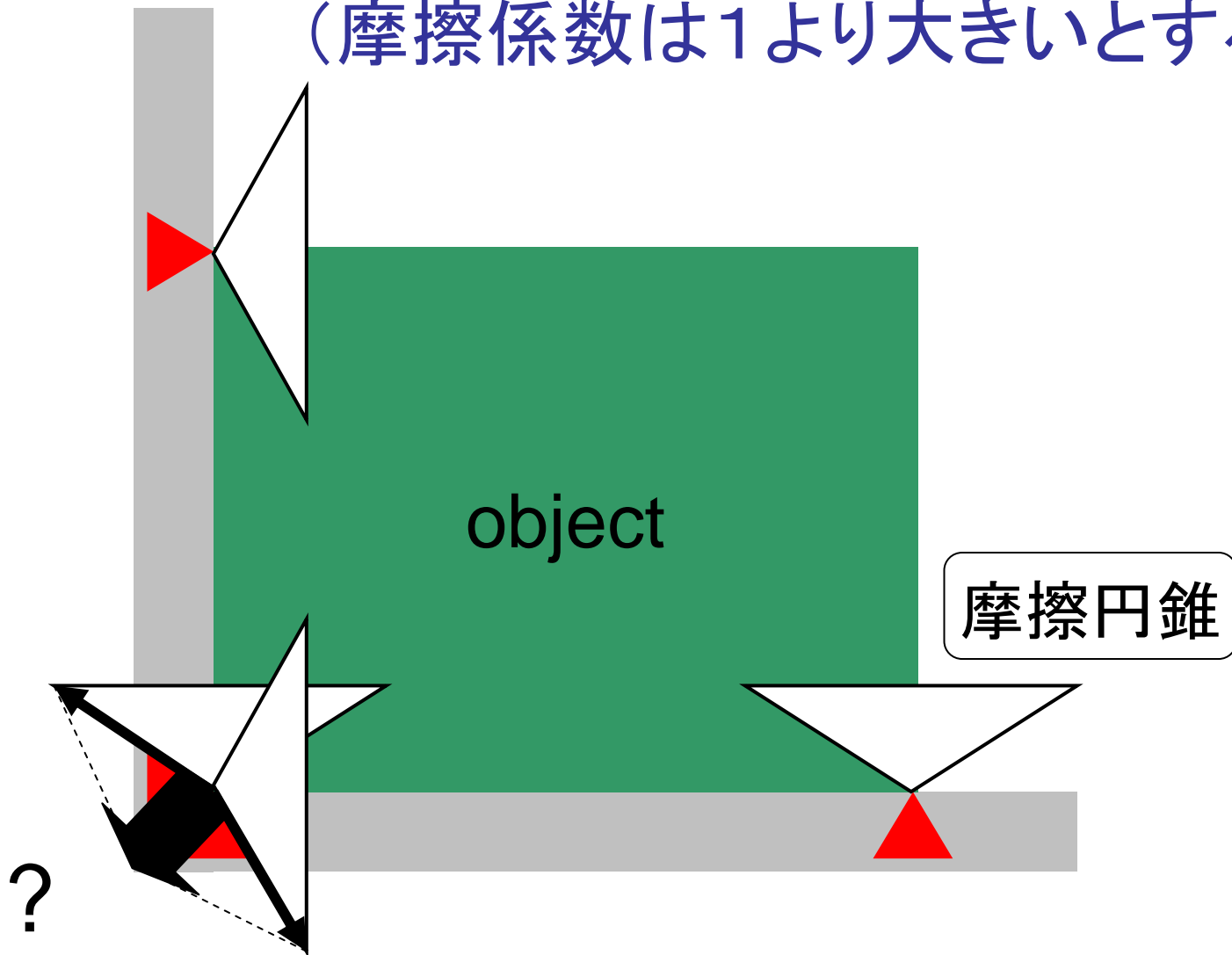
- 対象物・環境・ロボットは全て剛体.
- 対象物は準静的に操作.
- 位置制御されたロボットとの接触は環境との接触と同等.
- 各接触点での摩擦はクーロン摩擦.
- 接触は点接触の集合で表現.
- 摩擦円錐は多角錐で近似.



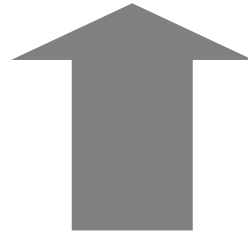


# 誤評価の例

(摩擦係数は1より大きいとする)

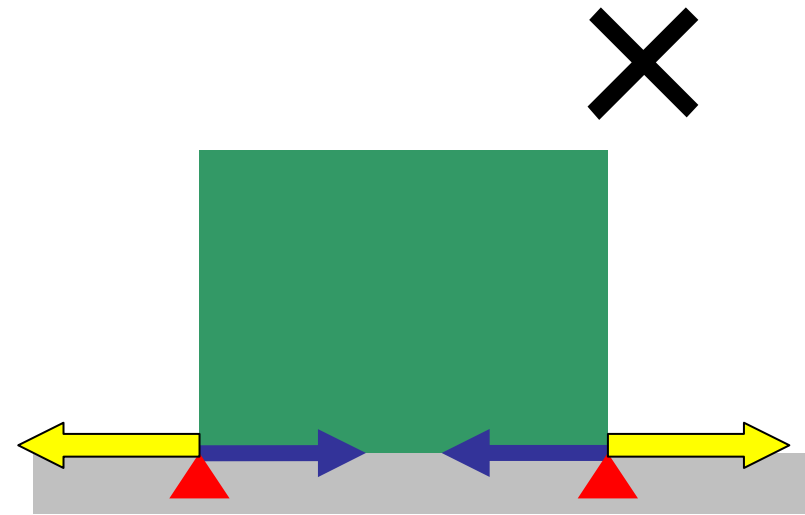
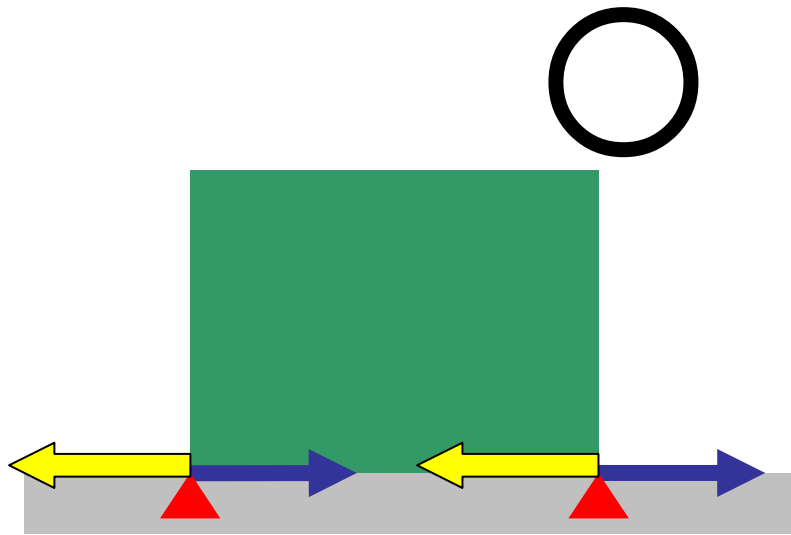


接触力は必ずしも摩擦円錐内の任意の力の組み合わせが発生できるとは限らない。



従来の方法[前田2001]における、  
操作の确实性の過大評価の問題

### 3. 滑りの方向と摩擦力の制約条件



[小俣2001]

→ : 滑ろうとする

→ : 静止摩擦力

実際に起こりうる滑りパターンかどうかを判定  
→ 摩擦力の発生しうる方向の組み合わせを限定

# 仮想滑りによる制約条件の式

$$\mathbf{B}(\mathbf{W}^T \mathbf{V} - \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{T}\mathbf{S}\mathbf{q}$$

接触点の接平面  
方向の(仮想)速度

接触点の動く  
(仮想)速度

ロボットの関節の動きに  
よる接触点の(仮想)速度

仮想滑りの方向

静止摩擦力

$$\mathbf{S}^T \mathbf{C}\mathbf{k} \leq \mathbf{0}$$

静止摩擦力は  
仮想滑り方向と逆符号をとる

# 4. 操作の确实性

外乱力に対抗する  
合力・合モーメント

$z =$

$$\min_{\|\hat{Q}_{dist}\|_R = 1} \max_{\substack{T^T Ck \in F, J^T A Ck = \tau, \\ Q_{known} + W Ck = -Q_{dist}}} \|\mathbf{Q}_{known} + \mathbf{W} Ck\|_R$$

外乱に対して最も弱い方向で  
どの程度耐えられるか。

- $Q_{known}$  : 既知の外力
- $Q_{dist}$  : 未知の外乱力
- $W Ck$  : 摩擦円錐内の接触力

ある方向の外乱力に対して  
最大どの程度の大きさまで耐えられるか。

maximize  $z_{ij}$

subject to

$$\begin{cases} z_{ij} \mathbf{R}^{-1/2} \mathbf{l}_i = \mathbf{Q}_{known} + \mathbf{W} \mathbf{C} \mathbf{k}_{ij} \\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{A} \mathbf{C} \mathbf{k}_{ij} \\ \mathbf{S}_j \mathbf{T}^T \mathbf{C} \mathbf{k}_{ij} \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{T}^T \left\{ \mathbf{I}_B - (\mathbf{B}_j + \mathbf{D}) \right\} \mathbf{C} \mathbf{k}_{ij} = \mathbf{0} \\ \mathbf{k}_{ij} \geq \mathbf{0} \end{cases}$$

$$z = \min_i \max_j z_{ij}$$

ミニマックス値とする

ある方向 $l_i$ について、  
外乱力と接触力の  
つり合い式

関節トルクと  
指先力の関係

摩擦力の方向と滑り  
方向との対応関係

滑らない点では  
摩擦力は発生しない

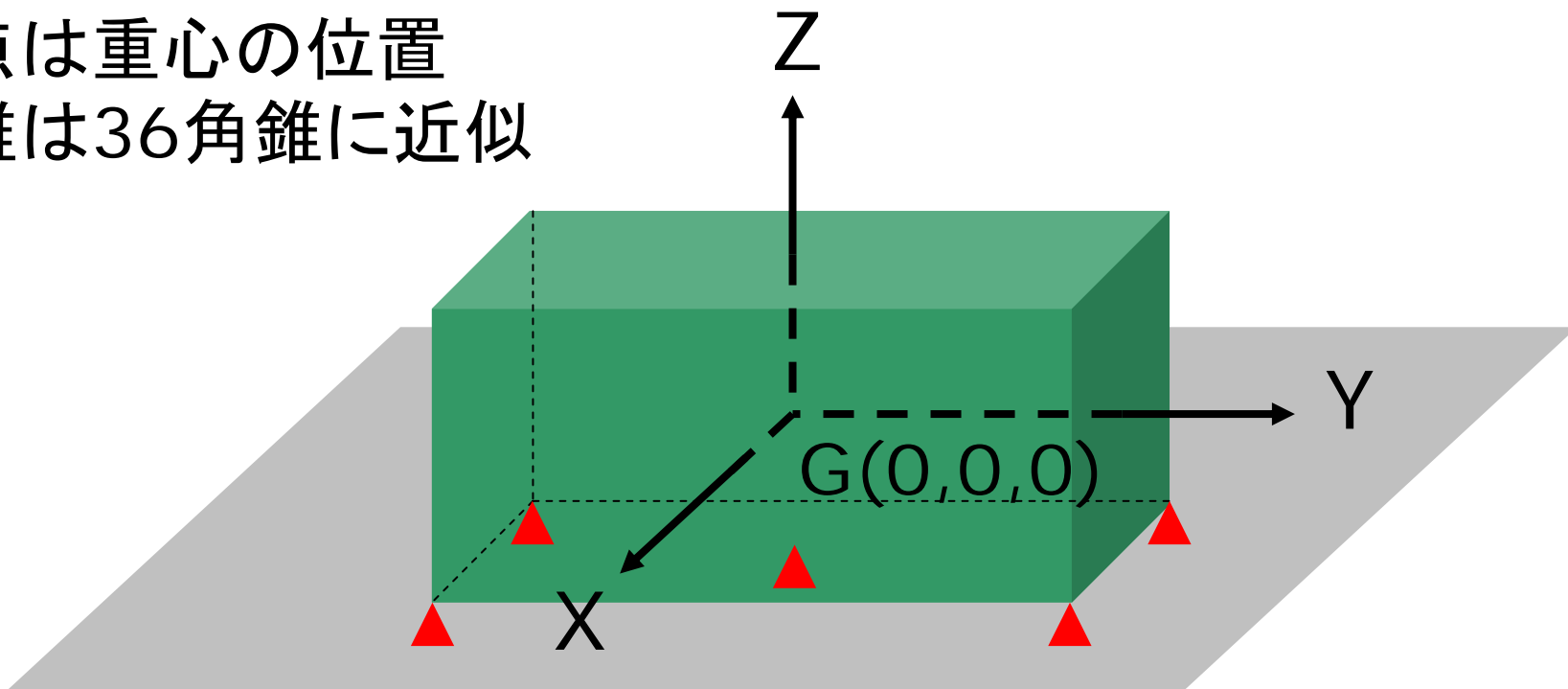
近似と場合分けによって

線形計画問題として解く.

## 5. 計算例

- ・対象物の質量・・・1 [kg]
- ・重力加速度・・・9.8 [m/s<sup>2</sup>]
- ・摩擦係数・・・0.3
- ・座標原点は重心の位置
- ・摩擦円錐は36角錐に近似

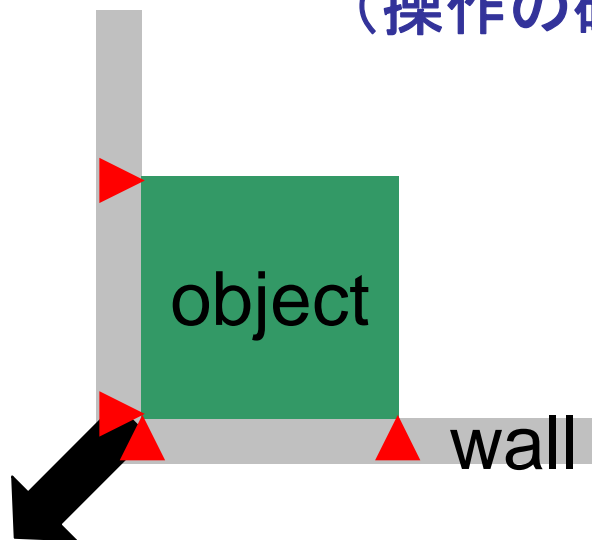
Pentium4-3.2GHz  
Linux PCで計算



※底面の面接触は頂点の4点と図心の計5点で近似(▲)

# 従来の方法との比較

(操作の确实性の過大評価の問題)



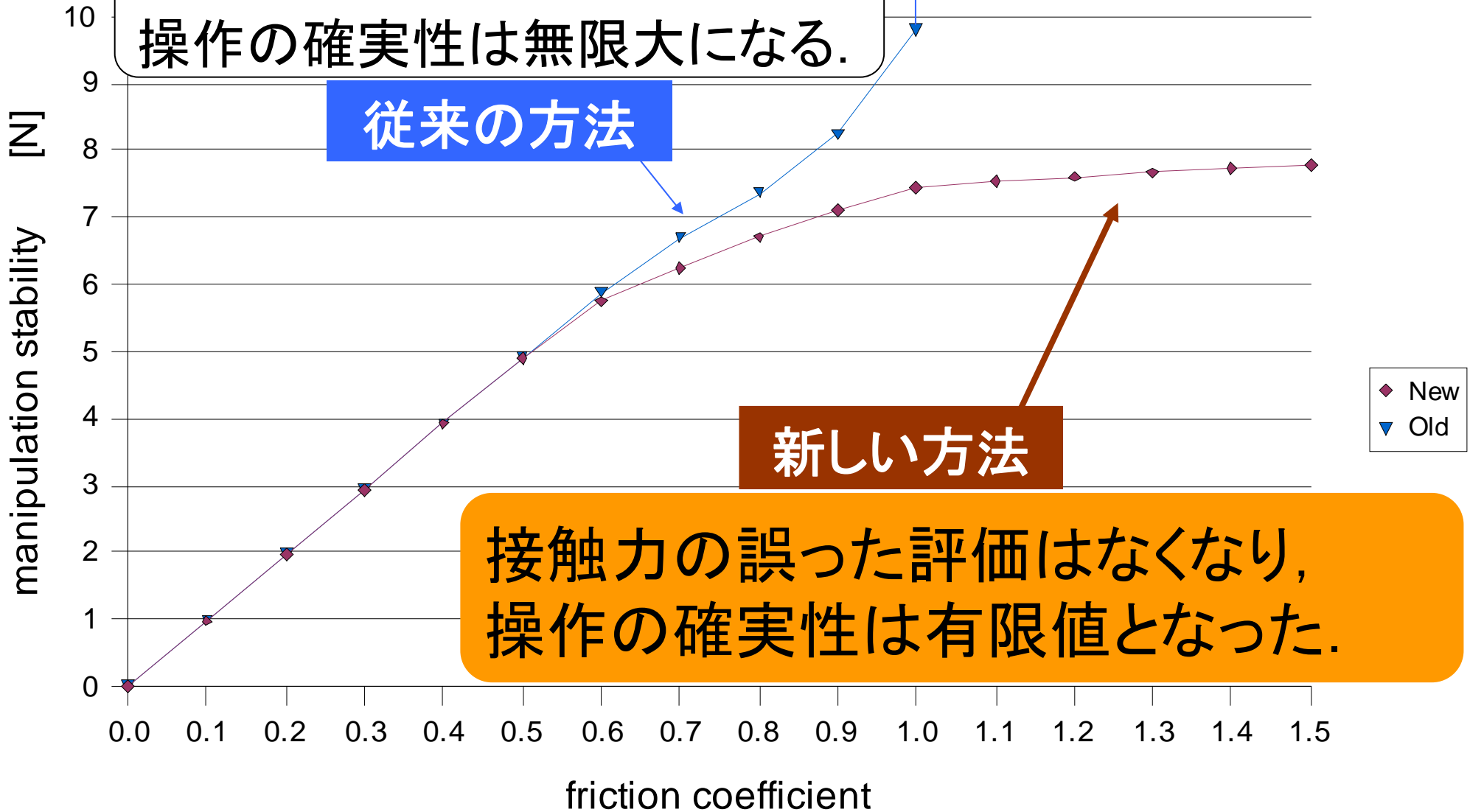
- ・対象物の大きさを2[m] × 2[m] × 2[m]

※従来の方法では、摩擦係数の値によっては上図の矢印の方向に大きな力が働くなど、接触力を正しく見積もれない場合があった。

摩擦係数を0.0～1.5まで0.1ずつ変化させたときの操作の确实性を調べた。



摩擦係数が1.0を超えると、  
操作の確実性は無限大になる。



従来の方法

新しい方法

接触力の誤った評価はなくなり、  
操作の確実性は有限値となった。

# 押し操作

静止している場合

43.8CPU秒

(操作の确实性) = 2.94[N]

※底面からの最大静止摩擦力に一致  
( $1.0[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] \times 0.3 = 2.94[\text{N}]$ )

1本の指で押す場合

21.2CPU秒

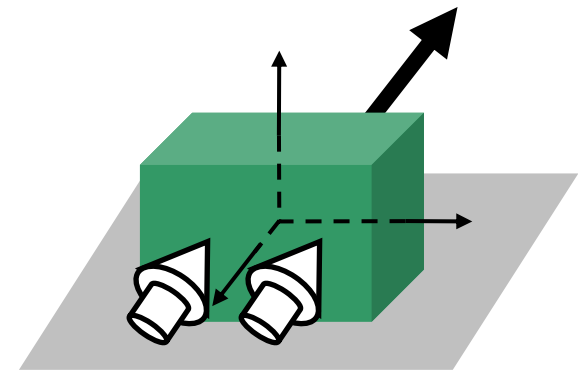
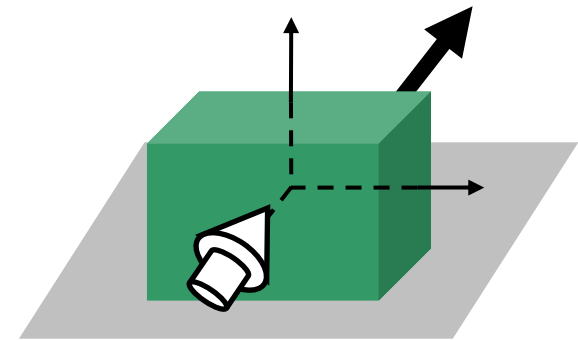
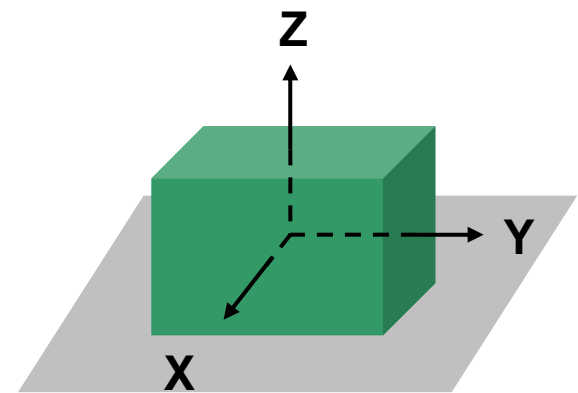
(操作の确实性) = 0[N]

※わずかな力で操作は乱される.

2本の指で押す場合

95.2CPU秒

(操作の确实性) = 0.264[N]



実際の現象と操作の确实性の値が対応

## 6. 結論

- 新たに「摩擦力に関する制約条件」を考慮したことで、従来の方法と比較して、操作の确实性の値をより正確に評価できた。
- 一般的なグラスプレス・マニピュレーションを対象とし、その操作の确实性として妥当な結果が得られた。



ロボットにグラスプレス・マニピュレーションを行わせる際に、適切な動作計画ができる。

# 7. 今後の展望

- 計算の高速化
- 多様な条件における操作の确实性の評価
- ロボットの動作計画への実装
- 他の視点からみた操作の确实性の定量的評価法の検討