

高速多指ハンドによる動的捕球動作の実現

Dynamic Catching Using a High-speed Multifingered Hand

○ 今井 睦朗 (東大) 並木 明夫 (科技団/東大) 正 橋本 浩一 (東大) 正 石川 正俊 (東大)

Yoshiro IMAI, Akio NAMIKI, Koichi HASHIMOTO and Masatoshi ISHIKAWA

University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Abstract: A new robotic hand system, which achieved high-speed finger motion at 180deg/0.1s has been developed. With high-speed visual feedback system at a rate of 1KHz, various dynamic operations are achieved. In this paper, as an example of dynamic operation, catching of a falling ball is taken up. To achieve this operation, it is necessary to take dynamics between a hand and an object into account. The algorithm for catching and experimental results are shown.

Key Words: multifingered hand, catching, high-speed visual feedback.

1 はじめに

人間の手と従来のロボットハンドの物体操作能力を比べた際、明らかに後者が劣る場面として、「鉛筆回し」や「お手玉」のように対象との間に生じるダイナミクスを積極的に利用した「動的操作」を行なう場合がある。その理由としては、このような操作がハンドの運動能力及び対象に関する情報のセンシング能力の両面で極めて高い能力を要求するのに対し、従来のシステムが十分な能力を持っていなかったことが挙げられる。

これに対し我々は、180度開閉を0.1秒で実行可能な指を持つ高速多指ハンドを開発し、これにサイクルタイム1[ms]の高速視覚システムを用いた視覚フィードバック制御を適用することで、従来では困難であったような動的な操り動作の研究を行ってきた¹⁾。

本稿では、動的操作の一例として落下球の捕球動作を取り上げ、衝突現象のダイナミクスを積極利用した捕球アルゴリズムと実験結果について述べる。

2 衝突を利用した落下球の捕球動作

2.1 問題設定

Fig.1のように180度対向して配置された2本指、4自由度を持ったロボットハンドが存在し、これらの指の位置する直線上に球を自由落下させ、捕球動作を行なうこととする。ただし、その落下位置は2本の指の中心ではなく、指の設置された直線上にずれた位置に設定する。中心からずれた位置のままでは安定して把持することが難しい。しかし、球を指との衝突現象をうまく利用することで、安定しやすい中心位置に球を追い込み、捕球を成功させることを考える。

2.2 衝突現象の解析

Fig.1の2次元平面内において、この衝突現象を利用した捕球タスクの解析を行なう。簡単化のため、対象は半径 R 、質量 M の球、指は半径 r 、質量 m の球として扱う。また、衝突の瞬間は常に指先関節は固定されており、根元関節の角速度はアクチュエータ性能に依存したある一定速度に制御されているものとする。以下、添字「 XY 」は世界座標系が、「 xy 」は接触面座標系が基準であることを表す。

まず、衝突時の接触面座標系における指の速度ベクトルを $\mathbf{v}_{xy} = [v_x, v_y]^T$ とし、同じく球の速度ベクトルを $\mathbf{V}_{xy} = [V_x, V_y]^T$ とする。これらが衝突後にそれぞれ $\mathbf{v}'_{xy} = [v'_x, v'_y]^T$ 、 $\mathbf{V}'_{xy} = [V'_x, V'_y]^T$ へと変化するとすれば、運動量保存則及び反発の法則から以下の式が成り立つ。ここで衝突時に指と対象の間に働く垂直抗力を N とし、指と対象の間の反発

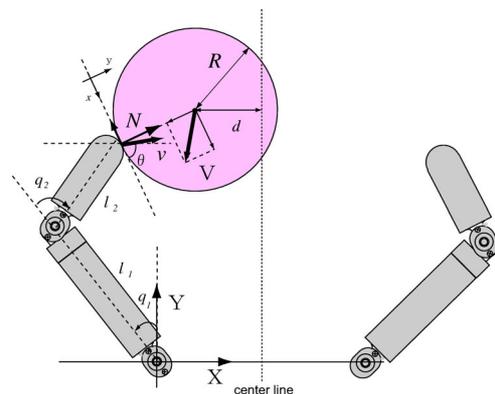


Fig. 1 Dynamic catching task

係数を e 、摩擦係数を μ とおく。

$$\int N dt = -m(v'_y - v_y) = M(V'_y - V_y) \quad (1)$$

$$\mu \int N dt = -m(v'_x - v_x) = M(V'_x - V_x) \quad (2)$$

$$-e(v_y - V_y) = v'_y - V'_y \quad (3)$$

これらを \mathbf{V}'_{xy} について解くが、その際に各関節を制御して剛性を高めることにより、撃力の影響を受けないものとする。すると $m \rightarrow \infty$ として

$$\mathbf{V}'_{xy} = \begin{bmatrix} V_x + \mu(1+e)(v_y - V_y) \\ (1+e)v_y - eV_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。よって \mathbf{V}'_{xy} の偏角 α_{xy} は

$$\alpha_{xy} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(1+e)v_y - eV_y}{V_x + \mu(1+e)(v_y - V_y)} \right\} \quad (5)$$

である。つまり、指の速度 \mathbf{v}_{xy} を制御することにより、衝突後の球の速度方向を決定することができる。接触面座標系の傾きを θ として世界座標系での偏角 α_{XY} を考えれば

$$\alpha_{XY} = -\theta + \tan^{-1} \left\{ \frac{(1+e)v_y - eV_y}{V_x + \mu(1+e)(v_y - V_y)} \right\} \quad (6)$$

である。

ところで θ は指が対象のどの部分に衝突するか、つまり対象の落下位置と指の姿勢の相対的な関係によって決まる。また、指の接触面座標系における速度 \mathbf{v}_{xy} もやはり指の姿勢によって決まるから、結局 α_{XY} は対象の落下位置と指の姿勢の関数で表せることになる。

具体的には、まず θ については、指先位置 (衝突点) $\mathbf{P}_{XY} = [P_X, P_Y]^T$ から球の中心 $\mathbf{O}_{XY} = [O_X, O_Y]^T$ へと向かうベクトル \overrightarrow{PO} の偏角を考えると、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{O_X - P_X}{O_Y - P_Y} \right) \quad (7)$$

である。ここで指先位置 \mathbf{P}_{XY} は各リンクの長さを l_1, l_2 、関節角を q_1, q_2 とすれば

$$\mathbf{P}_{XY} = l_1 \begin{bmatrix} \sin q_1 \\ \cos q_1 \end{bmatrix} + l_2 \begin{bmatrix} \sin(q_1 + q_2) \\ \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

である。さらにこの \mathbf{P}_{XY} を微分し、接触面座標系に変換すれば \mathbf{v}_{xy} が得られる。最終的には、 $|\overrightarrow{PO}| = R$ の条件から、適当な対象の落下位置に対して衝突位置を定めることができ、それによって θ が決定する。また同時にその θ を満たすような指の姿勢も決まるので、 \mathbf{v}_{xy} も決まり、式 (6) により衝突後の対象の運動方向が決定できることになる。

このように計算していくと、結局のところ α_{XY} は

$$\alpha_{XY} = f(q_1) \quad (9)$$

という q_1 の非線形方程式で記述できる。逆に α_{XY} の目標値を定めてこの方程式を解けば、関節角入力値 q_1 を求めることができる。また、ここまでの手順を何度も繰り返すことによって、複数回の衝突操作に拡張することもできる。

3 動的捕球実験

捕球対象として半径が 3.5[cm]、重さ 35[g] の市販のゴムボールを使用し、2本指4自由度ハンドで実際に動的捕球実験を行った。

3.1 実験システム

実験システムの概要を Fig.2 に示す。ロボットハンドには軽量高速多指ハンド²⁾を使用した。このハンドはその指モジュールの各関節に高速軽量アクチュエータを備えることにより、非常に俊敏な動作を実現したものである。視覚システムには、CPV-II(高速列並列ビジョンシステム)を使用した。CPV-II は多様な初期視覚処理を約 1[ms] のサイクルタイムで実行することが可能であり、これを搭載したアクティブビジョンを2台用意することによって、対象の3次元位置を計測した。

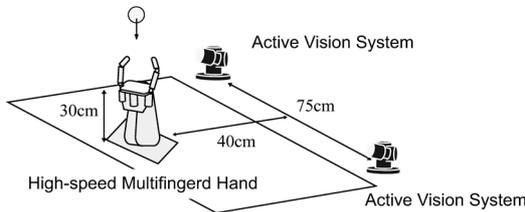


Fig. 2 Experimental system

球は約 1[m] の高さから落下させた。この時、地上付近での速度は約 4.4[m/s] となる。落下位置の2本指の中心位置からのずれ d は $d = 2$ [cm], 4[cm], 6[cm], 8[cm] と順に変化させた。それぞれ前節の手順に従って衝突後の球の速度偏角 α_{XY} と q_1 の関係を求め、 $\alpha_{XY} = 0$ [deg] あるいは 0 に最も近づく q_1 で衝突を行なうようにハンドの制御を行なった。なお、この手順によって行なう衝突回数は1回とし、その後は手順に従わずそのまま単に指を閉じていくことによって捕球を行なうこととした。

3.2 実験結果

計算によって求めた α_{XY} と q_1 の関係は Fig.3 のようであった。 $d = 4$ [cm] の時には $q_1 = -43.5$ [deg] 付近で、 $d = 6$ [cm] の時には $q_1 = -52.5$ [deg] 付近で $\alpha_{XY} = 0$ [deg] となっている。実際にこの値を用いて捕球に成功することができた。また、 $d = 2$ [cm] 及び 8[cm] の時には $\alpha_{XY} = 0$ [deg] となる q_1 は存在しないが、これは前者は Y 軸方向に、後者は X 軸方向にそれぞれ十分な力積が与えられないためであると考えられる。ただし、 $d = 2$ [cm] の時には元々落下位置が中心に近いために、 α_{XY} が最も 0 に近づく $q_1 = -20$ [deg] 付近でも捕球を成功することが出来た。最後に $d = 6$ [cm] で実際に捕球を行なった際の連続写真を Fig.4 に示す。ボールはまず左指によって真横に弾かれ、次に右指とぶつかり、再び中心位置に跳ね返ったところで両指に拘束されている。

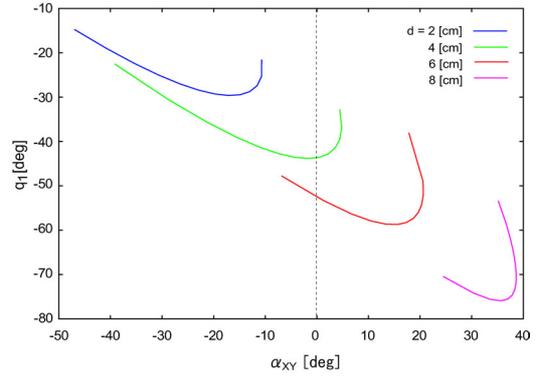


Fig. 3 Relation between α_{XY} and q_1

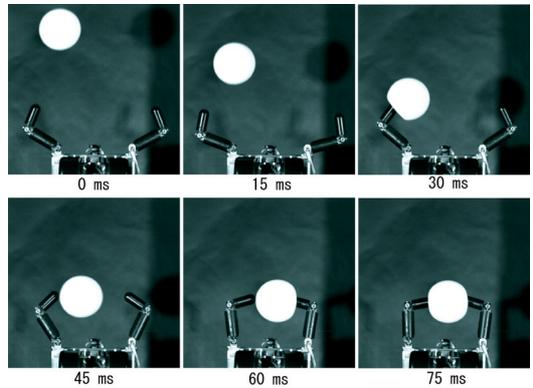


Fig. 4 Sequential photos

4 まとめ

対象との力の干渉を利用する動的な操りタスクの一例として落下球の捕球タスクを取り上げ、高速多指ハンドと高速視覚からなるシステムによって実験を行なった。衝突現象のダイナミクスを利用することにより、これまでにはない動的操作を実現することができた。今後は、より多様な対象に対して様々な動的操作を実現していくことを考えている。

参考文献

- 1) 今井, 並木, 橋本, 金子, 石川. 視覚フィードバックを用いた高速ハンドシステムの開発. 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3E11, 2002.
- 2) 並木, 石川, 金子, 亀田, 小山. 軽量高速多指ロボットハンドの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2003.