

OS:『多指ハンドとインテリジェント物体操作』 2G2-5

# 多指ハンドによる3次元ケーシングの基礎的考察

## Basic discussion on 3D multifingered caging

○ 榎田 諭, 前田 雄介(横浜国立大学)

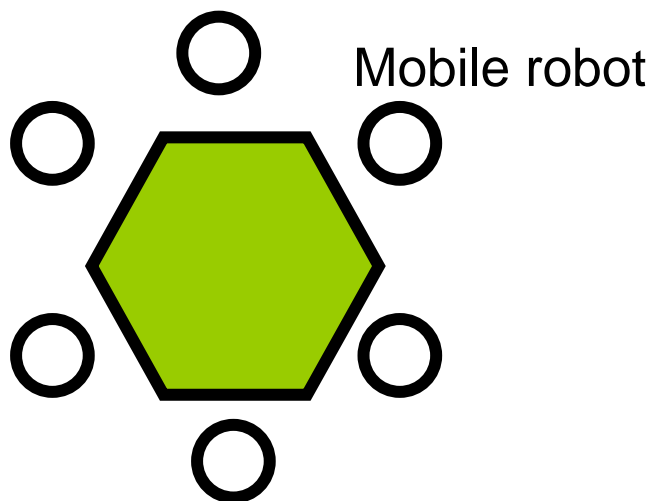
\*Satoshi MAKITA, Yusuke MAEDA  
(Yokohama National University)

1. ケーシングとは
2. ケーシング成立条件の定式化
3. 具体例におけるケーシング成立の十分条件
4. まとめ

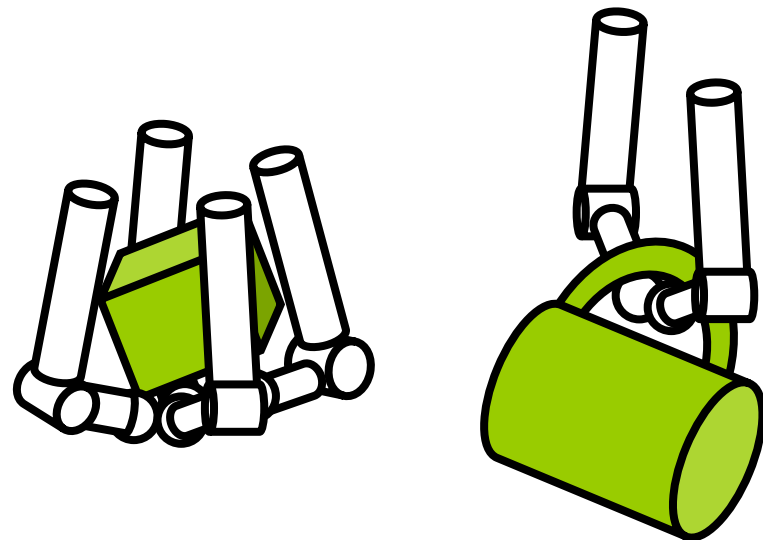
# 1. ケージングとは

## ケージング (Caging)

- ロボットによって物体を“囲い込む”
  - 囲い (Cage) の中から抜け出せないようにする
    - 幾何学的に有限の可動範囲に拘束する



複数移動ロボットによるケージング



多指ハンドによるケージング

# ケーシングの特徴

## 利点

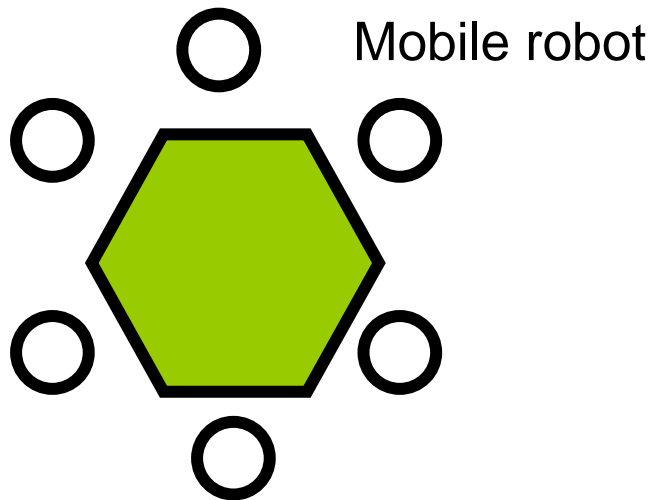
- 細かくロボットを制御しなくても物体を拘束できる
  - カセンシング・力制御が不要
  - 位置制御だけで物体を拘束することができる
- ロボットの自由度が低い(個数が少ない)場合でも物体を拘束できる

## 欠点

- ケーシング中の物体の位置・姿勢が決定できない
  - 物体が有限の可動範囲を有するため

# 従来研究(移動ロボット)

- Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots [Wang 2002]
  - 複数移動ロボットによる平面ケーシング



複数移動ロボットによるケーシング

# 従来研究(多指ハンド)

- Caging planar bodies by one-parameter two-fingered gripping systems [Rimon 1999]
  - 2指グリッパによる平面ケーシング
- Two-finger squeezing caging of polygonal and polyhedral object [Pipattanasomporn 2007]
  - 2指ハンドによる凹物体のケーシング



平面におけるケーシングがベースになっている

→3次元空間におけるケーシング  
(特に多指ハンドによるもの)の例は少ない

# 研究目的

## 多指ハンドによる3次元ケーシング 実現のための基礎理論の構築

### Approach

- 多指ハンドによるケーシングの成立条件の定式化
- いくつかの代表例についてケーシング成立のための十分条件を導出
- ケーシングを成立させるロボット指の配置を計算

## 2. ケーシング成立条件の定式化

- $i$  番目の指の  $j$  番目のリンクが障害物となって対象物が動くことのできない  $C$  空間障害物領域:  $C_{ij}$

$$C_{ij} = \{ \mathbf{q}_{ij}(\boldsymbol{\theta}_i) \in C \mid \mathcal{A}_{\text{obj}}(\mathbf{q}_{\text{obj}}) \cap \mathcal{A}_{ij}(\mathbf{q}_{ij}(\boldsymbol{\theta}_i)) \neq \emptyset \}$$

- パームによる  $C$  障害物:  $C_{\text{plm}}$

$$C_{\text{plm}} = \{ \mathbf{q}_{\text{plm}} \in C \mid \mathcal{A}_{\text{obj}}(\mathbf{q}_{\text{obj}}) \cap \mathcal{A}_{\text{plm}}(\mathbf{q}_{\text{plm}}) \neq \emptyset \}$$

- ロボットによる  $C$  障害物:  $C_{\text{rob}}$

$$C_{\text{rob}} = \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{j=1}^{L_i} C_{ij} \cup C_{\text{plm}}$$

# ケーシング成立条件の定式化

- 対象物がロボットに遮られずに動くことのできる C 空間自由領域:  $C_{\text{free}}$

$$C_{\text{free}} = C \setminus C_{\text{rob}} = C \setminus \left( \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{j=1}^{L_i} C_{ij} \cup C_{\text{plm}} \right)$$

## ケーシング成立条件

- $C_{\text{rob}}$  によって囲まれた C 自由空間:  $C_{\text{free\_obj}}$  が存在し、かつ無限遠点を含む C 自由空間:  $C_{\text{free\_inf}}$  と共有空間を持たない

$$q_{\text{obj}} \in C_{\text{free\_obj}} \neq \emptyset$$

$$C_{\text{free\_obj}} \cap C_{\text{free\_inf}} = \emptyset$$



# 3. ケーシング成立の十分条件の導出

- 仮定

- 対象物・ロボットは剛体
- ロボット指のリンクは線分で近似
- ロボットの関節の大きさは無視
- パームは正N角形の平板で近似する
- 指はパームの各頂点に配置する
- すべての指について各関節の角度は等しいとする

$$\theta_{1j} = \theta_{2j} = \cdots = \theta_{Nj} (= \theta_j) \quad (j = 1, \dots, L)$$
$$\therefore \theta_i = \theta \quad (i = 1, \dots, N)$$

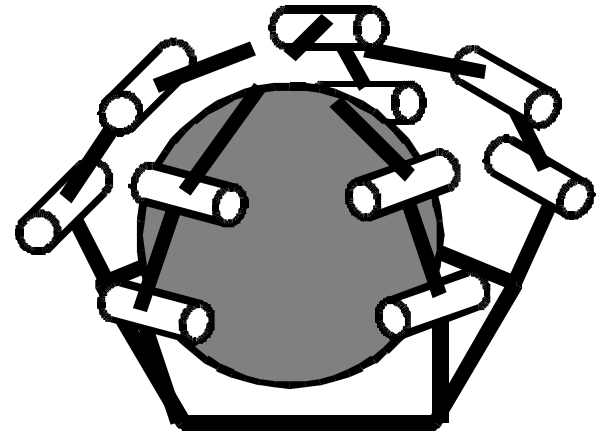
$L$  : Number of joints     $N$  : Number of fingers

# 3-1. 球のケーシング

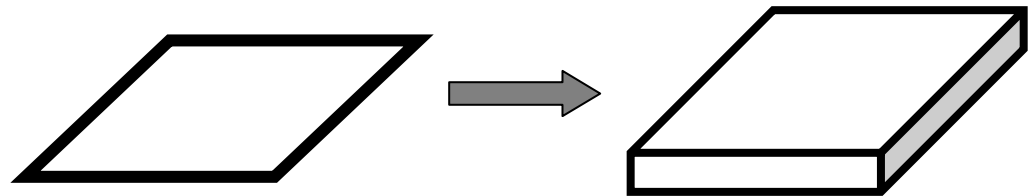
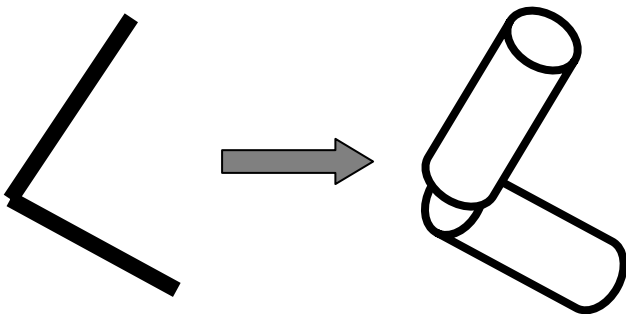
## ケーシング成立の条件

“指と指の間から対象物が  
抜けないこと”

- ロボットによる C 障害物を考える
  - 線分のリンク → 半径  $r$  の円柱
  - 平面のパーム → 厚さ  $r$  の平板

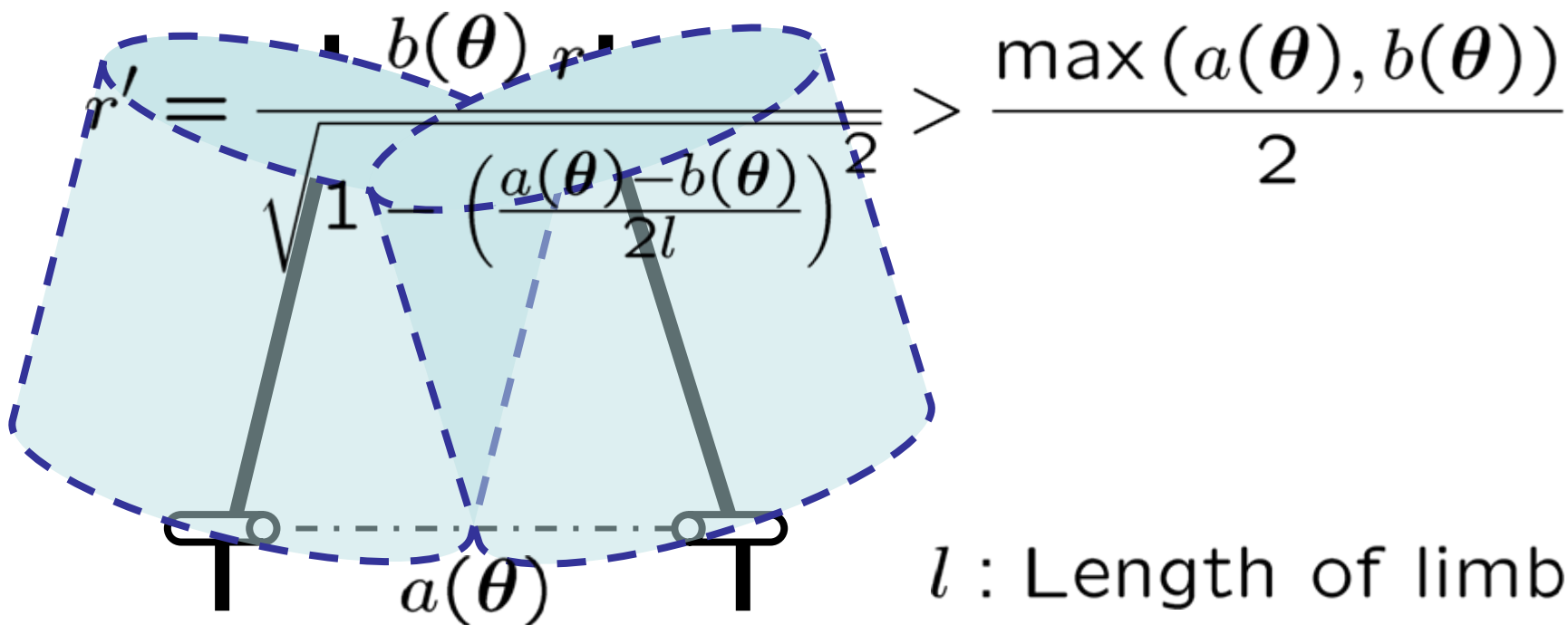


(対象物の半径:  $r$ )



# 球のケーシング：十分条件の定式化

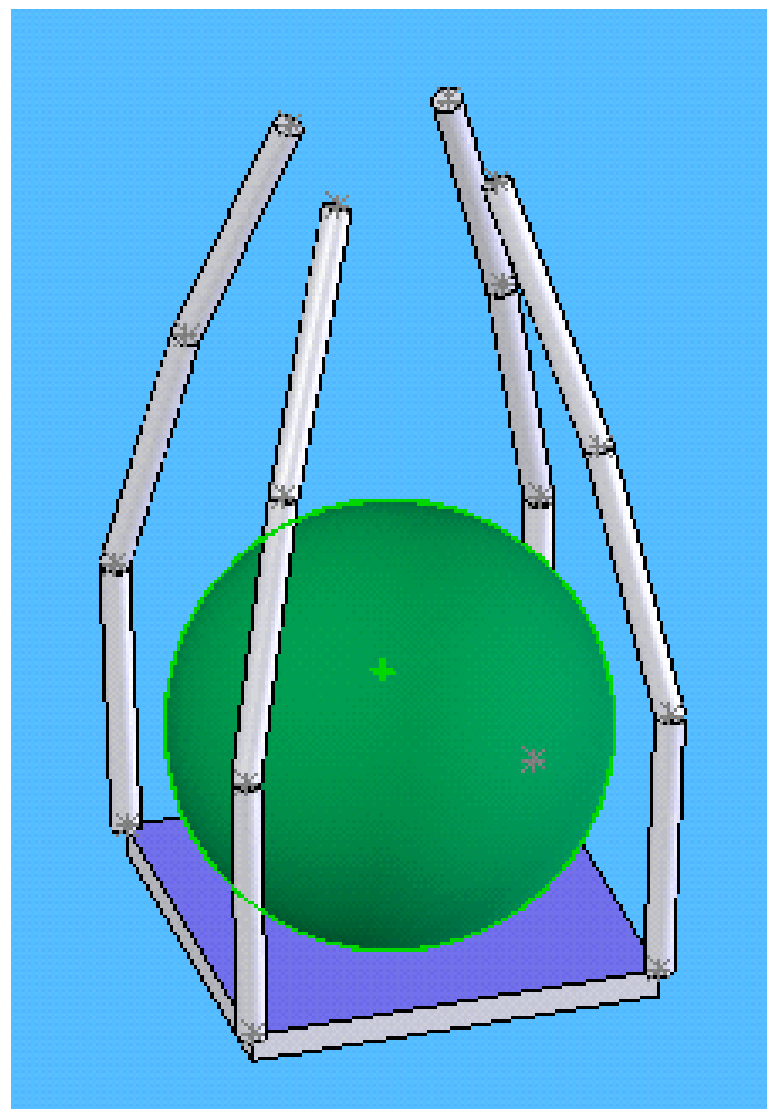
- ロボット指関節および指先を頂点とする多面体を考える  
 → 各面が C 障害物で埋め尽くされれば良い



$l$  : Length of limb

# 球のケーシング: 計算結果

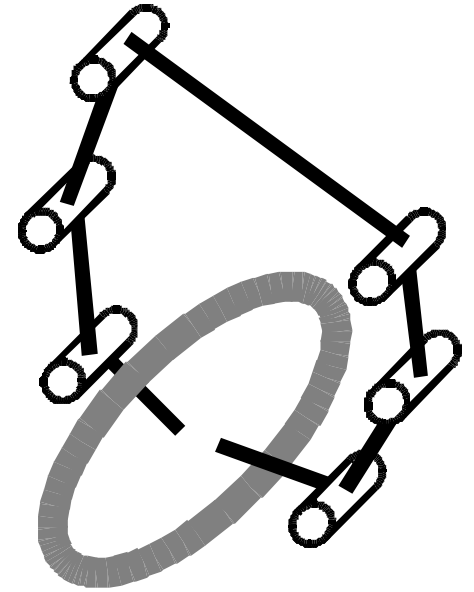
$$\theta = \begin{pmatrix} 1.61267 \\ 0.31424 \\ 0.12605 \end{pmatrix} \text{ [rad]}$$



## 3-2. リング状物体のケーシング

### ケーシング成立の条件

“ロボット指が対象物の穴の中を  
通り, かつ指の間の距離が対象物  
の太さ未満であること”

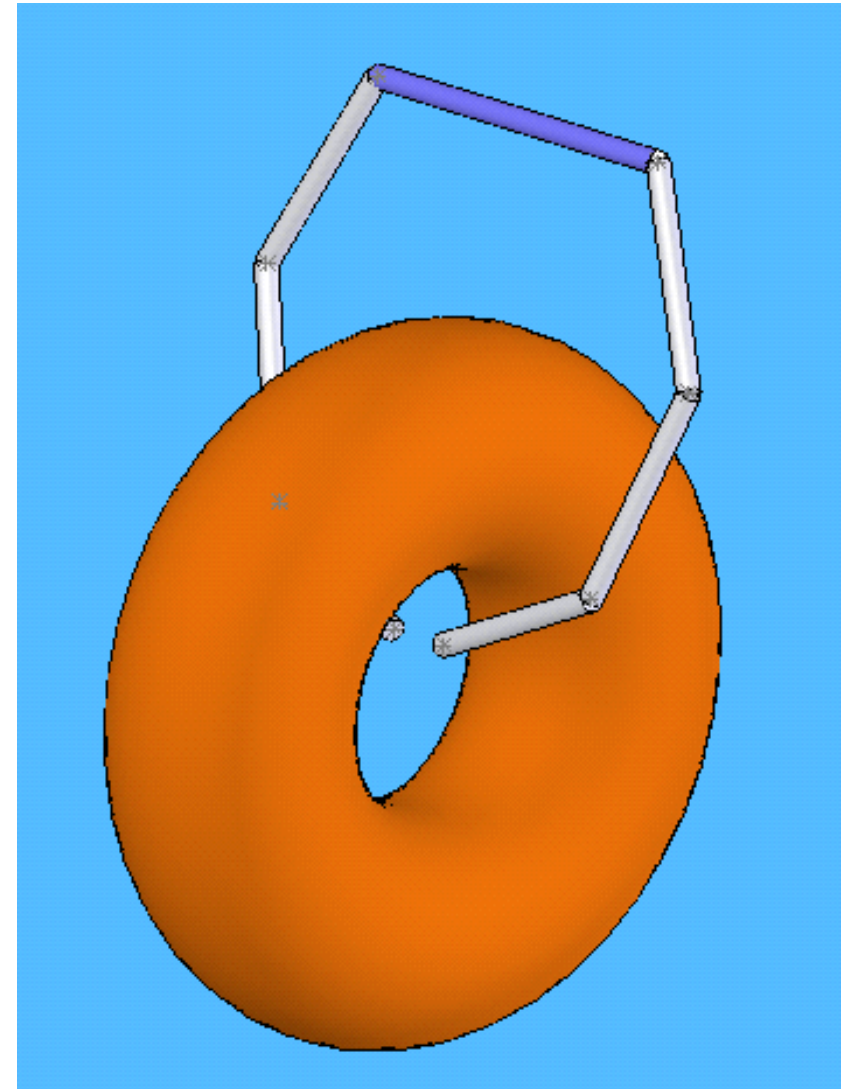


(対象物の太さ:  $2r$ )

$$\| {}^B p_{2E}(\theta) - {}^B p_{1E}(\theta) \| < 2r$$

# リング状物体のケーシング: 計算結果

$$\theta = \begin{pmatrix} 1.04309 \\ 0.93079 \\ 0.80550 \end{pmatrix} \text{ [rad]}$$



## 4. まとめ

- 多指ハンドによる3次元ケーシングの基礎理論
  - ケーシング成立条件の定式化
- いくつかの代表例におけるケーシング成立の十分条件の導出
  - 球のケーシング
  - リング状物体のケーシング

### 今後の展望

- ケーシングアプローチの計画(障害物回避)
- より多くの例について十分条件の導出