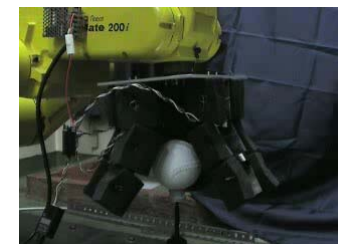
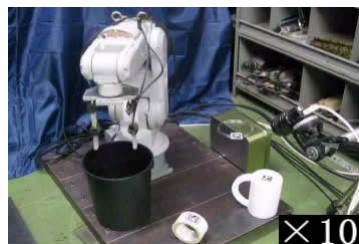


# ケーシングを用いた 幾何ベーストマニピュレーション

○前田 雄介\* 榎田 諭\*\*

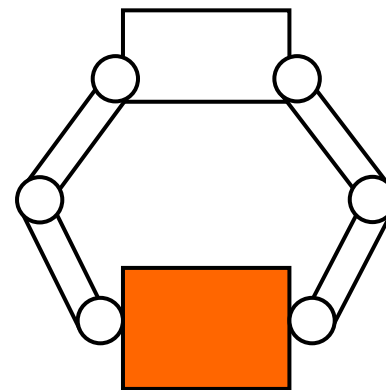
小寺 直樹\* 沖田 賢亮\* 浅村 知洋\*

(\*横浜国立大学 \*\*佐世保高専)



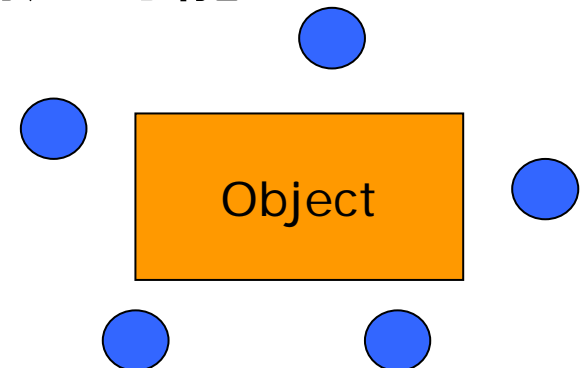
# 研究の背景 (1/2)

- 把持
  - マニピュレーションのための物体拘束法としてもっとも基本的
  - 通常は力制御が必要



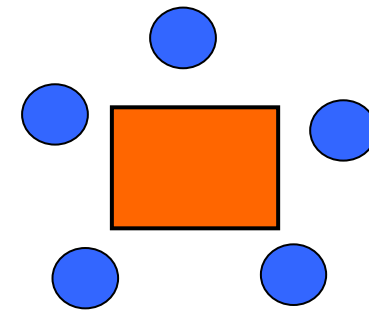
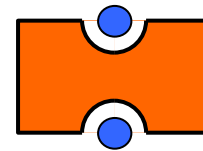
## 研究の背景 (2/2)

- ケージング [Rimon 99]
  - 物体を閉鎖領域から脱出できないようにする
  - 物体の自由度を完全には奪わない
  - 幾何情報に基づき位置制御のみで実現可能
  - 把持を代替あるいは補完する物体拘束手法としてマニピュレーションに利用可能



# ケーシングに関する従来研究

- 多くは二次元平面内での  
ロボットのみによるケーシング



- 二次元平面 → 三次元空間
- ロボットのみ → ロボットと環境(壁)
- ケーシング → (ケーシングに基づく) 把持



# 研究の目的

---

- ケーシングを利用したマニピュレーションの新たな形態とその可能性を探る
  - 三次元多指ケーシング
  - 環境を利用したケーシングマニピュレーション
  - ケーシングベースト把持



# ケーシングの特徴

---

## ■ メリット

- 位置制御によるマニピュレーションが可能
- 幾何学的情報のみから対象物を拘束可能
- ケーシング後は対象物の位置・姿勢のセンシング不要
- 位置制御・位置センシングの誤差を多少は吸収可能
- 移動対象物も拘束可能

## ■ 前提

- ロボットは十分強力である
- 詰まり (jamming) が起こらない

# ケーシングに基づくマニピュレーション

- マニピュレーションは本質的に力学的現象
- しかし、一定の条件を満たす場合は、ケーシングという幾何学的概念に基づいて、力学を考えずにマニピュレーションを実現することができる

→ 「幾何ベースマニピュレーション」

# 三次元多指ケーシング





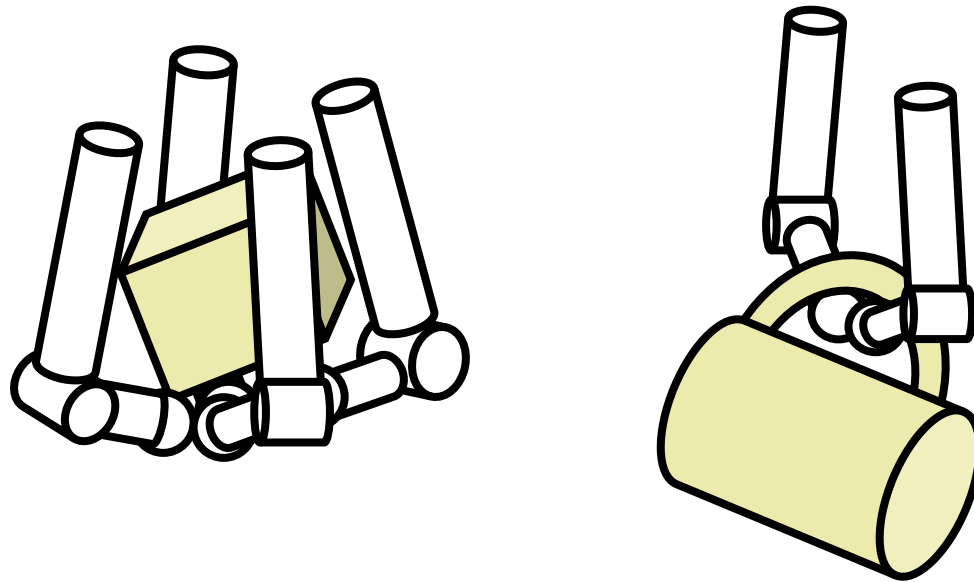
# 三次元ケーシング：従来研究

---

- 三次元的なケーシングを扱った従来研究は少ない
  - [Sudsang 98] 複数のピンを並べた特殊なハンド
  - [Diankov 08] ドアノブなど拘束運動のみを行う対象物のケーシング
  - [Pipattanasomporn 08] 点によるケーシングの定式化. 実装結果は示されていない
  - [Fukui 10] ケーシングのために設計された対象物とエンドエフェクタ

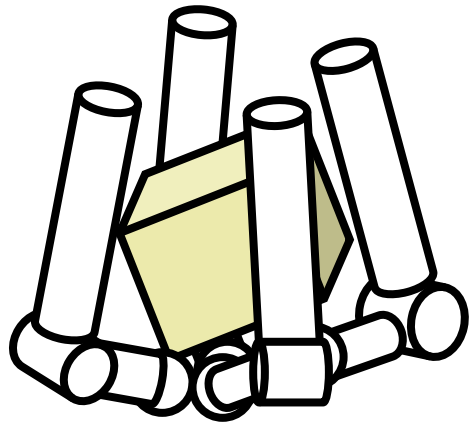
# 三次元多指ケーシング

- 多指ロボットハンドによる三次元的なケーシング

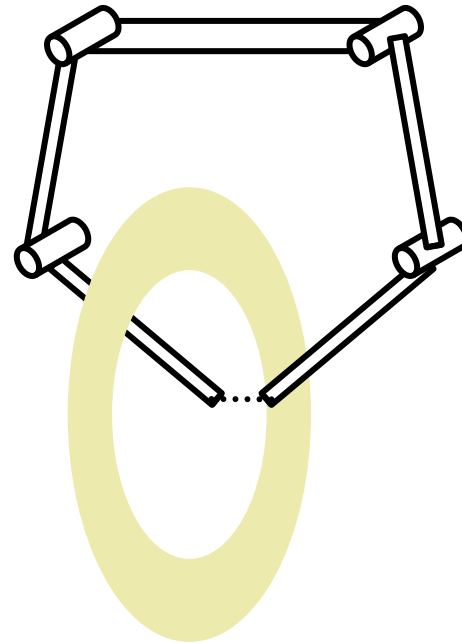


# 三次元多指ケーシングの分類

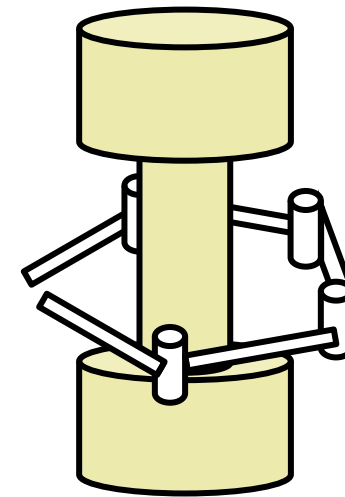
[榎田 10]



包み込みケーシング



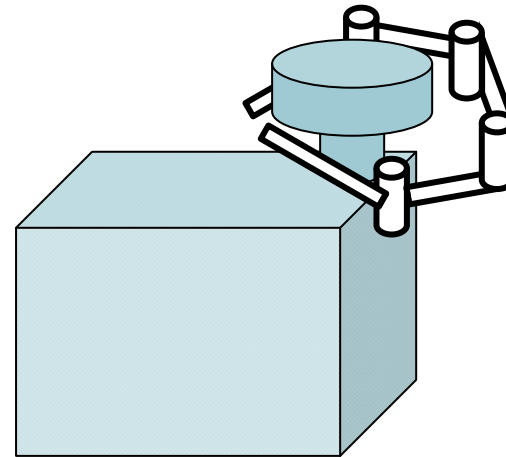
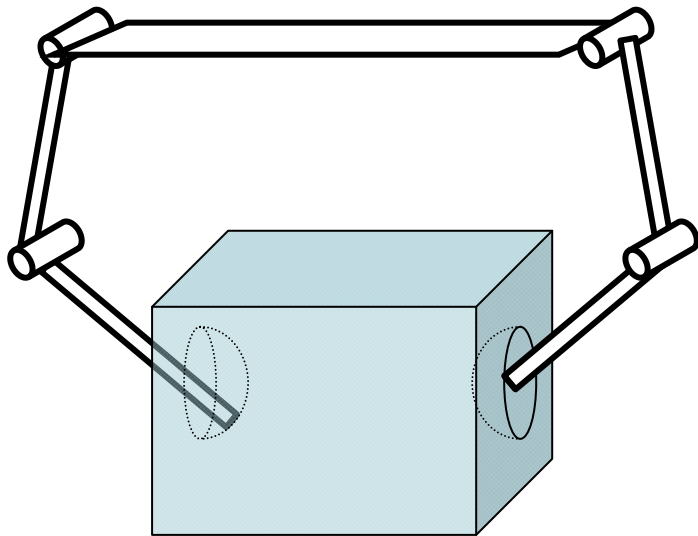
リング型ケーシング



くびれ型ケーシング

# 三次元多指ケーシング

- 局所的な形状特徴を設ければケーシングが可能に





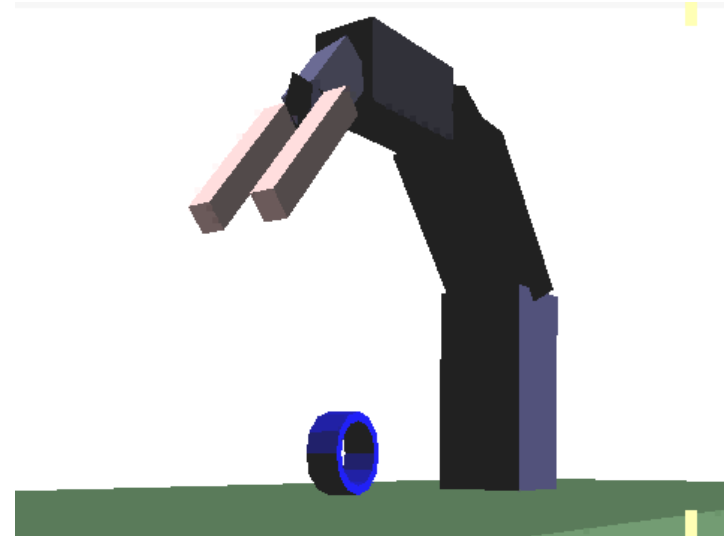
# 三次元多指ケーシングの条件

- 以下の3つをチェックすればよい
  - [閉鎖領域形成判定] 対象物が抜け出せないような閉鎖領域をハンドがつくっているか
  - [内外判定] ハンドがつくる閉鎖領域の内部に対象物が存在するか
  - [干渉判定] ロボットが対象物および障害物と干渉していないか
- 必要十分条件を導出するのは難しいが、十分条件の導出は比較的容易

# 三次元多指ケージングの計画

[槇田 10]

- ケージングのためのアーム・ハンドの動作を自動生成
  - ケージング成立の十分条件を利用
  - RRT (Rapidly-exploring Random Trees) ベース



# 自律ケーシング

- ARToolkitPlus [Wagner 07] を利用した物体認識
- 認識結果に基づいて動作計画・実行
- 動作計画時に対象物を大きめに見積もって計測誤差を吸収



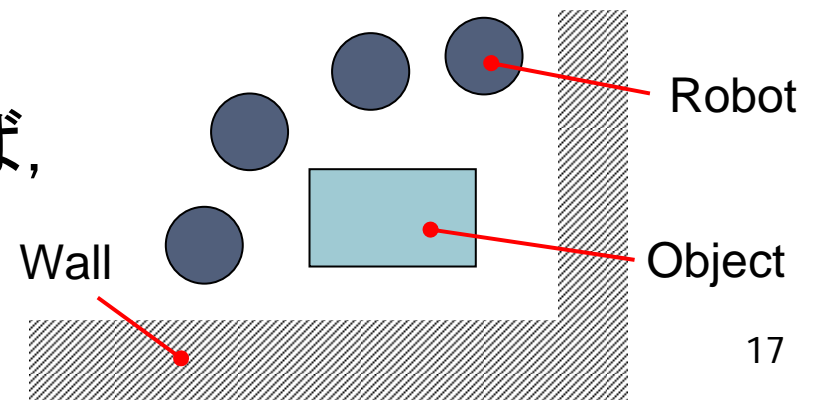
# 環境を利用した ケーシングマニピュレーション



# ケーシングに関する従来研究

- ロボット指によるケーシング  
[Rimon 99] [Pipattanasomporn 08] ...
- 移動ロボットによるケーシング  
[Sudsang 02] [Wang 02] ...
  - ロボットのみによるケーシングが扱われてきた

壁などの環境を利用すれば、  
より少ないロボットでの  
ケーシングが可能に



# ケーシングマニピュレーション

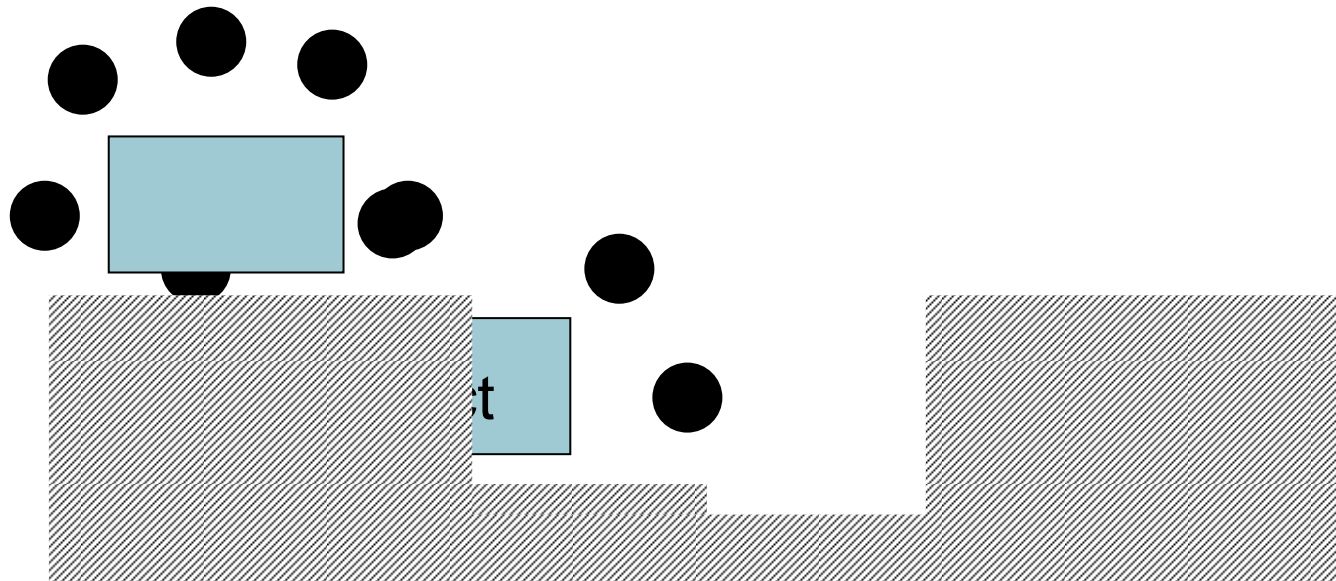
- ケーシングを利用して，物体をある領域からある領域まで搬送することを「ケーシングマニピュレーション」と定義する
  - ロボットのみによるケーシングでは，いったんケーシングを成立させれば，あとはロボットが平行移動するだけでマニピュレーション可能
  - しかし，環境を利用したケーシングの場



Object

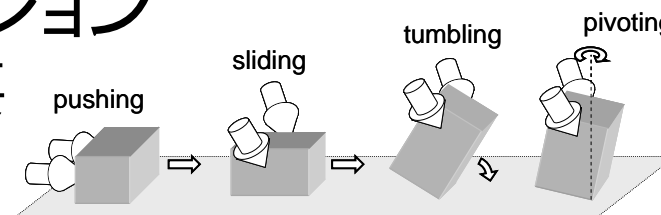
# 環境を利用したケーシングマニピュレーションの問題

- ロボットの平行移動だけではダメ
- ケーシング成立を逐次チェックするだけでもダメ



# 環境を利用したマニピュレーション

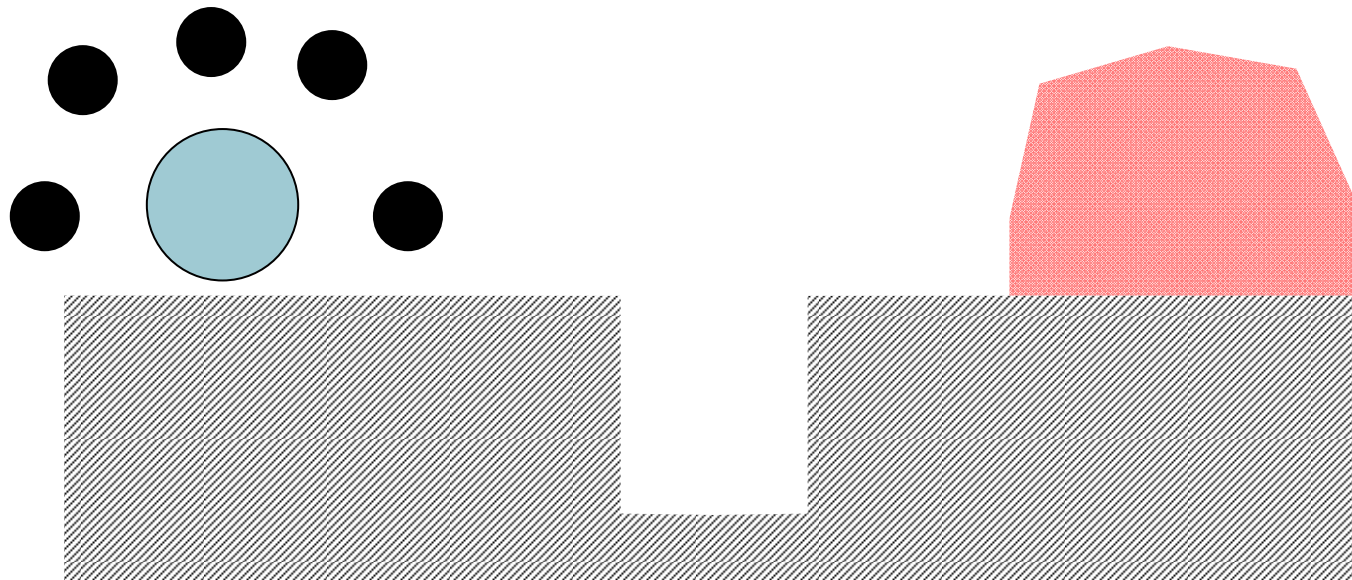
- 把持 ≡ 把持によるマニピュレーション
  - 把持してしまえばOK
- グラスプレスマニピュレーション
  - 力学をつねに考慮する必要



- ロボットのみによるケーシング  
≡ ケーシングマニピュレーション
  - ケーシングしてしまえばOK
- 環境を利用したケーシングマニピュレーション
  - 幾何学をつねに考慮する必要

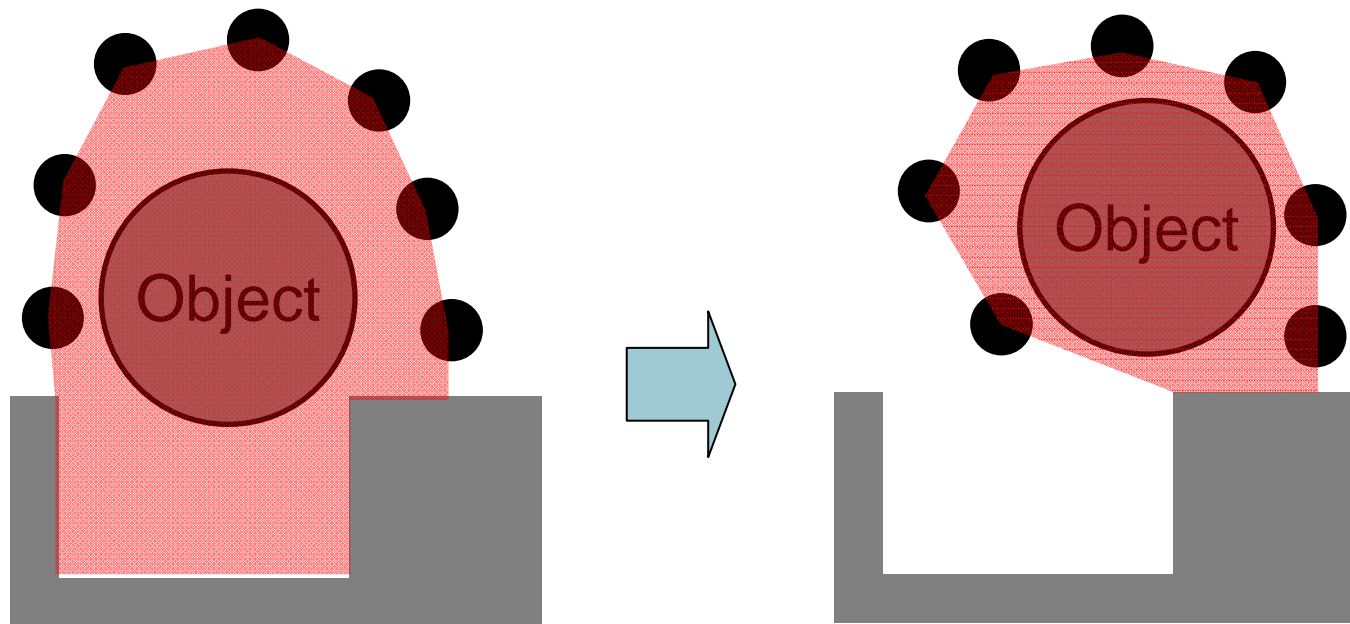
# ケーシングマニピュレーションの条件 (1) [横井 10]

- 環境を利用したケーシングにおいて、マニピュレーションが可能となる条件は？
  - ケーシング内部領域の変化に着目



# ケーシングマニピュレーションの条件 (2) [横井 10]

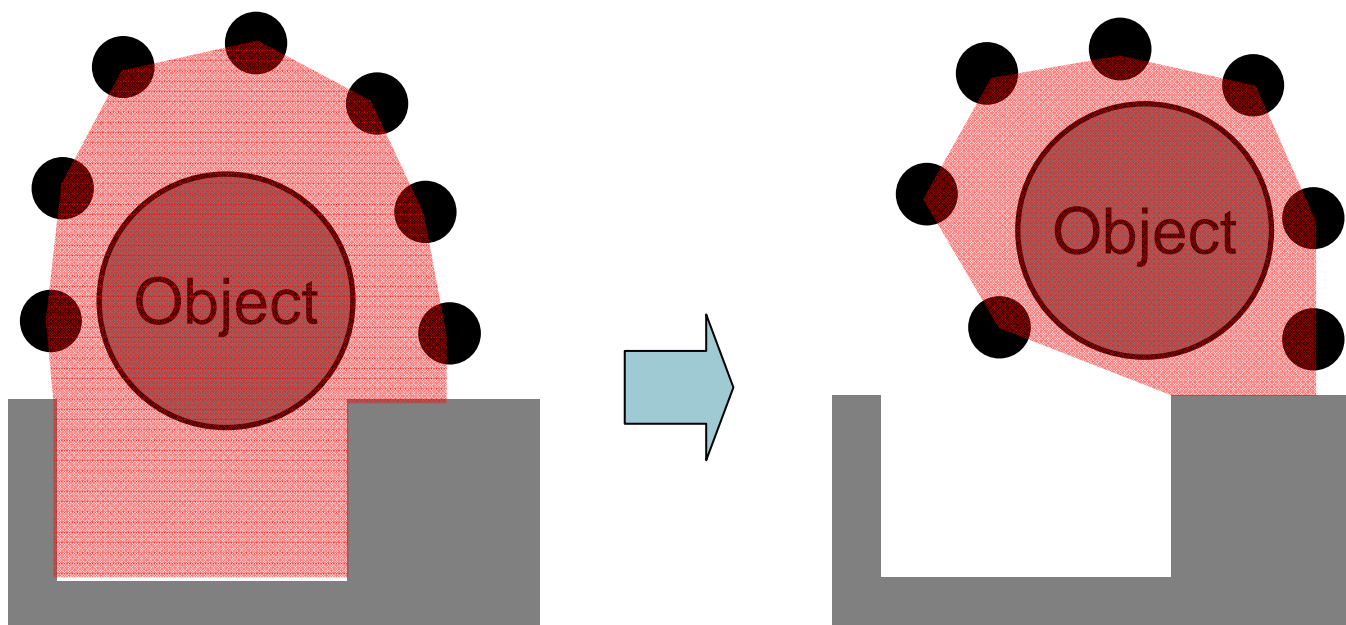
- ケーシング内部領域の不連続な減少



ロボットが連続的に移動しても、ケーシング内部領域に不連続な減少が生じることがある

# ケーシングマニピュレーションの条件 (3) [横井 10]

- ケーシング内部領域の不連続な減少：
  - 物体が不連続に移動しないとマニピュレーションを継続できない → マニピュレーション不可



# ケーシングマニピュレーションの条件 (4) [横井 10]

- ケーシング内部領域の不連続な減少は NG

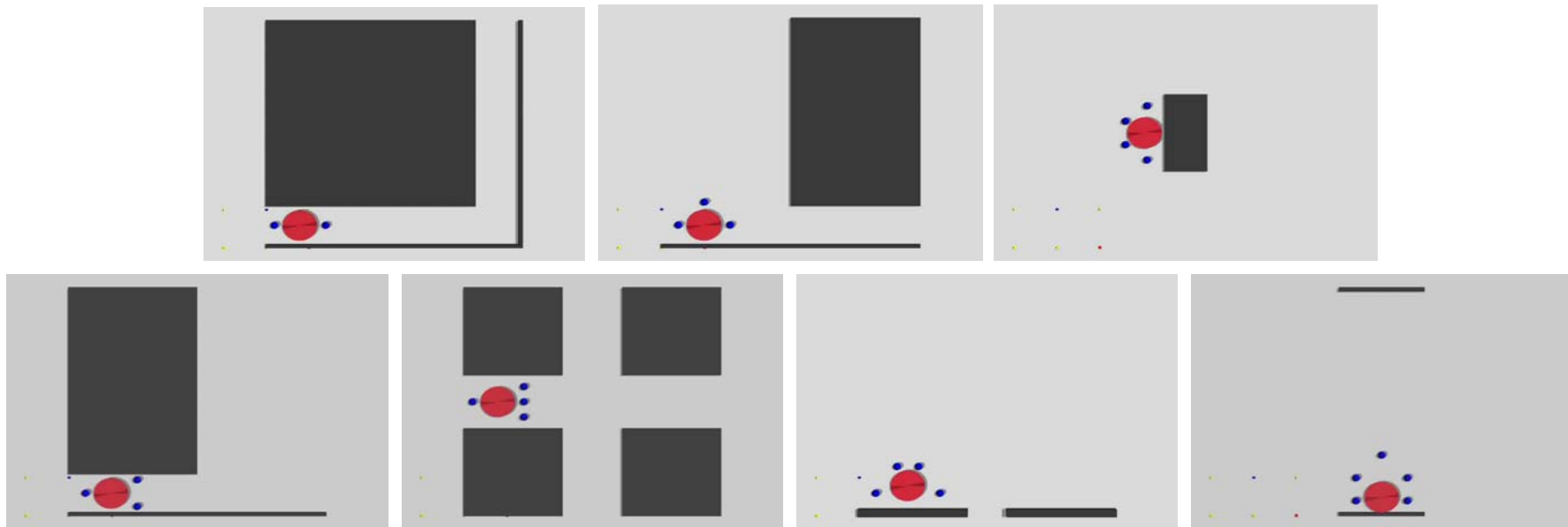
$$\lim_{\Delta t \rightarrow +0} (\mathcal{C}_{\text{free\_obj}}(t) \cap \mathcal{C}_{\text{free\_obj}}(t + \Delta t)) = \mathcal{C}_{\text{free\_obj}}(t).$$

- 不連続な増加は OK であることに注意
- ロボットだけのケーシングにおいてはロボットが平行移動すれば自動的に満たされることに注意



# 環境を利用したケーシングマニピュレーションの計画 [横井 10]

- 前述の条件を用いて自動計画
- RRT ベース



# 環境を利用したケーシングマニピュレーションの実現

- 計画結果を実ロボットで再現



(約 x15)

ケーシングベスト把持



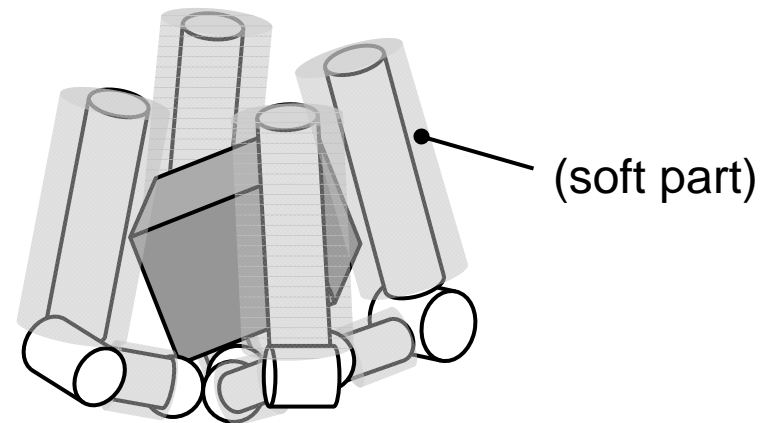
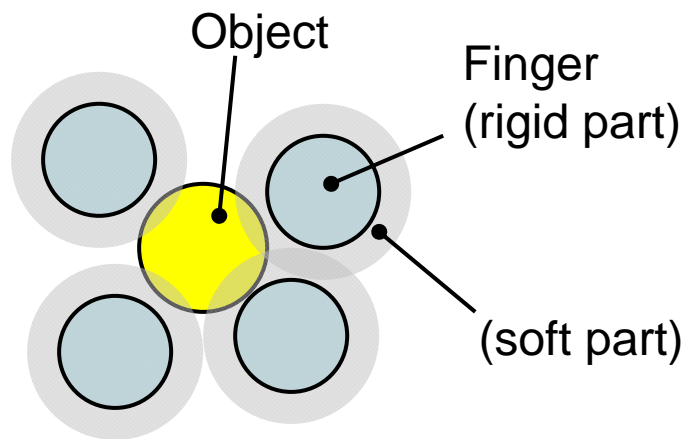
# ケーシングの限界

---

- ケーシングでは対象物が閉鎖領域内で動けてしまう
  - 動くことによる対象物へのダメージ
  - 正確な位置決めが困難
- ケーシングの利点を活かしつつ、把持を行うことはできないか

# ケーシングベスト把持

- 剛体部でケーシングを成立させた状態で、さらに柔軟部を用いて物体を把持
  - 柔軟部を剛体と見なすと、物体の存在領域がなくなる→柔軟部の変形によって把持が成立





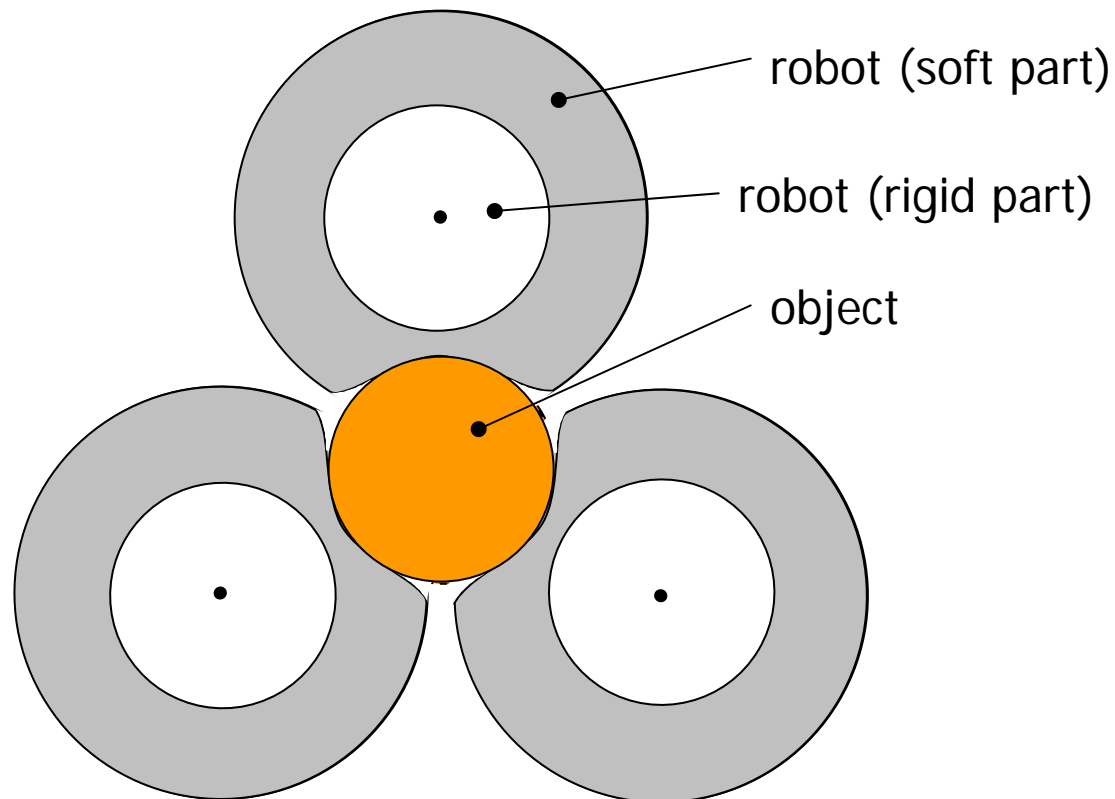
# ケーシングベースト把持の メリット

---

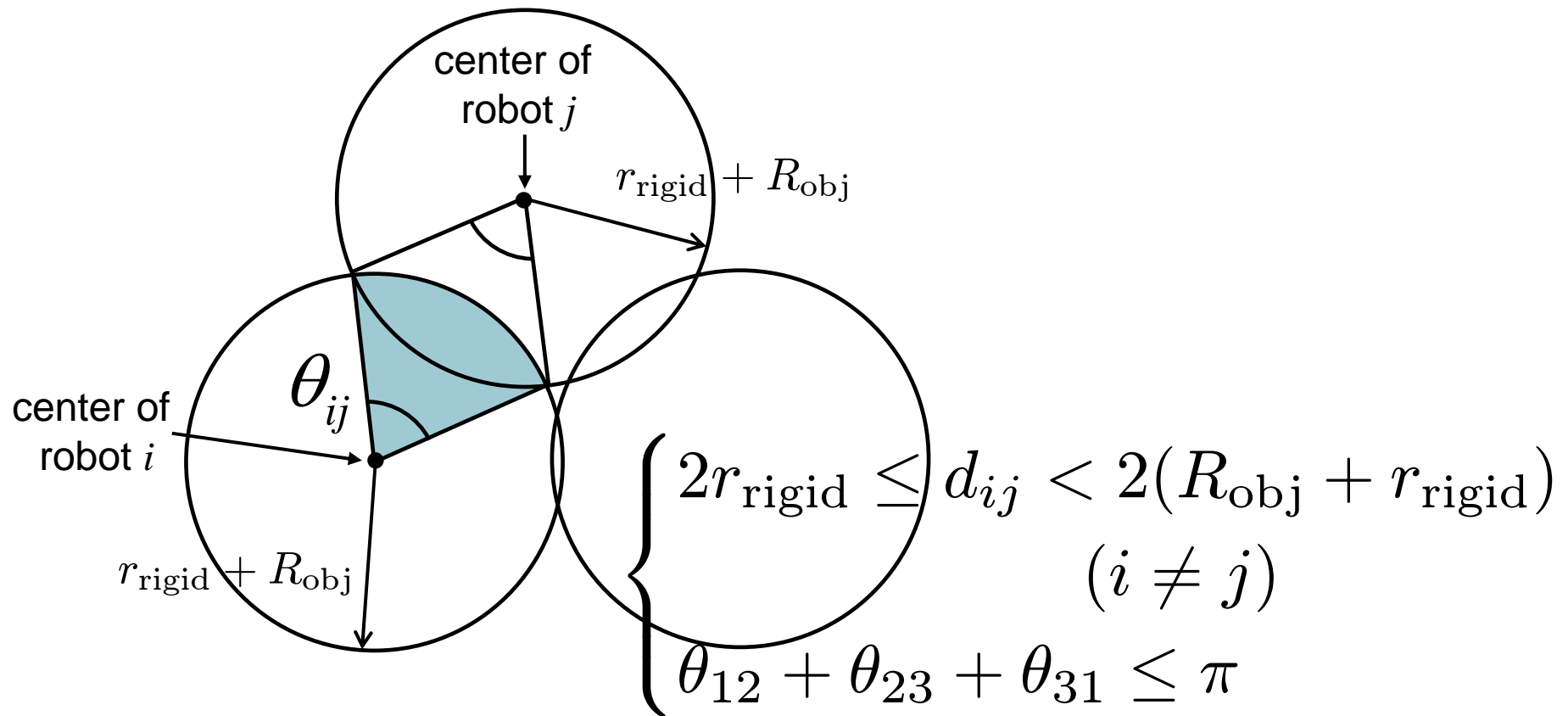
- 位置制御ロボットによって物体を把持できる
  - 力制御, 力センシングは不要
- 従来研究: コンプライアント把持
  - 位置制御で把持可能だが, 把持の実現性を示すために力学解析が必要

# 二次元ケーシングベスト把持

- 3台の円形ロボットによる円形物体の把持

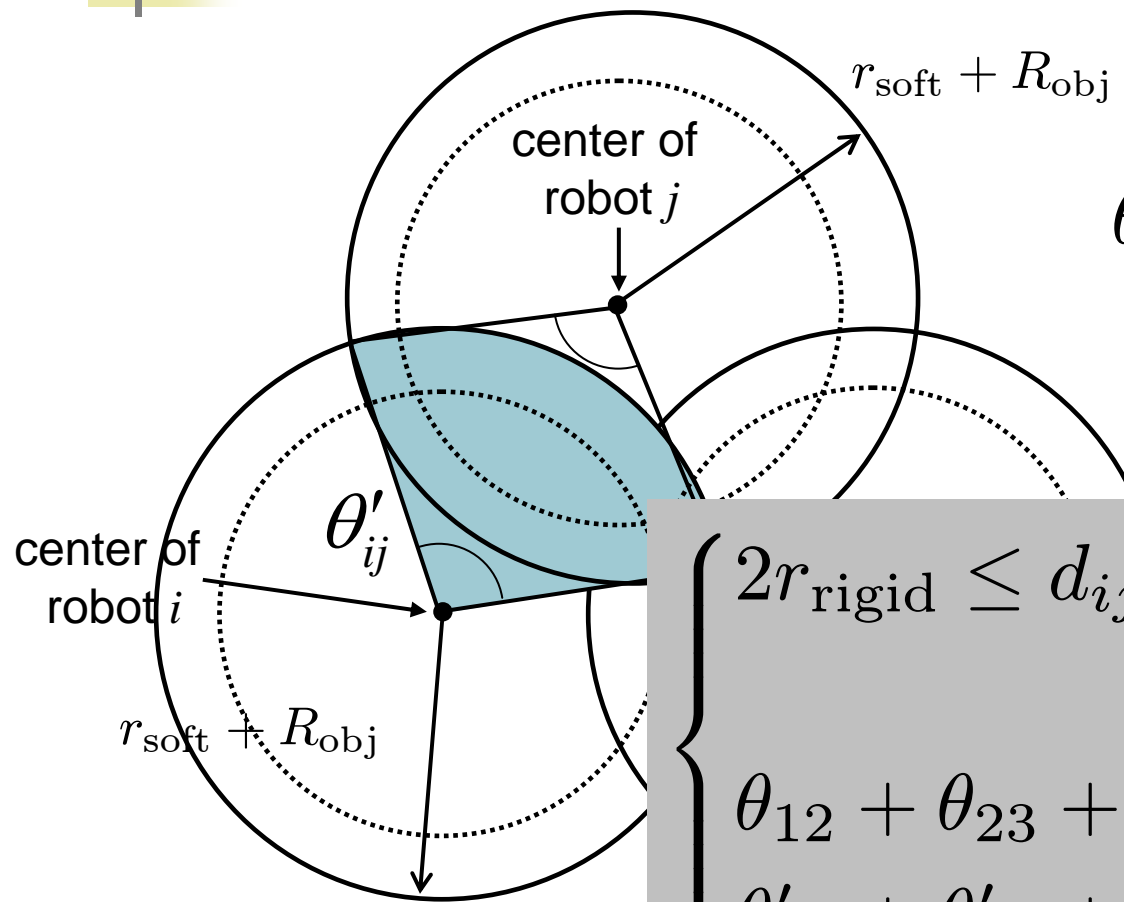


# 剛体部によるケーシングの条件





# 柔軟部によるケーシングの条件



$$\theta'_{12} + \theta'_{23} + \theta'_{31} > \pi$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2r_{\text{rigid}} \leq d_{ij} < 2(R_{\text{obj}} + r_{\text{rigid}}) \\ \quad \quad \quad (i \neq j) \\ \theta_{12} + \theta_{23} + \theta_{31} \leq \pi \\ \theta'_{12} + \theta'_{23} + \theta'_{31} > \pi \end{array} \right.$$

# 二次元ケーシングベースト把持

ロボット：iRobot Create

操作対象物：発泡スチロール円盤

柔軟部：ウレタンフォーム



×4

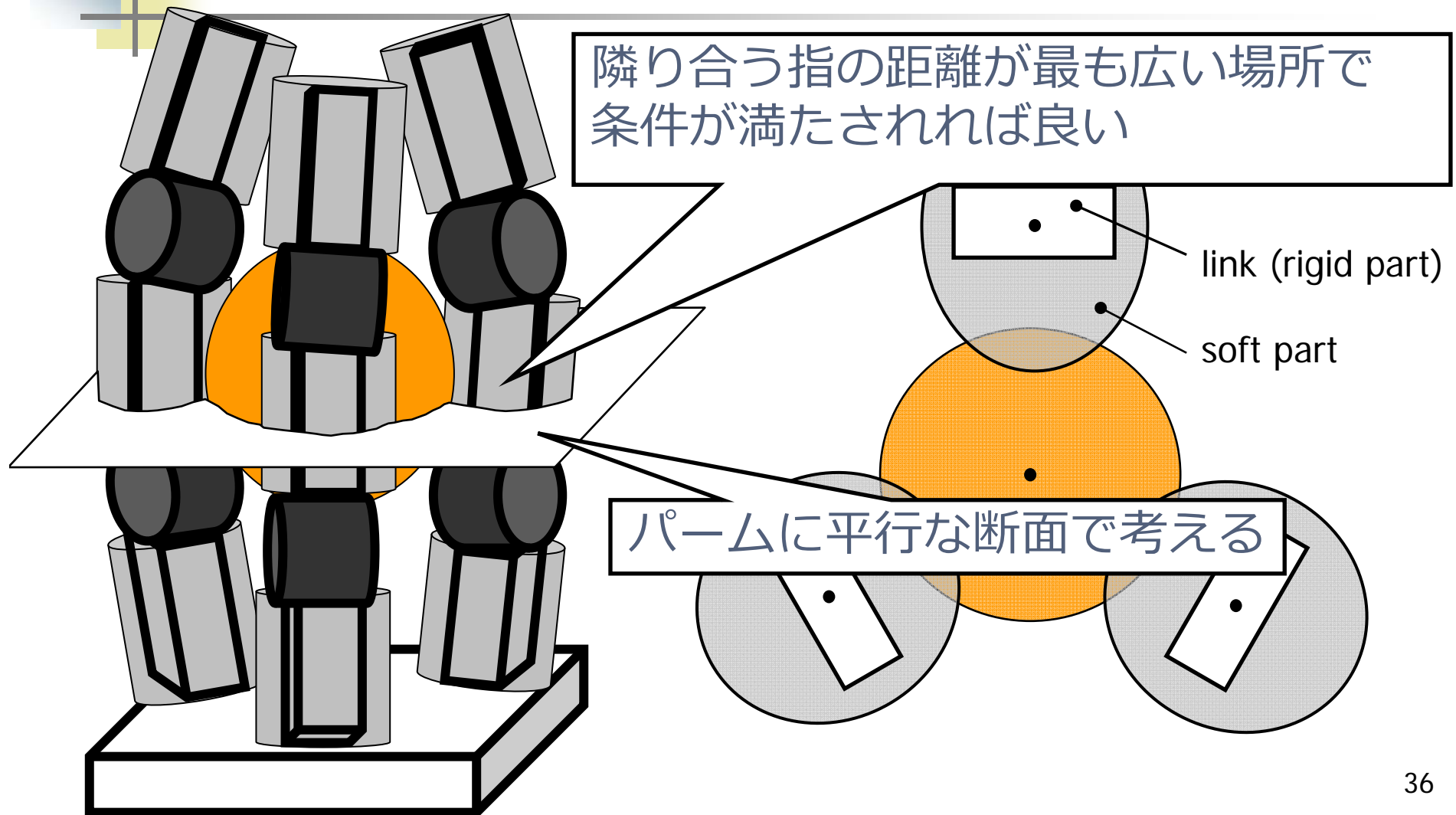
ケーシング



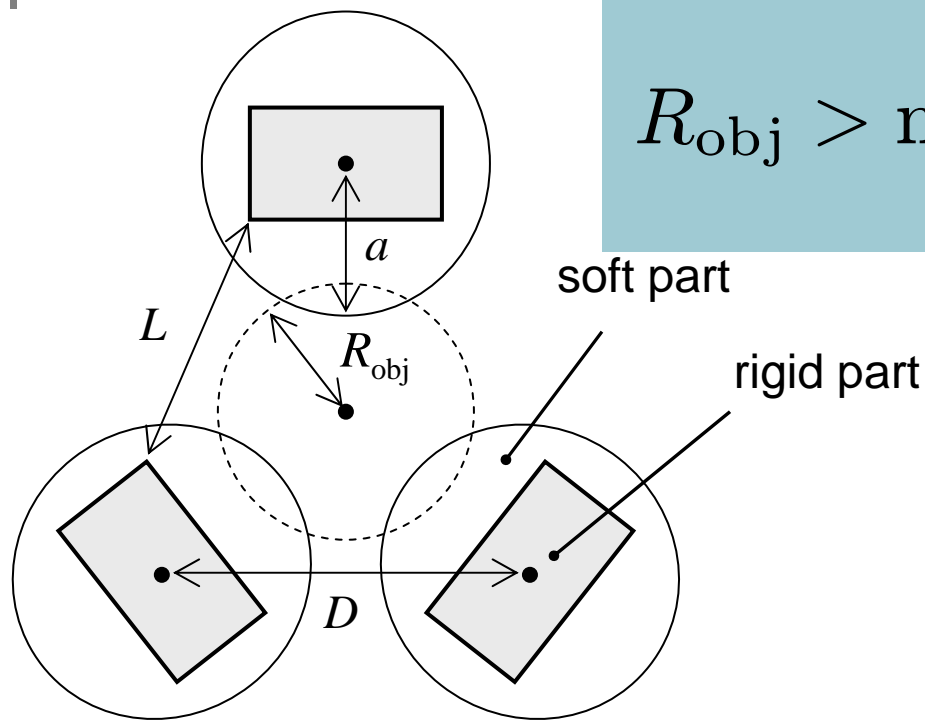
×4

ケーシングベースト把持

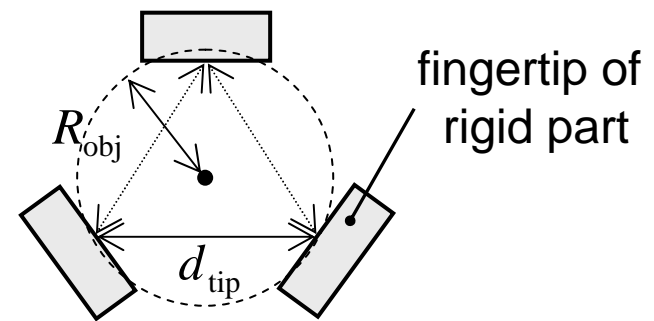
# 三次元ケーシングベースト把持



# ケーシングベースト把持の条件



$$R_{obj} > \max \left( \frac{d_{tip}}{\sqrt{3}}, \frac{L}{2}, \frac{D}{\sqrt{3}} - a \right)$$

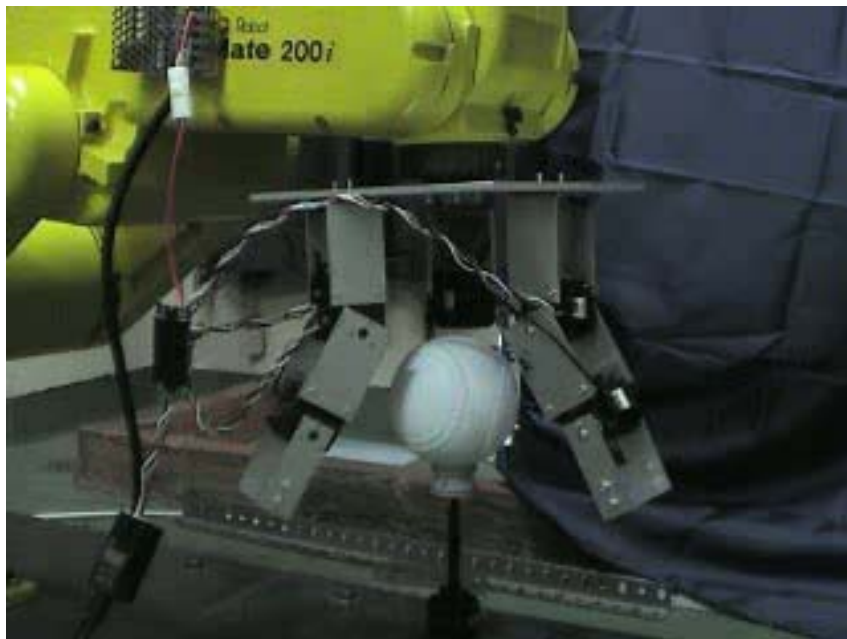


$$L < 2R_{obj}$$

$$\sqrt{3}(a + R_{obj}) > D$$

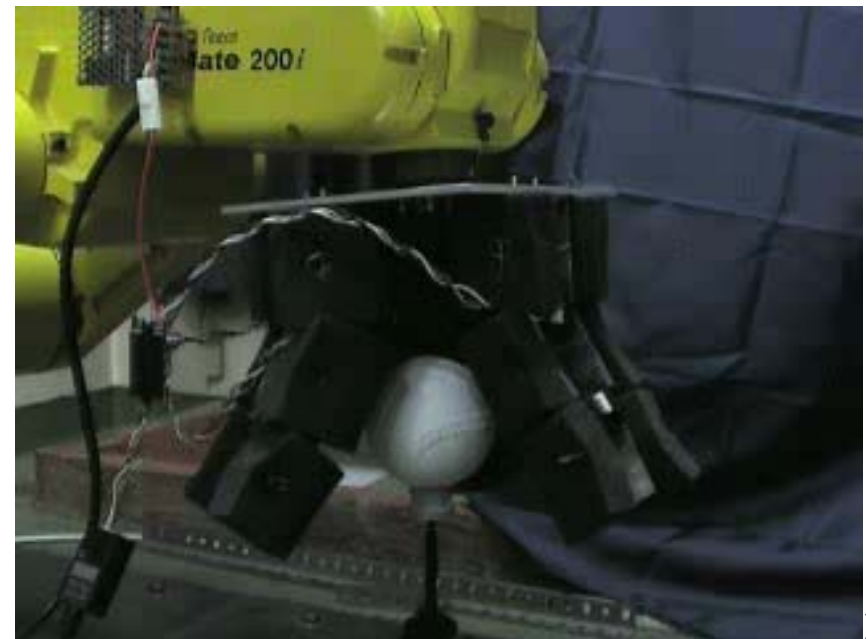
$$d_{tip} < \sqrt{3}R_{obj}$$

# 三次元ケーシングベスト把持



×4

ケーシング



×4

ケーシングベスト把持



## まとめ

---

- ケーシングを利用した幾何情報に基づく物体操作を「幾何ベースマニピュレーション」ととらえ、その新たな形態として
  - 三次元多指ケーシング
  - 環境を利用したケーシングマニピュレーション
  - ケーシングベース把持を示した。
- 他のマニピュレーション形態とも組み合わせ、ロボットによる多様な操りの実現につなげたい