

多指ハンドによる三次元ケーシングの 定式化と計画

Formulation and Planning of
3D Multifingered Caging

榎田 諭（横浜国立大学），渡邊匠，前田雄介
makita@iir.me.ynu.ac.jp

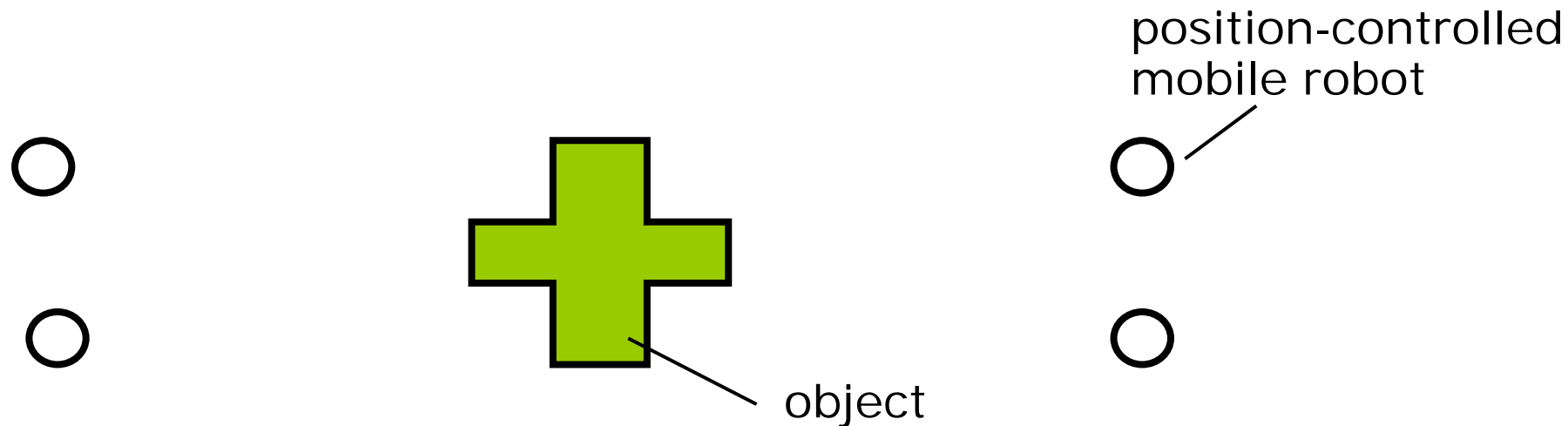


1. ケーシングとは
2. 三次元多指ケーシングの成立条件
3. RRTを用いた動作計画手法
4. 計画結果
5. まとめ

ケーシングとは？

- ロボットによる幾何学的な物体拘束手法

対象物はロボットによって構築される「ケージ」の中でしか動けない



位置制御ロボットによる物体拘束のため，力制御が不要
フォーメーションの維持だけで，物体搬送が可能

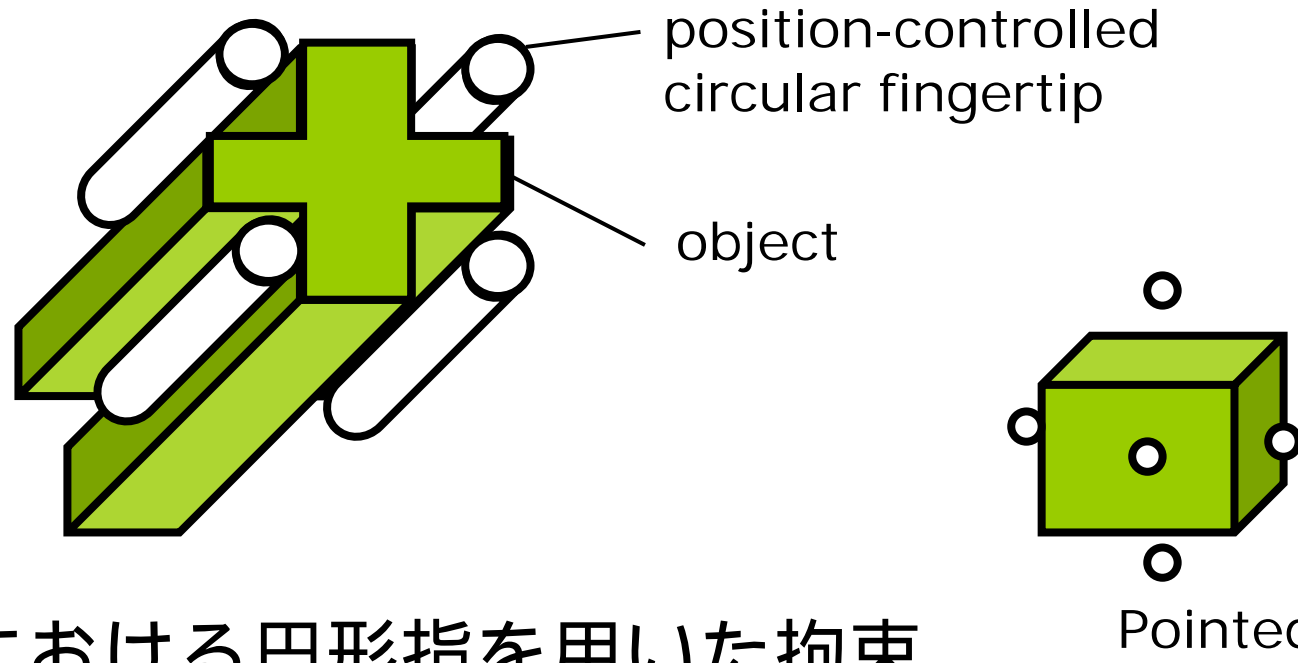
従来の多指ハンドケーシング

- 従来研究

[Rimon 1996,1999]

[Pipattanasomporn 2007,2008]

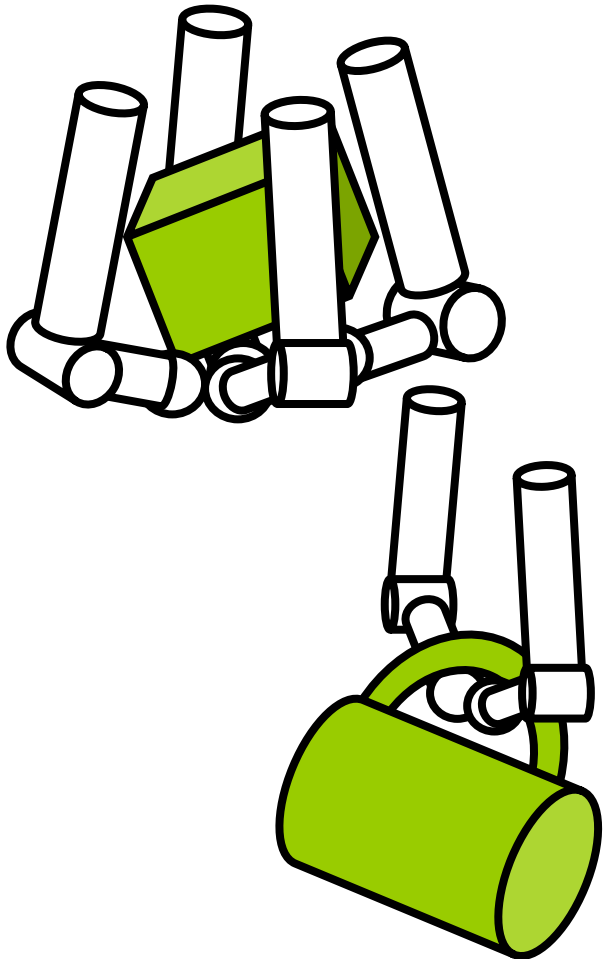
...



二次元空間における円形指を用いた拘束
三次元空間にも拡張可能な例はあった

提案する三次元多指ケージング

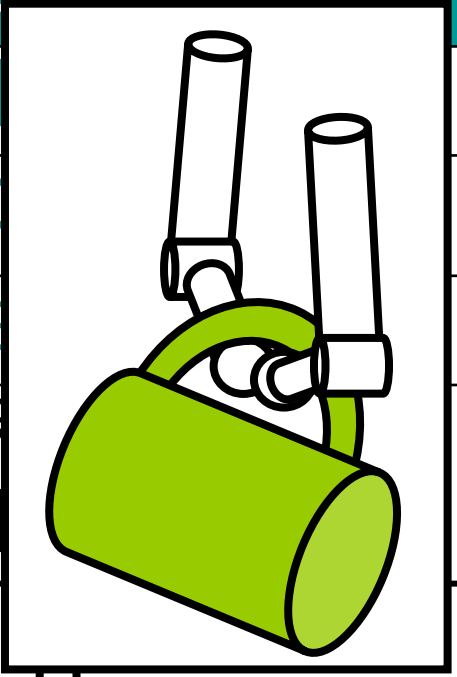
位置制御された多指ハンドによる物体拘束



把持とケーシングの比較

	把持	ケーシング
制御	力制御	位置制御
拘束に必要な情報	多い	状態の自由度
ハンドの自由度	一般	自由
対象物の位置, 姿勢	決定される	ある程度 つ(重)

- 形状
- 質量
- 剛性
- ...



拘束のマージンを取ることで、位置制御誤差、モデル化誤差などがある程度許容できる（変形、移動も？）

物体とハンドの相対スケールに制約がある

研究目的

- **多指ハンドによる三次元ケーシングの実現**

 - 問題の定式化

 - ケーシング成立の十分条件の導出

 - ケーシングを行うロボットの動作計画

- **アプローチ**

 - 単純形状の物体に対するケーシングの成立条件の導出

 - 複雑形状物体への適用

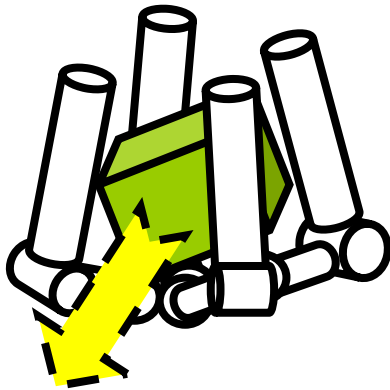
 - RRTを用いた動作計画

ケーシングの定義

ケーシング

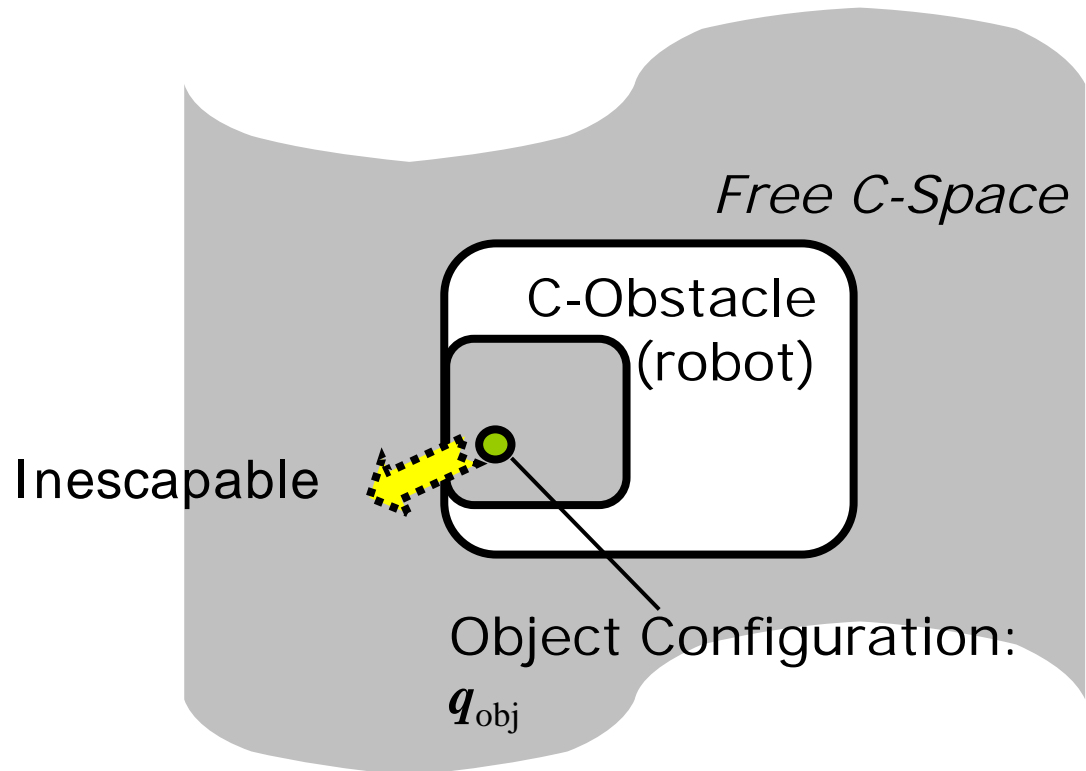
= ロボットによって構築された閉鎖領域に対象物を拘束する

[実空間]



Inescapable

[対象物コンフィギュレーション空間]



Inescapable

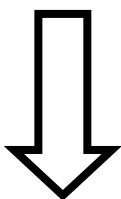
三次元多指ケージングの定式化

- 必要十分条件の定式化が困難

三次元多指ケージングは多様である

閉鎖領域が複雑になる

- 六次元のコンフィギュレーション空間内



ケージング成立の十分条件の導出

ケージング成立のためのロボットハンドの配置

- 関節変数
- 位置・姿勢

ケーシング成立の十分条件

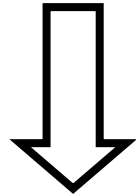
- 対象物が逃げられないような閉鎖拘束領域を構築する
 - ロボットハンドの作るケージから対象物が抜け出さない条件
- 閉鎖領域内に対象物が存在する
 - 内外判定
- ロボットが対象物と干渉していない
 - 衝突判定

対象物が逃げられないようにする条件

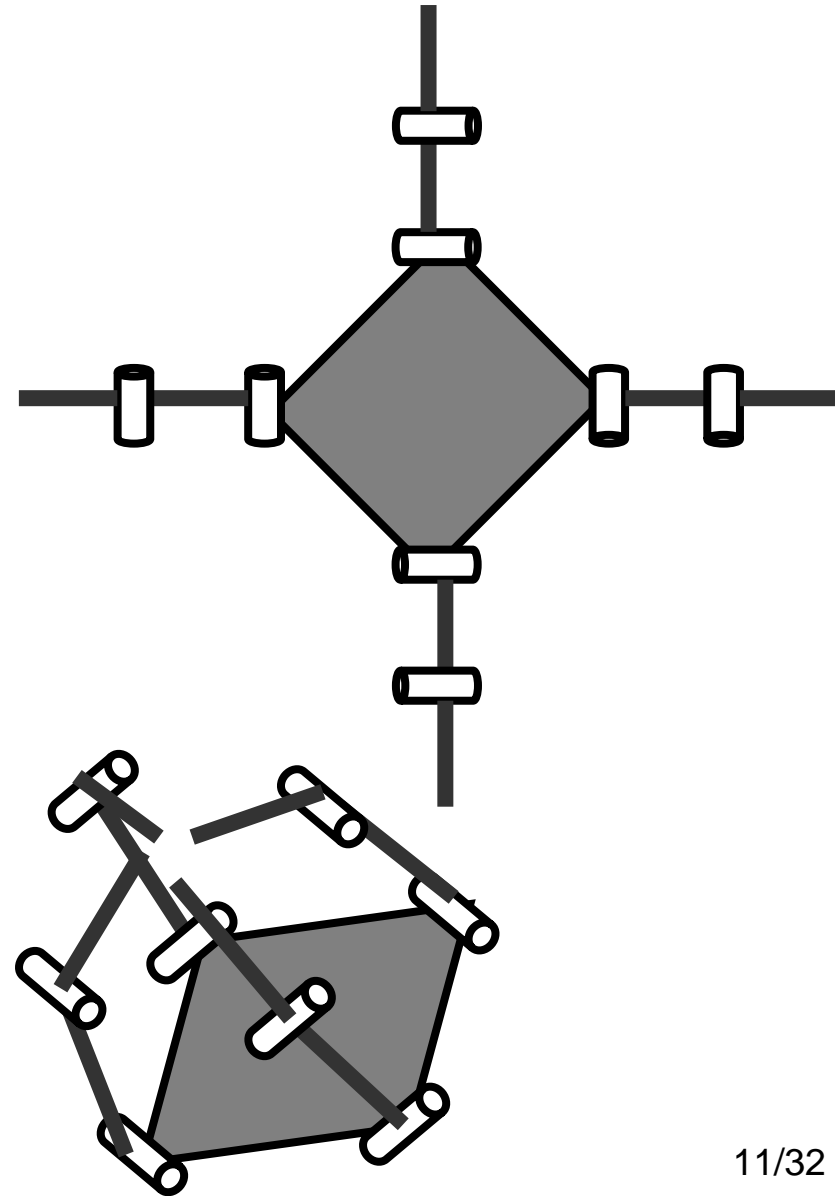
- いくつかの単純な形状について，拘束条件を導出
 - 球
 - 円板
 - リング状物体
- 単純形状をプリミティブとした複雑な形状の物体の拘束条件
 - 単純な形状に近似
 - 単純な形状の組み合わせ

対称ロボットハンド

- 十分条件の導出のしやすさ
- 動作計画のしやすさ



各指は同数の関節を持つ
指の関節は回転関節
細い円柱のリンク
指は同心円上の等間隔に配置
各指はパームに垂直な中心線に
対して回転対称的に動く



球の拘束条件

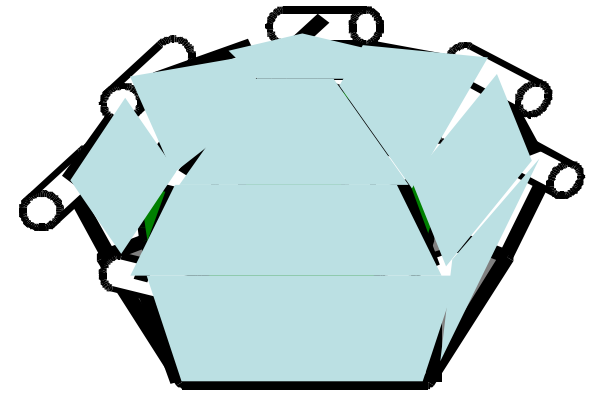
- 球

半径 r_{sphere}

- ロボットハンド

N本指

j番目のリンクの長さ : l_j



球がロボット指の間の面から抜け出せない

指のリンク間の台形面

指先を頂点とする正多角形面

球の拘束条件

- ロボット指の間の台形面

$$\frac{r_{\text{sphere}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_j(\bar{\theta}) - d_{j+1}(\bar{\theta})}{2l_j}\right)^2}} > \max\left(\frac{d_j(\bar{\theta})}{2}, \frac{d_{j+1}(\bar{\theta})}{2}\right) \quad (j = 1, \dots, \bar{L})$$

(d_j : distance between j th joints)

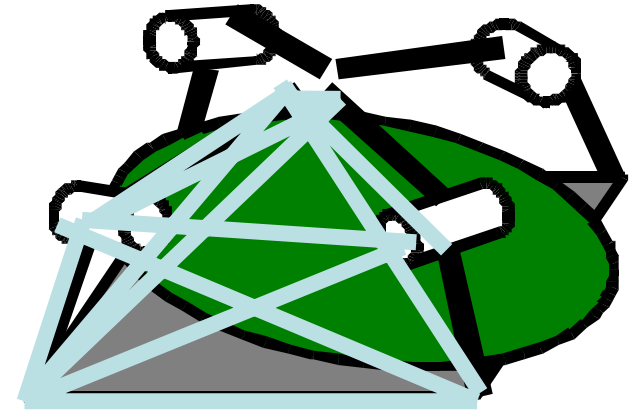
- 指先を頂点とする正多角形面

$$r_c(\bar{\theta}) < r_{\text{sphere}}$$

(r_c : distance between fingertip and center axis)

円板の拘束条件

- 円板
半径: r_{disk}
厚さ: t_{disk}
- ロボットハンド
N本指



円板がロボット指の間から抜け出せない
関節と関節, または関節と指先の間
指先同士の間

円板の拘束条件

- 関節と関節，または関節と指先との距離

$$d_{ijk}(\bar{\theta}) < 2r_{\text{disk}} \quad (k \neq j)$$

$$d_{ij(i+1)k}(\bar{\theta}) < 2r_{\text{disk}}$$

$$(i = 1, \dots, N) \quad (j = 1, \dots, \bar{L}) \quad (k = 1, \dots, \bar{L} + 1)$$

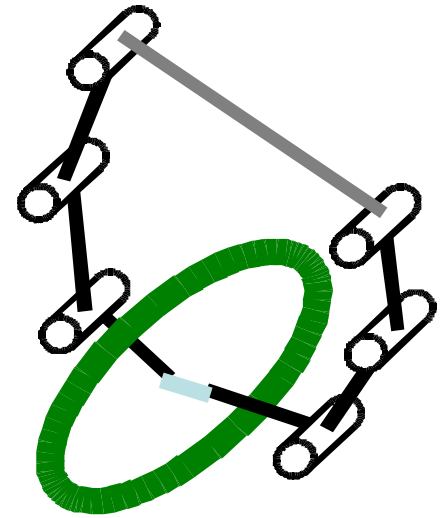
(d_{ijkl} : Distance between j th joint of i th finger and l th body of k th finger)

- 指先同士との距離

$$2r_c(\bar{\theta}) < t_{\text{disk}}$$

リング状物体の拘束条件

- リング状物体 (c.f. トーラス)
物体の最小太さ: d_{ring}
- ロボットハンド
2指



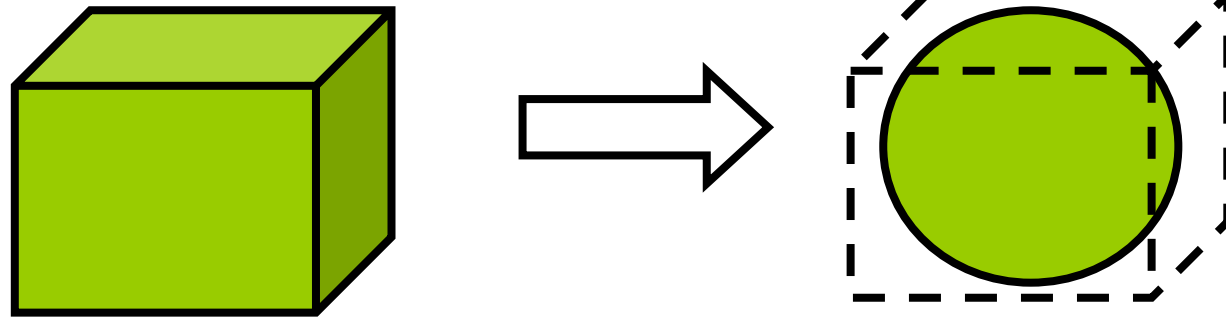
リング状物体が指先の間から抜けない

$$d_{L+1}(\bar{\theta}) < d_{\text{ring}}$$

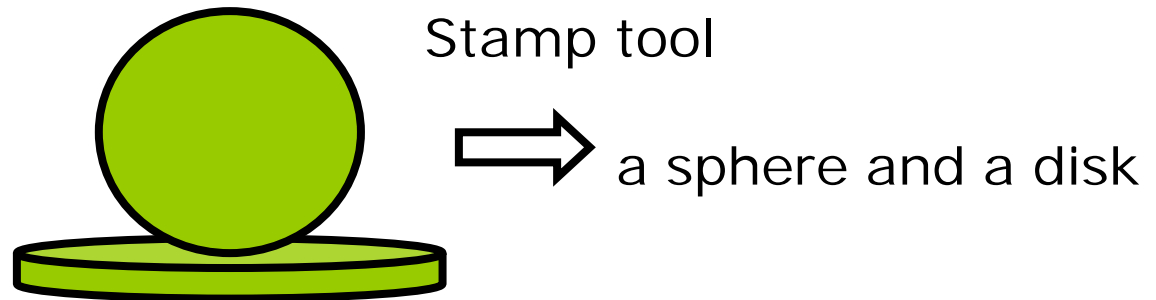
複雑な形状の物体の拘束条件

単純な形状をプリミティブとする

- 内包する単純な形状の物体に近似する

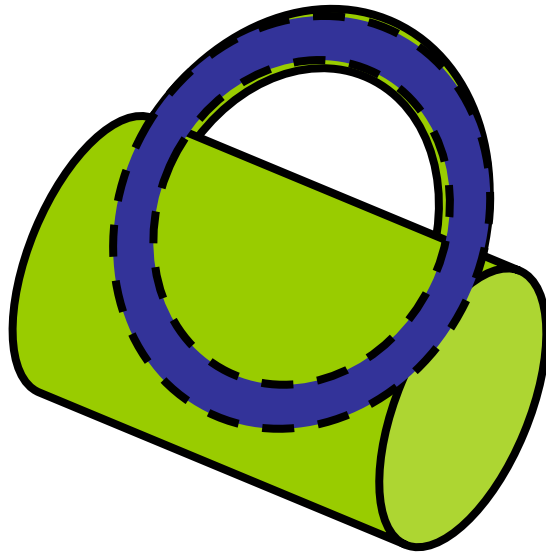


- 単純な形状の組み合わせと考える



複雑な形状の物体の拘束条件

- 対象物の一部に着目する



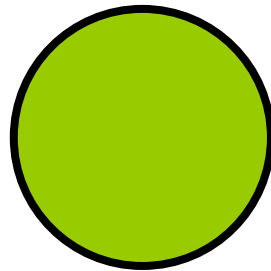
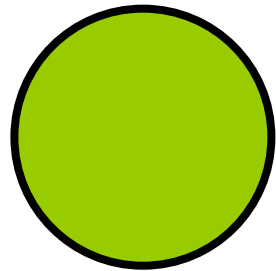
リング状物体のケーシング

ケーシング成立の十分条件

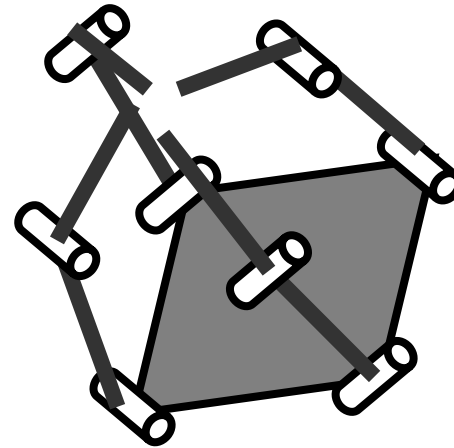
- 対象物が逃げられないような閉鎖拘束領域を構築する
 - ロボットハンドの作るケージから対象物が抜け出さない条件
- 閉鎖領域内に対象物が存在する
 - 内外判定
- ロボットが対象物と干渉していない
 - 衝突判定

対象物の拘束領域に対する内外判定

- 対象物が逃げられないように拘束する領域に，対象物が入っているかどうか



Not Caging!

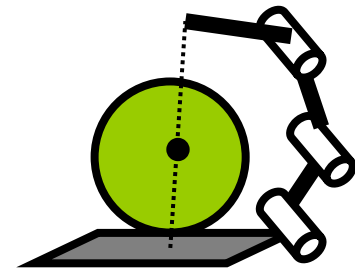


対象物の拘束領域に対する内外判定

- 球，円板のケーシング

(ハンドと対象物は十分に近づいている)

⇒ パームと指先を結ぶ線分の中点の対象物の内部にある

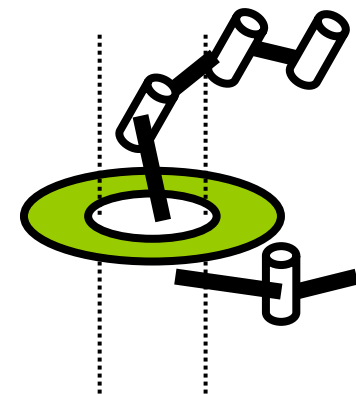


- リング状物体のケーシング

(ハンドと対象物はHopf linkを形成する)

⇒ パームと指先を結ぶ線分の中点の対象物の内部にある

少なくとも一つのリンクまたは両方の指先が対象物の穴の領域にある



ケーシング成立の十分条件

- 対象物が逃げられないような閉鎖拘束領域を構築する
 - ロボットハンドの作るケージから対象物が抜け出さない条件
- 閉鎖領域内に対象物が存在する
 - 内外判定
- ロボットが対象物と干渉していない
 - 衝突判定

ロボットと対象物が干渉しないこと

- 衝突判定ライブラリPQP (A Proximity Query Package)を使う
 - ポリゴンを作って，各面同士で干渉がないかどうか調べる

ケーシング成立の十分条件（まとめ）

- 対象物がロボットの拘束から抜け出せない
球，円板，リング状物体について，拘束する条件を導出
複雑形状への適用方法を提案
- 対象物の閉鎖領域に対する内外判定
球，円板，リング状物体について，内外判定条件の導出
- ロボットと対象物が干渉しない
PQPを用いた干渉チェックの導入

ケーシングの動作計画

- “Rapidly-exploring Random Trees (RRT)” [LaValle 1998]を適用する

RRT: ランダムサンプリングを用いた経路探索

探索空間

$$z = \left[\bar{\theta}^T, p_{\text{plm}}^T, o_{\text{plm}}^T \right]^T$$

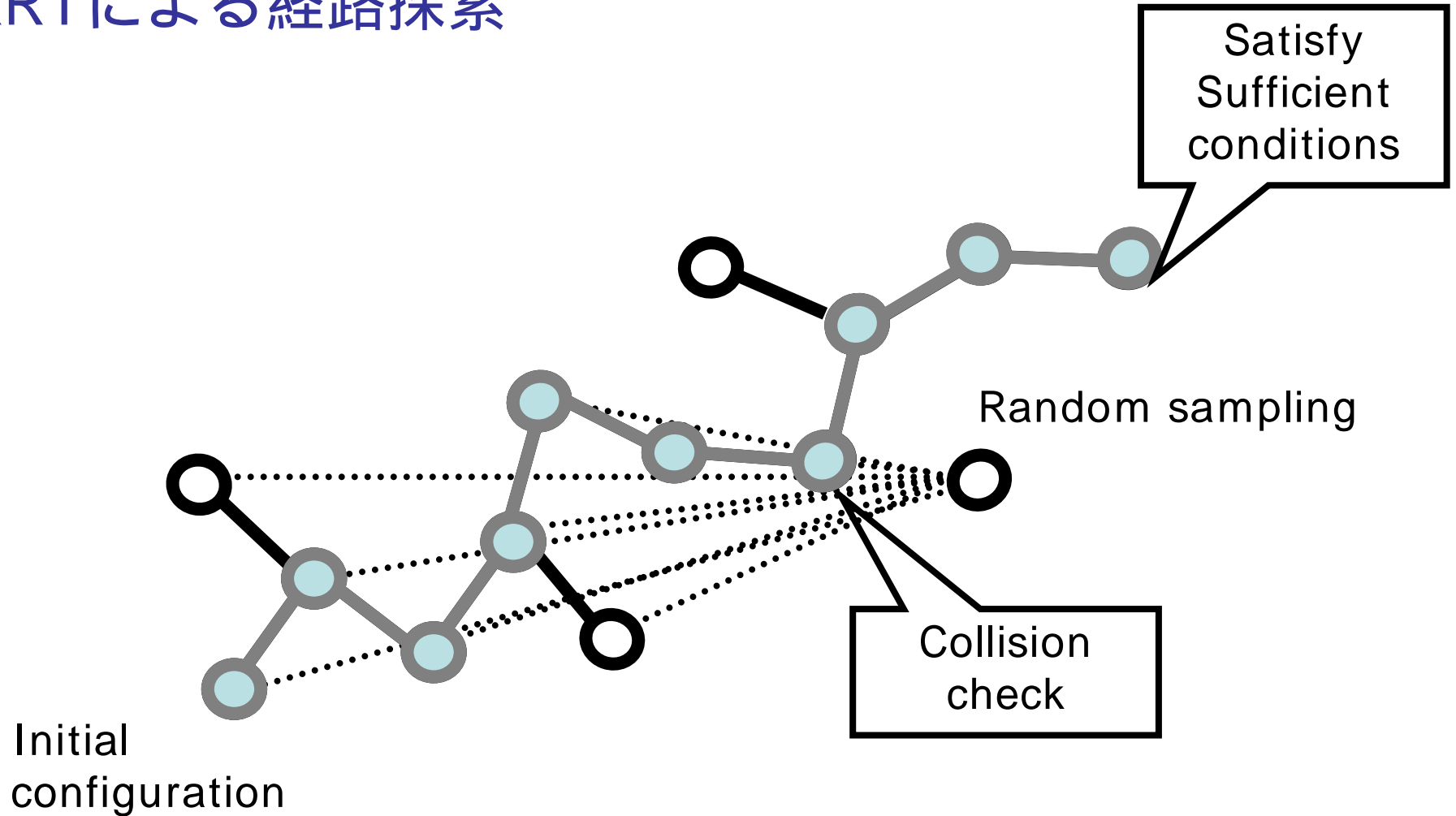
$\bar{\theta}$: Joint variables of finger

p_{plm} : position of the palm

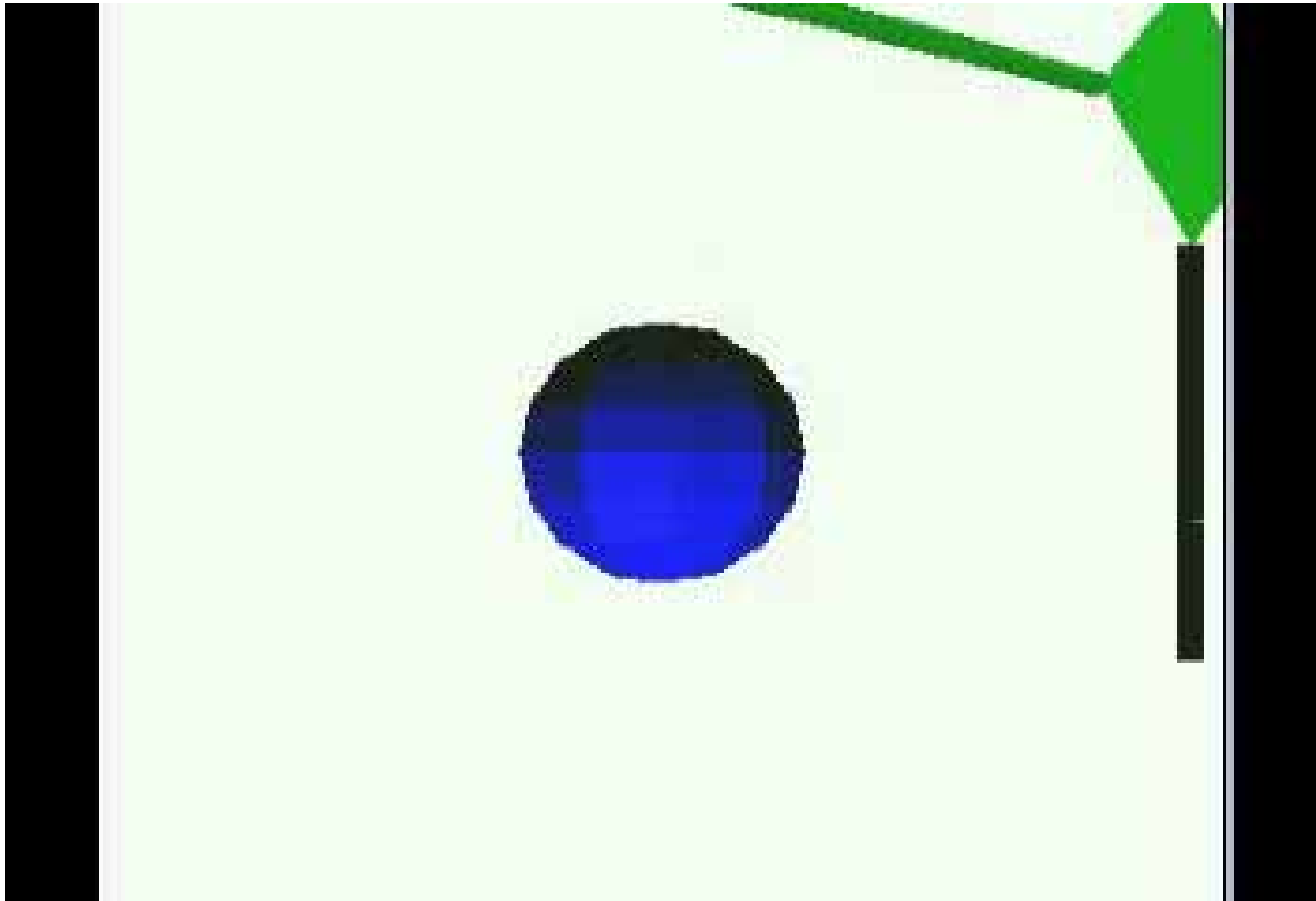
o_{plm} : orientation of the palm

動作計画手順

- RRTによる経路探索

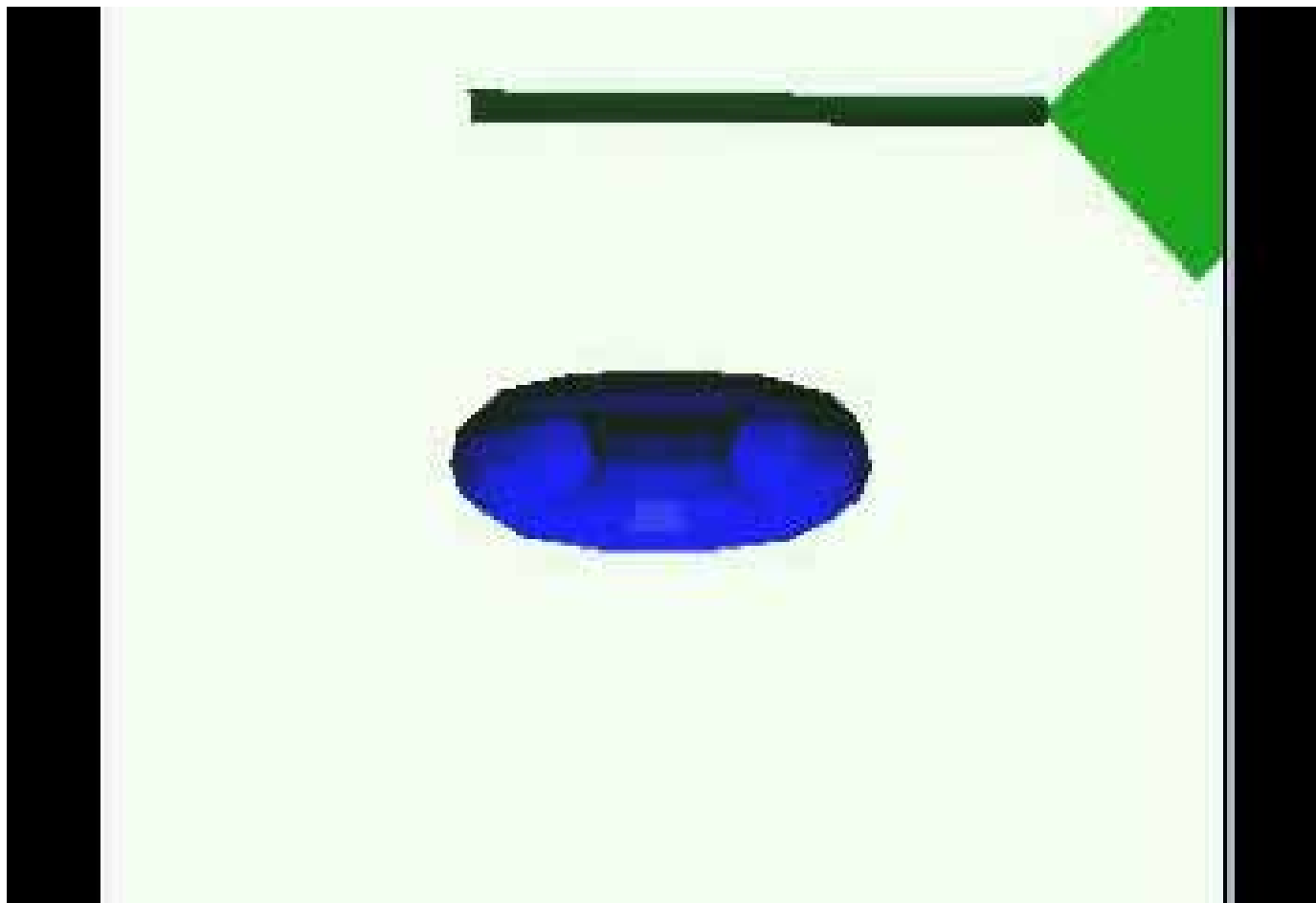


計画結果：球のケーシング



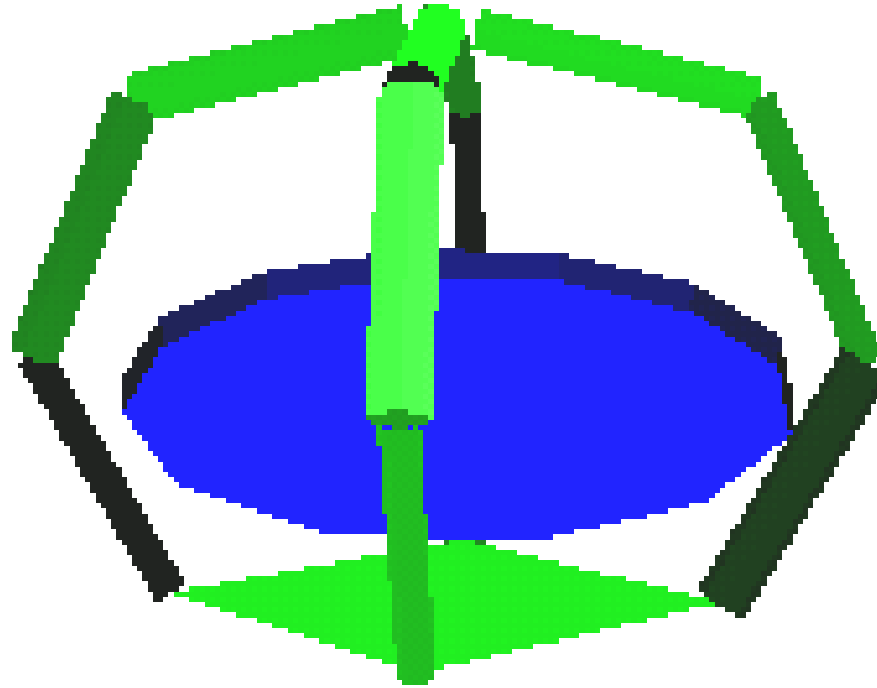
Planning time: 243 CPU minutes (in this case)
(Linux PC CPU Core2 Quad 2.66GHz)

計画結果：リング状物体のケーシング



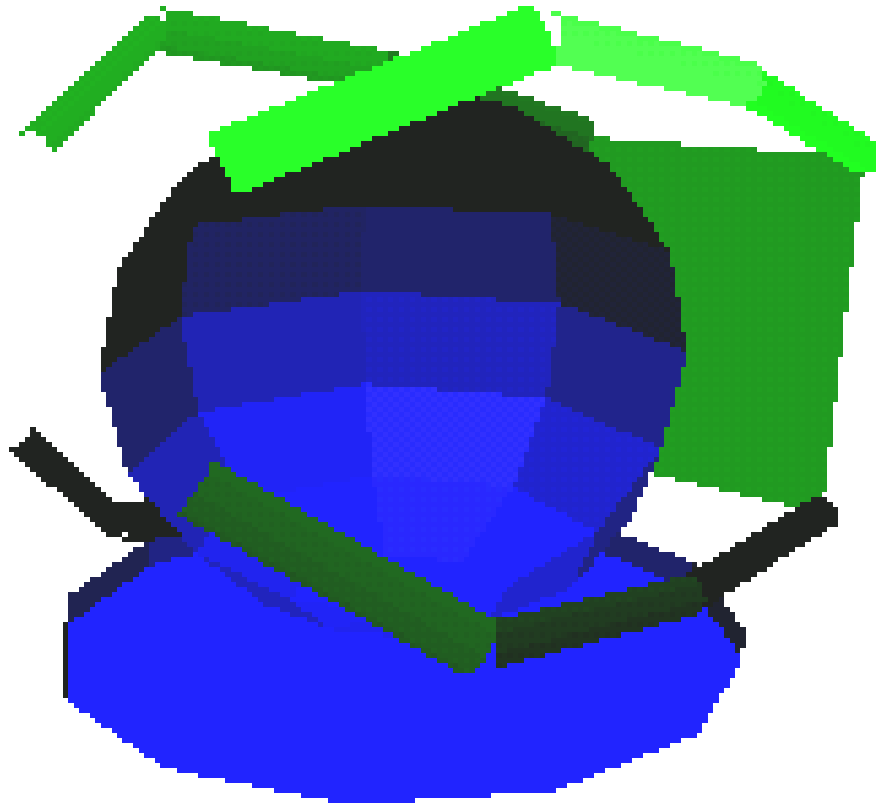
Planning time: 1.8 CPU seconds (in this case)

計画結果：円板のケーシング



Planning time: 22 CPU minutes (in this case)

計画結果：スタンプのケーシング



円板の障害物の上に
置かれた球と考える
こともできる

Planning time: 16 CPU minutes (in this case)

まとめ

多指ハンドによる三次元ケーシングの提案

- 三次元多指ケーシングの十分条件の導出

閉鎖領域をつくり，対象物が逃げられないようにする条件

- 球
- 円板
- リング状物体

対象物の閉鎖領域に対する内外判定

- 包み込みケーシング
- フックケーシング

ロボットと対象物との干渉チェック（PQPを利用）

- RRTを利用した動作計画アルゴリズムの構築

今後の展望

- より多くの対象物に対するケーシング
 - 複雑な形状の物体
 - 十分条件をより多く、汎用的な条件を導く
- さまざまな環境下でのケーシング
 - 障害物がある場合
 - 対象物が運動している場合
- ほかのロボットマニピュレーションとの組み合わせ
 - 把持への遷移
 - グラスプレス・マニピュレーションからの遷移