

平成21年5月28日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760175  
 研究課題名 (和文) 棒状物体の摩擦不感型動的捕獲アルゴリズム  
 研究課題名 (英文) Friction Independent Dynamic Capturing Algorithm for a Stick-Shaped Object  
 研究代表者  
 東森 充 (HIGASHIMORI MITSURU)  
 大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：30346522

研究成果の概要：本研究では、三次元空間において、任意の並進および回転運動を有する棒状物体をロボットハンドによって捕獲するためのアルゴリズムを構築した。ハンドの指先と対象物との間の接触摩擦の影響を受けない状態で衝突を行うことにより、対象物の運動を制御する手法を示した。この手法により、最終的に対象物をハンドの指先内で静止させるための動作計画を示した。シミュレーションと実機実験により、提案手法の有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトが対象物を把握しようとする場合、対象物の形状に適した指姿勢を形成しつつ対象物にアプローチする。このような **Preshaping** 動作は、多指ロボットハンドによる物体捕獲動作において、捕獲の成功率を向上させるために重要なキーとなる。従来より、**Preshaping** や把持、操りに関する多くの研究が行われてきているが、ほとんどの研究においては、対象物が静止しているかゆっくり運動しているような条件の下で、ハンドの運動を決定する問題を取り扱ってきている。一方、近年のセンシング速度やアクチュエーション技術の向上に伴い、運動物体を追

尾したり操ったりすることが可能になってきた。ただし、以上のような研究では、ほとんどの場合、球や円形といった単純な対象物形状が取り扱われている。これに対し、ハンドから見た対象物姿勢が回転運動によって時々刻々と変化するような物体を捕獲する場合、初期状態から捕獲を完成するまでの過程において、衝突ダイナミクスに基づいた対象物の姿勢制御と指先の運動計画を立てることが重要となる。申請者らは、二次元平面内で運動する棒状物体とロボットハンドによる捕獲問題を取り扱い、指先と対象物との間の接触摩擦に依存することなく棒状物体の衝突後速度を制御することができる“摩擦

不感型衝突を導入した。この特殊な衝突を利用し、回転と並進運動を有する棒状物体を捕獲するための“摩擦不感型動的捕獲アルゴリズム”を構築している。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述のアルゴリズムを拡張し、三次元空間において、任意の並進および回転運動を有する棒状物体を最終的に捕獲するためのアルゴリズムを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

二次元平面問題として確立されている摩擦不感型衝突を利用した棒状物体の誘導および捕獲アルゴリズムを、三次元空間における問題へと拡張する。任意の並進および回転運動を有する棒状対象物とロボットハンドの指先との衝突ダイナミクスを、反発係数  $e$  および摩擦係数を用いてしてモデル化する。このとき、二次元水平面問題と異なり、一般的には、対象物と指先との間の接触摩擦に依存することなく衝突を起こすことは不可能である。したがって、衝突前後の対象物運動を解析し、任意の並進3自由度、回転3自由度に対して、摩擦依存運動成分と摩擦不感運動成分の分類を明らかにする。ここで得られる摩擦不感運動成分を制御しつつ、複数回の衝突を繰り返し、最終的に捕獲状態へと帰着するような指先衝突位置の決定アルゴリズムを構築するし、アルゴリズムの有効性を実験的に確認する。

## 4. 研究成果

### ● 捕獲戦略の構築

棒状対象物を指先で捕獲する戦略として、ここでは、2-step 捕獲戦略の概念を三次元へと拡張する。図1に示すような棒状(円柱)対象物とロボットの指先を考える。ただし、 $\Sigma_R$ ,  $\Sigma_B$ ,  $m_B$ ,  $I_B$ ,  $L$ ,  $W$  はそれぞれ、基準座標系、対象物座標系、対象物の質量、重心を通り  $x_B$  軸と直交する任意の軸まわりの慣性モーメント、長さ、直径である。なお、 $\Sigma_B$  は  $x_B$  軸が棒状対象物の長手軸と一致する

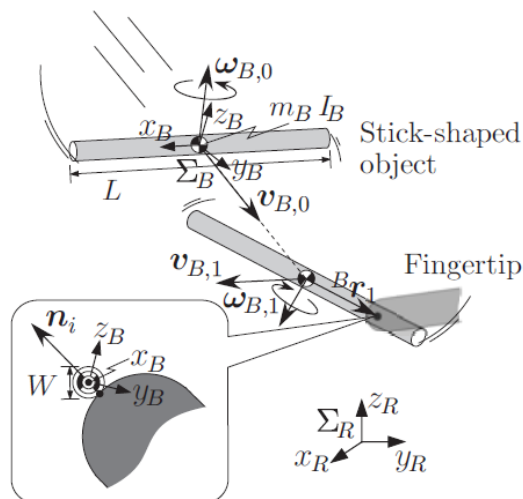


図1 衝突モデル

ように重心位置に固定されているものとする。 $v_{B,i}$ ,  $\omega_{B,i}$  はそれぞれ  $\Sigma_R$  から見た第  $i$  衝突 ( $i = 1, 2, \dots$ ) 後の対象物の並進および回転角速度ベクトル、 $n_i$  は  $\Sigma_R$  から

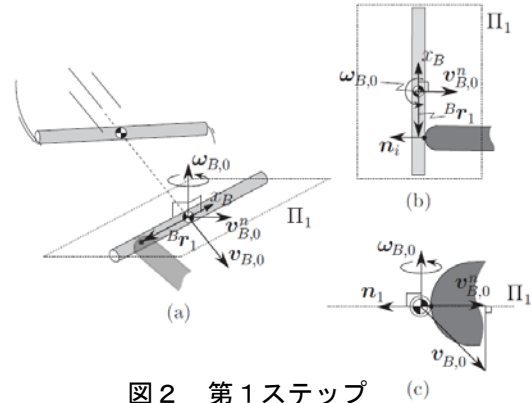


図2 第1ステップ

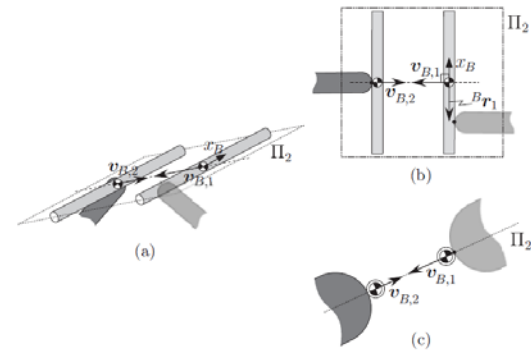


図3 第2ステップ

見た第  $i$  衝突時の接触点における法線方向単位ベクトル、 $B_{T_i}$  は  $\Sigma_B$  から見た第  $i$  衝突時の接触位置ベクトルとする。ここでは、問題の本質を失わない範囲で、簡単化するため、以下の仮定を設けた。

1. 棒状対象物の太さは無視できる程微小とする ( $W \approx 0$ )。
2. 対象物は初期相で並進および回転角速度 ( $v_{B,0}$ ,  $\omega_{B,0}$ ) を有する。ただし、 $x_B$  周りの角速度は持たないものとする。
3. 対象物と指先の間には、反発係数  $e$  に基づくニュートンの剛体衝突モデルを仮定する。
4. 対象物と指先の衝突は点接触を仮定し、衝突は対象物の側面のみで起こるものとする。また、衝突中に指先は動かないものとする。
5. ハンドの指先位置のみに着目し、指リンクやアームの運動、対象物との干渉は考えない。
6. 重力の影響は考えない。

以上の条件設定の下で、棒状対象物を指先で捕獲する戦略として、ここでは、2-step 捕獲戦略の概念を三次元へと拡張する。

【Step 1】図 2 (a) は、第 1 衝突の瞬間における対象物と指先を示している。ここで、 $\Pi_1$ ,  $v_{B,0}$  は、それぞれ角速度ベクトル  $\omega_{B,i}$  と直交する平面、 $v_{B,0}$  を  $\Pi_1$  へ射影した速度ベクトルである。また、図 2 (b), (c) は、それぞれ図 2 (a) を面  $\Pi_1$  上から見た図、 $v_{B,0}$  と  $\omega_{B,0}$  によって張られる面から見た図を示している。この第 1 衝突において、図 2 (b) に示すように  $v_{B,0}$  と  $x_B$  軸が直交するように、かつ、図 2 (c) に示すように法線ベクトル  $n_1$  が面  $\Pi_1$  内に存在するように衝突させることを考える。このとき、面  $\Pi_1$  内の二次元衝突現象に限定して考えれば、接触点において  $x_B$  軸方向への摩擦が作用しないことから摩擦不感型衝突が成立する。したがって、面  $\Pi_1$  における対象物の並進および回転運動制御について、先行研究で示されている指先接触位置  $Br_i$  の算出法をそのまま適用することができる。このとき、対象物の回転運動は面  $\Pi_1$  内のみ存在するため、衝突後の回転運動を完全に除去することが可能となる ( $\omega_{B,1} = 0$ )。また、並進運動に関しては、 $x_B$  軸方向について摩擦力が作用しないことから、 $x_B$  と直交する  $v_{B,1}$  が生成される。以上のような第 1 衝突が成立する条件は、次式で表すことができる。

$$\left( (e_{Bx,0})^T v_{B,0} = 0 \right) \cap \left( n_1 = \frac{-\omega_{B,0} \times e_{Bx,0}}{\|\omega_{B,0} \times e_{Bx,0}\|} \right)$$

ただし、 $e_{Bx,0}$  は、 $\Sigma_R$  から見た第 1 衝突時の  $x_B$  軸方向単位ベクトルである。

【Step 2】図 3 (a) において、 $\Pi_2$  は  $v_{B,1}$  と  $x_B$  軸によって張られる面を示している。図 3 (b), (c) は、それぞれ面  $\Pi_2$  上から見た図、 $x_B$  軸と直交する方向から見た図である。第 2 衝突以降 ( $i \geq 2$ ) では、図 3 (a) ~ (c) に示すように、常に法線ベクトル  $n_{B,i}$  が面  $\Pi_2$  内に存在するようにしながら対象物の重心位置に対して指先を衝突させる。このような衝突を対象物の両側から繰り返すことにより、対象物は面  $\Pi_2$  において長手軸に直交した並進往復運動を行い、最終的に静止する ( $v_{B,i} \rightarrow 0$ ,  $\omega_{B,i} = 0$ )。

#### ●シミュレーション実験

ロボットの指先と対象物挙動の運動解析には、シミュレーションソフト ADAMS (MechanicalDynamic, Inc.) を使用した。このシミュレーションソフトは、数式モデルを内部に持っており、物体同士の拘束や境界条件を与えることにより接触力が求まり、ダイナミクスを考慮したシミュレーションが可能となる。なお、物体間の接触には、接触している 2 物体の間に仮想的なバネ・ダンパを考え、それによって接触力が発生するという一般的なバネ・ダンパモデルを使用する。図 4 に、提案する捕獲戦略のシミュレーションの様子を示す。ただし、図 4 (a) ~ (f) に

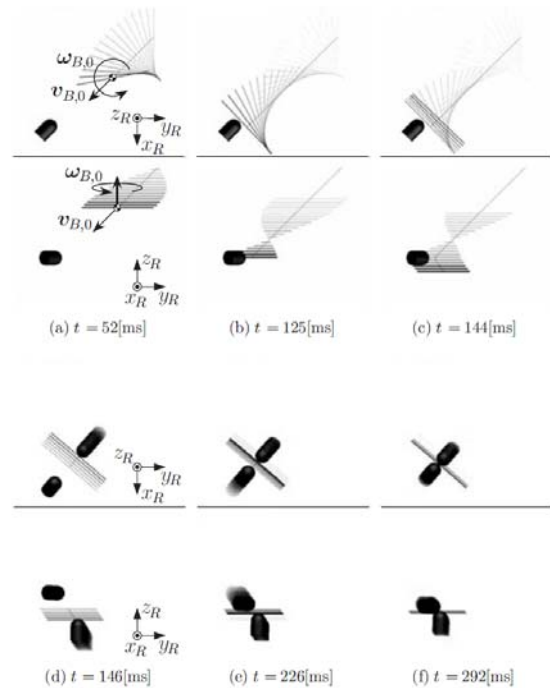


図 4 シミュレーション

において、上段は  $x_R$ - $y_R$  平面、下段は  $y_R$ - $z_R$  平面を示しており、上段は面  $\Pi_1$  と一致する。対象物に関するパラメータとして、 $m_B = 0.1$  [kg],  $I_B = 1.0 \times 10E-4$  [kgm],  $L = 0.1$  [m],  $e = 0.5$ ,  $v_{B,0} = [-1, -1, -1]^T$  [m/s],  $\omega_{B,0} = [0, 0, 10\pi]^T$  [rad/s], を与えている。図 4 (b) に示すように第 1 衝突において回転運動を完全に除去し、図 4 (c) のように長手軸と直交した並進運動を生成する。続いて、図 4 (d) ~ (f) に示すように、対象物の重心位置への衝突を繰り返し、最終的に捕獲に成功している。

#### ●重力場への拡張

前述の手法を、重力場での捕獲戦略へと拡張した。ただし、ロボット-対象物系の運動は二次元平面内に限定する。

【Step 1】図 5 (i-a) は、第 1 衝突の瞬間を示しており、この瞬間に対象物が有する並進運動を取り除く。目標接触時刻  $t_{1d}$ , 目標接触状態  $[\theta_{dB,1}, (Brd1)^T]^T$  は摩擦不感型衝突に基づき、次式のようになる。

$$t_1^d = t_0 \mid s_0(t_0)^T v_{B,0}(t_0) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{dB,1}^d \\ Br_{y_1}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(-v_{Bx,0}(t_1^d)/v_{By,0}(t_1^d)) \\ F_{V,1}(0) \pm W/2 \end{bmatrix}$$

ただし、 $F_{V,i}(0)$  は第  $i$  衝突の瞬間に並進速度を 0 にするような接触位置である。 $Br_{dy,1}$  の符号は上記衝突後に  $\omega_{B,1}$  の符号が  $\omega_{B,0}$  と逆転するように決定する。対象物には重力が及ぶため、衝突後は図 5 (i-b) のように、対象物は回転運動を伴って自由落下する。

【Step 2】図5(ii-a)に示すように、第2衝突では対象物の長手軸が水平方向と一致した瞬間に回転運動を完全に取り除く。

$$t_2^d = \frac{n\pi}{|\omega_{B,1}|} - \frac{\theta_{B,1}(t_1^d)}{\omega_{B,1}} \quad (n = 0, 1, \dots)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{B,2}^d \\ \dot{\theta}_{B,2}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n\pi \\ \mathcal{F}_{\omega,2}(0) \\ \pm W/2 \end{bmatrix}$$

$\mathcal{F}_{\omega, i}(0)$ は第*i*衝突の瞬間に $V=0$ を与える接触位置であり, $n$ は $t_2^d > 0$ となるよう決める。図5(ii-b)のように、長手軸を水平方向と一致させ鉛直上方に跳ね返り、落下運動を行う。

【Step 3】図5(iii-a)に示すように、第3衝突以降は、新たな回転運動の生成を避けるために、接触点の法線方向が対象物重心を通るような接触位置を選択する。

$$\begin{bmatrix} \theta_{B,i}^d \\ \dot{\theta}_{B,i}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n\pi \\ 0 \\ \pm W/2 \end{bmatrix} \quad (i \geq 3, n = 0, 1, \dots)$$

上式の接触状態の下、最終的に指先上で静止し、図5(iii-b)のように指先で対象物を捕獲できる。図6に示すように、重力場として傾斜角 $\theta = 2[\text{deg}]$ に設定したテーブル上を回転しながら落下してくる棒の捕獲実験を行った。対象物の位置と姿勢を高速ビジョンによって獲得し、二軸スライダ先端に装着された二指ハンドによって捕獲を試みた。図6(b)のように、第1衝突の瞬間に並進運動を除去している。続いて、図6(e)に示すように、対象物の重心位置へ両指先を移動させ、最終的に図6(f)のように捕獲している。

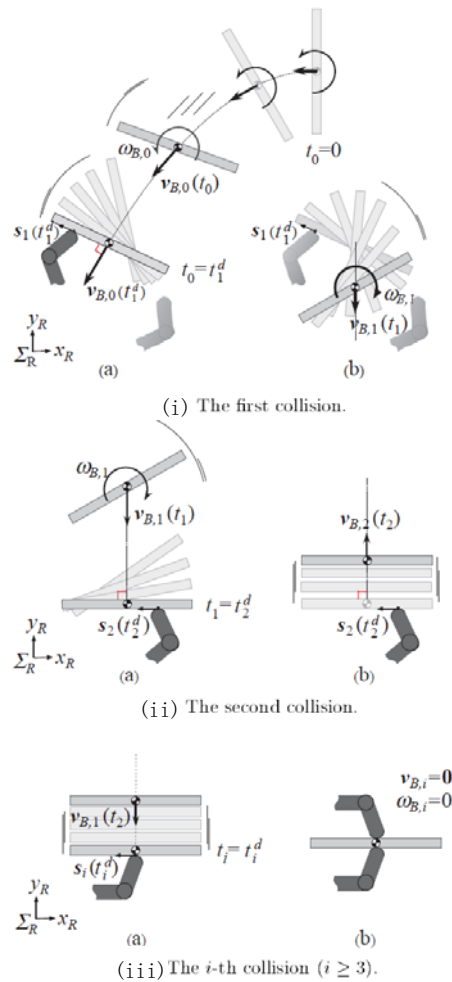


図5 重力場への拡張

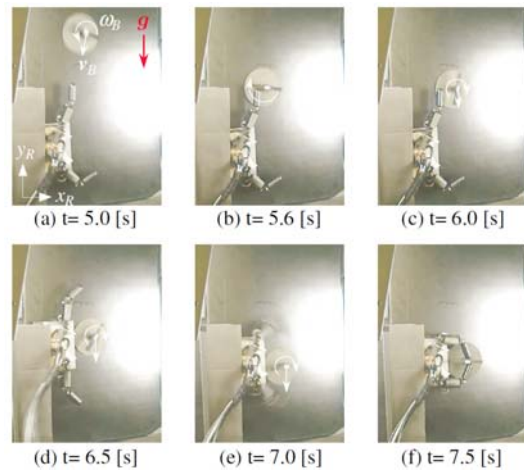


図6 実験結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 東森充, 内海圭祐, 大本康隆, 金子真,  
ピザ職人のハンドリングメカニズムに着  
目した動的操り, 日本機械学会論文集 (C  
編), vol. 44, no. 743, pp. 1825-1833, 2008

[学会発表] (計 2 件)

- ① 大本康隆, 東森充, 金子真, 非把持形態  
による柔軟物体のダイナミックマニピュ  
レーション, 第 9 回計測自動制御学会シ  
ステムインテグレーション部門講演会,  
2008 年 12 月 7 日, 長良川国際会議場
- ② 大本康隆, 東森充, 金子真, 柔軟物体の  
非把持マニピュレーション, 第 26 回日本  
ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 11  
日, 神戸大学工学部キャンパス

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東森 充 (HIGASHIMORI MITSURU)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30346522

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

