2A1-K1

非接触相を伴うマニピュレーション (連続*RAC*動作)

Manipulation with Non-contacting Phase (Cyclic *RAC* Motion)

○ 白井 達也(鈴鹿高専) 正 金子 真(広島大) 正 原田 研介(広島大) 正 辻 敏夫(広島大)

Tatsuya Shirai: Suzuka National College of Technology, Shiroko, Suzuka-Shi, Mie Makoto Kaneko, Kensuke Harada, Toshio Tsuji :

Hiroshima University, 1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-Shi, Hiroshima

Abstract: While there have been many works concerning the manipulation of a moving object such that "juggling", most of them do not consider the capturing phase where the object is completely grasped by the hand. In this paper, we discuss manipulation with non-contacting phase by multi-fingered robot hand. In particular, we focus on the cyclic of the released and catch motion (RAC motion) on a table. We consider the basic strategy of RAC and implement it into three-fingered robot hand to verify the idea experimentally.

Key Words : Non-contacting Phase, Cyclic RAC Motion, Multi-fingered Robot Hand

1 はじめに

キャッチボール等の球技を行う場合、ヒトは飛んできた ボールを受け止め、持ち替えて投げ返すなど、対象物を 手で把握した状態(接触相)と放す状態(非接触相)を切り 換え,対象物をダイナミックに操ることができる.本研 究では、このように接触相に加え、非接触相を伴う操り 動作をロボットハンドで実現することを目的とする.非 接触相を含む対象物の操り動作をロボットに応用した例 として、ジャグリング動作¹⁾や羽根つきロボット²⁾、人と ビーチバレーボールを打ち合うロボット³⁾などがある.し かし、これらの研究のほとんどは、空中を移動する対象 物を平板などで打ち返す、あるいは受け止めることを目 的としており,対象物を把握した位相は存在しない.本 研究では非接触相を伴う操り動作として、Fig.1のように、 掴んでいるボールを放し,跳ね返ってきたボールを再び 把握する Release And Catch (RAC) 動作を取り扱う.特 に、RAC動作を連続的に繰り返し行うことを前提として ロボットハンドの動作戦略を設計し、実機実験を行う.

2 ヒトによる *RAC* 動作

Fig.1はヒトによるRAC動作の一例である. Fig.1(a)の 初期姿勢からFig.1(b)のように指を広げてボールを空中 に放すとボールは落下し、テーブルに衝突して Fig.1(c) のように上方向に跳ね上がってくる.一般に、物体間の 反発係数は1より小さいため、ただ単純にボールを自由 落下させただけでは、ボールは初期高さまで戻って来な い. ヒトはボールが元の高さまで戻ってこないことを知っ ているので, Fig.1(d)のようにハンド全体でボールを覆 うような指姿勢を保ったままハンドを下方に向けて動か し,跳ね上がってくるボールを迎える準備をする.そし てFig.1(e)のようにボールがパームに接触すると同時に 指を閉じてボールの運動を幾何学的に拘束し、包み込み 把握を完成する.しかし、ボールを包み込み把握した状 態では素早くボールを放して連続 RAC 動作を行うのが困 難なため、ハンドを元の高さに戻すと同時に、包み込み 把握から指先把握へと対象物の持ち替え動作を行う. 以 下, Fig.1(a)から(f)の動作を繰り返すことで、ヒトは連 続的にRAC動作を行うことができる.



Fig.1 RAC motion by human

3 ロボットハンドによる RAC 動作の実現

3.1 連続 RAC 動作戦略

ロボットハンドに実装した*RAC*動作戦略をFig.2に示 す.まず,Fig.2(a)の初期姿勢からボールを放す.ここで のポイントは、ボールを放すには指先を水平方向に広げ る必要があることと、落下したボールは元の高さまで跳 ね上がってこないため、放した位置よりも低い位置でボー ルを把握する必要があることである.これらの目的を同時 に満たすには、Fig.2(b)のように斜め下方に向かって指先 を動かす必要がある.ボールが指先の開口部を通って,ロ ボットハンドで把握可能な領域に戻ってきたら、Fig.2(c) のようにハンド指先を閉じ、ボールをハンド内に閉じ込 めて把握を完成させる.ボールを把握した後は、続けて *RAC*動作を行うために、Fig.2(d)のように指先でボール を操って初期高さまで持ち上げ、ポテンシャルエネルギー を回復させる.一方、テーブルは常に平坦かつ水平とは



Fig.2 RAC motion by robot hand

限らない.ここでは、テーブルは水平面に対して θ_f の角 度をもつものとする.時刻tにおけるボール重心の座標 を $p_B(t) \in R^{2\times 1}$ 、ボールの初期高さを h_0 、重力加速度 をg、テーブルにボールが衝突した瞬間の時刻を t_f 、直 前の時刻を t_{f0} とすると、テーブルに衝突する直前の速度 $\dot{p}_B(t_{f0}) = [0, -\sqrt{2gh_0}]^t$ である.ボールとテーブルの間の 反発係数をeとすると、テーブルに衝突した直後の速度 $\dot{p}_B(t_f) = [\dot{p}_{Bx}(t_f), \dot{p}_{By}(t_f)]^t$ は次式のように表される.

$$\dot{\boldsymbol{p}}_B(t_f) = \sqrt{2gh_0} \begin{bmatrix} (1+e)\sin\theta_f\cos\theta_f\\ (e\cos^2\theta_f - \sin^2\theta_f) \end{bmatrix}$$
(1)

したがって、テーブルに衝突した後のボールの軌道 $p_B(t) = [p_{Bx}(t), p_{By}(t)]^t$ は、

$$\boldsymbol{p}_{B}(t) = \boldsymbol{p}_{B}(t_{f}) + \Delta t_{f} \dot{\boldsymbol{p}}_{B}(t_{f}) - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}g\Delta t_{f}^{2} \end{bmatrix}$$
(2)

となる. ただし、 $\Delta t_f = t - t_f$ である. 今回提案する *RAC* 動作戦略では、ロボットハンドの指先関節の位置を水平方 向に移動することで、ボールの軌道変化に対応する. Fig.3 は提案する *RAC*動作戦略でボールを把握可能な θ_f と x_s の 関係をコンピュータシミュレーションにより調べた結果で ある. $\theta_f \leq 6$ の場合、 x_s を変化させることで、 $x_s = 0$ で は把握できなかった軌道のボールを把握できるようにな る. しかし、 $6 < \theta_f$ では、 x_s を変化させてもボールの軌道 がロボットハンドと干渉してしまい、ボールを把握するこ とができない. グラフ中のライン ($\theta_f = 14.5[deg]$)は、ロ ボットハンド指先の可動範囲と式 (2) で得られるボールの 軌道を元に求めた θ_f の限界で、14.5 < θ_f の場合、ロボッ トハンドは物理的にボールを把握不可能であることを表 している.

3.2 実験結果

Fig.4はロボットハンドによる*RAC*動作の実験結果である.実験には三関節三本指ロボットハンドを用いた.各リ ンクの長さは40[mm],25[mm],30[mm],ボールは反発係 数e = 0.88,直径 $D_B = 36[mm]$ のピンポン球,ボールの 初期高さ $h_0 = 85[mm]$ である.本報告ではビジョンセン サ⁴⁾を用いてボールの軌道を計測する代わりに,Fig.4(a) のようにテーブルを角度 θ_f だけ傾斜させることで衝突後 のボールの軌道を変更し, θ_f をロボットハンドに提示す る.Fig.4(b)は、 $\theta_f \ge x_s$ の関係を実機を用いて調べた実 験結果である.縦軸は、各パラメータに対して20回の *RAC*動作を行った際の把握の成功率を表す.ただし、ロ ボットハンドが把握姿勢を調整するのはボールを放して



Fig.4 Experimental result

から 100[ms] 後に遅らせることで, ビジョンセンサからセ ンサ情報を得る状況を模擬的に再現している.水平方向 への把握位置の調整を行わない場合 ($x_s = 0$),把握の成 功率は $\theta_f = 0$ ならば 100[%] だが、 θ_f が大きくなるのにし たがい徐々に低下し、7.5[deg] $\leq \theta_f$ では0[%] となる. 方、 $\theta_f = 7.5[deg]$ の場合でも、 $x_s = 20 \sim 24[mm]$ に設定 すると成功率は70[%] に増加する.また、7.5 < θ_f になる と、Fig3のシミュレーション結果と同様に、ボールの軌 道がロボットハンドと干渉してしまうため、ほとんどの 場合で把握に失敗する.この実験結果より、 $\theta_f \leq 7.5[deg]$ 程度の範囲であるならば、対象物把握姿勢を水平方向に 調整することで対応可能であることが分かる.

4 まとめと今後の課題

対象物とロボットハンドが接触していない非接触相を 含む操り動作として連続 RAC動作を取り上げ、ロボット ハンドへの実装を行った.さらに、提案した連続 RAC動 作戦略が、対象物の軌道のズレに対して対応できること を実験的に検証した.今後は、高速ビジョンを併用する ことで、ボールの軌道予測に基づく連続 RAC動作を実 現する予定である.なお、本研究は科学技術振興財団の 「CREST(脳を創る)」の支援によって行われたものであ ることを付記しておく.

参考文献

- 阪口,藤田,升谷,宮崎: "動体を扱うロボットの運動計 画と制御",日本機械学会論文集C編,Vol. 59, No. 567, pp. 3397-3404, 1993.
- 宮崎, 升谷: "羽根つきロボット", 計測と制御, Vol. 35, No. 4, pp. 303-304, 1996.
- 3) 辰野: "人とビーチバレーボールを打ち合うロボット", 日本 ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 721-727, 2000.
- 4) 並木、中坊、石井、石川: "高速視覚を用いた把握行動シス テム"、ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文 集, 1998.