

高速軌道予測に基づく捕球ロボットシステム

佐々木 明夫 張山 昌論 亀山 充隆 (東北大学)

Ball-Catching Robot System Based on High-Speed Trajectory Prediction

*Akio Sasaki, Masanori Hariyama, Michitaka Kameyama (Tohoku University)

Abstract - We consider system integration of a catching-ball robot as a typical example of real-world applications. Robot manipulator movement is usually slower than ball one. Therefore prediction of a ball trajectory is essential for a robot manipulator to approach a catching position in advance. The prediction and the movement are repeated with a sampling period. This paper presents a new method to obtain successful catching conditions.

Key Words: Intelligent Integrated system, Ball-Catching Robot, Trajectory Prediction,

1. まえがき

リアルワールド応用知能集積システムにおいて、機械的動作が遅い場合、予測が重要な基礎技術となり、予測に基づくリアルワールド応用の具体例として、捕球ロボットシステムの構築法を考案している。捕球ロボットシステムとは、投げたボールの 3 次元位置を 2 台のカメラで計測しながら、ロボットの手先を捕球位置に移動して捕球するものである。ロボットの機械的な移動速度がボールの移動速度と比べてかなり遅い場合、ボールが捕球位置に飛来し、正確な捕球位置が分かった時点でロボットの手先を移動しても、捕球に間に合わないという問題が生じる。このため、予測を行い、ロボットの手先を早い時点で先回りさせる予測アルゴリズムが必要になる。

本稿では、ロボットの機械的移動速度が遅い場合であっても、予測によってカバーすることにより、捕球を可能とする高速軌道予測システムを構築している。移動速度を予測によってカバーするには、ボールの軌道予測を行い、捕球すべき地点の予測位置を、できるだけ早い時点で、しかも、なるべく高い精度で、得るようにすることが重要である。予測を早い時点で得ることにより、ロボットが動作する時間的な余裕が大きくなる。高い精度の予測を得るには、処理を高速化し、位置時系列のデータ数を増やす必要がある。早い時点では、ボールが遠くにあるため計測誤差が大きく、データの点数が少ないた

め、予測誤差も大きい。サンプリング周期 T 毎に、予測の更新を繰り返すことにより、時間経過とともに予測精度が向上するので、捕球を成功させることができる。本稿では、捕球ロボットシステムがその目的を達成するのに必要なサンプリング周期 T の決定方法を述べている。 T が小さいほど、高速に予測処理を行うことを表している。本稿では、汎用の装置を用いた捕球ロボットシステムを構築し、動作実験を行った結果を示す。

2. 捕球ロボットのシステムインテグレーション

[1][2]

Fig.1 に示すように、リアルワールド応用知能集積システムでは、リアルワールドの状態をセンシングし、その計測データを用いて予測が行われる。リアルワールド応用では、計測値にも予測値にも誤差が含まれるため、このことを十分考慮したシステムインテグレーションが重要である。リアルワールド信号処理では、Fig.2 に示すようにサンプリング周期 T 毎に同一処理を繰り返す。

システムインテグレーションの例として Fig.3 に示すような捕球ロボットシステムを考える。システムでは、ボールの 3 次元座標をステレオビジョンにより計測し、軌道予測を行う。予測軌道に基づきロボットを制御し、捕球を行う。議論を簡単にするためマニピュレータは y 軸上を移動する 1 自由度とする。

マニピュレータの動作速度はボールの速度より

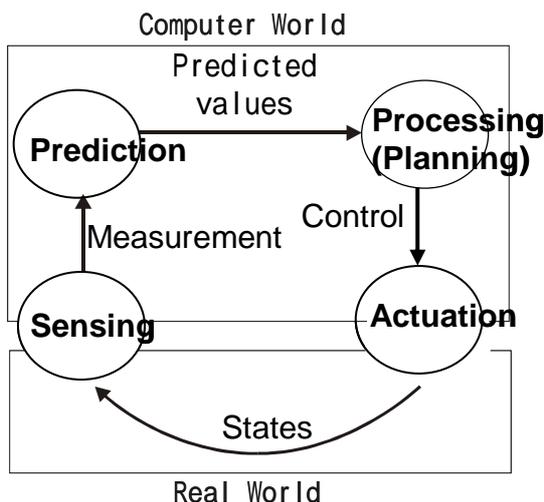


Fig. 1 Signal flow in real-world applications.

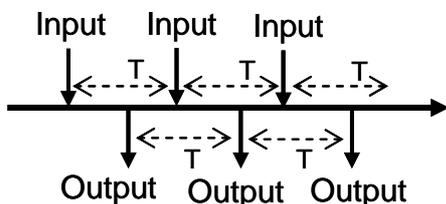


Fig. 2 Real-world signal processing with a sampling period T .

遅いので、捕球を成功させるために、ボールの予測到来位置の方向にあらかじめ動いておく。時刻が早いときは予測軌道は、次の理由で大きな誤差を含む。

- ・ボールがカメラから離れているため、計測誤差が大きい。
- ・取得されたボール位置の点数が少ないため、予測誤差が小さい。

これらの問題を考慮しながら、捕球ロボットシステムでは、以下の処理をサンプリング間隔 T 毎に繰り返す。

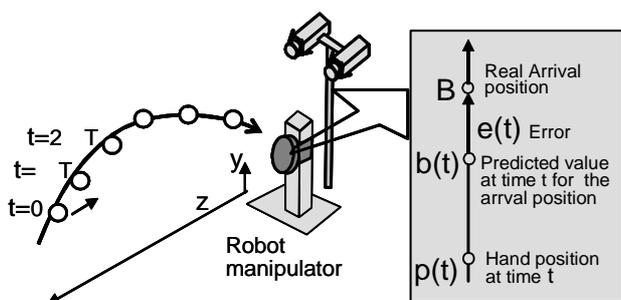


Fig. 3 Model of a ball-catching robot system.

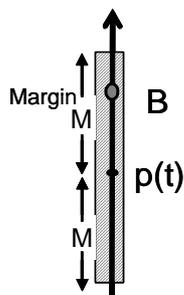


Fig. 4 Condition for successful catch.

ステップ 1: ステレオビジョンによりボールの 3 次元座標を求める。

ステップ 2: 現在までに取得されたボール座標を用いて、最小二乗法により放物線軌道予測を行う。

ステップ 3: ボールの到来する予測位置を計算し、それをハンド位置の目標としてコントローラに与える。

捕球成功のためにハンド位置が満たすべき条件を考える。ボールは、時刻 $t=0$ に距離 Z の位置からマニピュレータに向けて投げられ、時刻 $t=T$ において y 軸上に到達する。時刻 t におけるハンド位置を $p(t)$, マニピュレータの移動速度を V とする。また、ボール到来位置の時刻 t における予測値を $b(t)$, 真のボール到来位置を B とする。

Fig. 4 に示すように、ボールが y 軸上に到達した時に、ボールがハンド中心から距離 M (捕球マージン) 内であれば捕球は成功する。捕球成功のためのハンド位置の条件は、次式で与えられる。

$$|p(T)-B| \leq M$$

この条件が満たされるように時刻をさかのぼっていくと、時刻 t における捕球成功のためのハンド位置に関する必要条件は次式で与えられる。

$$|p(t)-B| \leq M + V(T-t)$$

この条件は、ハンドが真のボール到来位置から残り時間で移動可能な距離以内に存在しなければ、捕球できないことを意味している。

次に、捕球成功のためにボールの到来位置の時刻 t における予測誤差 $e(t)$ が満たすべき条件を考える。

制御方式としては、ボールの予測到来位置にハンドを動かす。すなわち、次式のように、時刻 t でのボール予測位置が時刻 $t+T$ でのハンドの位置になるように制御する。これは次式で表される。

$$p(t+T)=b(t)$$

したがって、誤差 $e(t)$ を次式のように

変形できる。

$$e(t) = |b(t) - B| = |p(t + T) - B|$$

ここで、時刻 t における捕球成功のためのハンド位置に関する必要条件より

$$|p(t + T) - B| \leq M + V(T - t)$$

以上の条件を考慮しながら、捕球成功を保證できるようなサンプリング周期 T の求め方は、文献[1]と[2]に述べられている。

ロボットの機械的な移動速度をカバーするには、最初の予測を早い時点で出力する必要がある。Fig. 5では、ボールを投げてから、ハンドにボールが到来するまでのシステムの時間的な動作を示している。ボール軌道予測に必要な最小データ数を N とすれば、データ取得時間 $T_w = N \cdot T$ 後に、最初の予測が出力される。この時点で、ハンドは初期位置 S から目標に移動し始める。ハンドの移動開始からボール到来までの時間 $T_m = T - T_w$ が動作時間となり、この時間内でハンドを目標に移動させなければならない。 T が大きいと動作時間が短くなり、太い実線で示すように、動作時間内で目標に移動できないため、捕球に間に合わない。このため、軌道予測処理を高速化し、 T を小さくすることにより、実線を点線の位置までシフトさせる必要がある。これにより、ハンドが早い時点で移動を開始できるので、動作時間が長くなり、捕球が間に合うようになる。

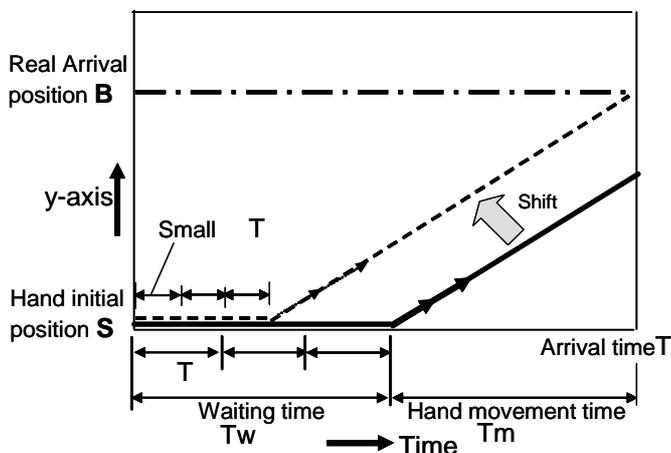


Fig. 5 Time sequence of the ball-catching robot system.

3. 捕球ロボットシステムの構築^[3]

予測処理に基づく捕球ロボットシステムのアルゴリズムを検証するため、Fig. 6に示すような基礎実験システムを構築した。便宜上、市販の動画像処理ボード(Imap-Vision)と汎用のロボットマニピュレータ(三菱重工製 PA-10)を用いている。



Fig. 6 Experimental system.

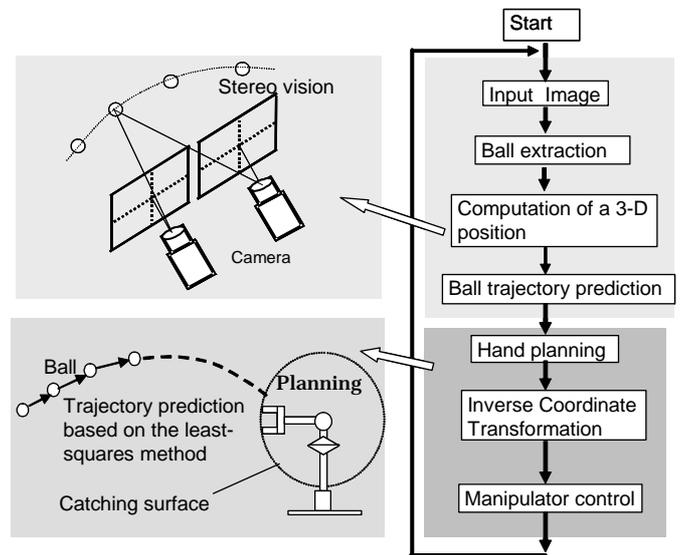


Fig. 7 Operation of the ball-catching robot system.

捕球ロボットシステムは、Fig. 7に示すように軌道予測処理と捕球処理を周期 T で繰り返す。これにより、ロボットを早い時点で先回り動作させるとともに、時間経過とともに予測精度を向上させる。

3.1 軌道予測処理

軌道予測処理では、システム構成の中の画像入力、ボール抽出、3次元位置計算、ボール軌道予測を行う。これらの中で、ボール抽出処理は、画像データを扱うため、もっとも処理量が多く、計算に時間がかかる。このため、ボール抽出の手法として、アル

ゴリズムが簡単で、比較的処理量が小さい2値化・重心検出手法を用いることにより、処理時間を短縮している。この手法は、色の情報を利用しているので、背景にボール色が存在すると使えないという欠点がある。処理時間が短いアルゴリズムを採用し、市販の動画処理アクセラレータを用いることにより、高速な軌道予測処理を実現している。

固定カメラによるステレオビジョンでは、カメラの視野が狭いため、ボールが視野から外れると、ボール抽出ができなくなるという問題がある。このため、カメラを回転させ、ボールの動きに合わせて視野を変えることができるアクティブステレオビジョンの検討を行っている。これにより、画像の解像度を上げるので、ボール抽出精度と計測精度が向上すると考えられる。

3.2 捕球処理

手先のプランニングでは、Fig.7 で示したようにロボット手先の動作範囲を球面に限定する。この球面を捕球面と定義し、手先を捕球面から離れないように制御する。ロボットの目標位置は、ボール軌道と捕球面の交点として得られ、これを捕球位置と定義する。ロボットは、回転関節で構成されているので、手先を球面上で動かす方が、スムーズで俊敏な動作が可能である。捕球性能を向上させるには、手先の姿勢をボールの飛来方向に向ける必要がある。動作範囲を限定しているため、手先の位置と姿勢を制御するには、最低4自由度で制御でき、その方法を

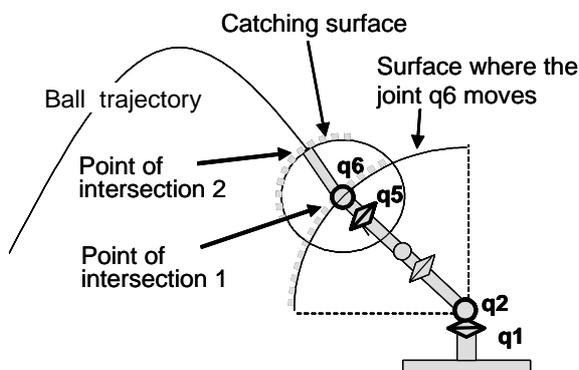


Fig. 8 Hand planning.

Fig.8 に示す。最初に交点1を計算し、次に交点2を計算する。動作させる4関節を q_1, q_2, q_5, q_6 としているので、 q_6 の動作範囲は、 q_1 と q_2 の回転に依存した球面になる。この球面とボール軌道から交点1を求める。次に、ボール軌道と捕球面から交点2を求める。交点1と交点2の目標位置を逆変換し、目標関節角を求める。目標関節角をロボットのコントローラに送り、ロボットを制御する。

4. まとめ

ボール抽出処理における2値化・重心検出手法は、背景の色や照明の変化による影響を受けやすいため、信頼性の高いボール抽出アルゴリズムが必要である。ボール抽出精度の信頼性を高めるため、ボールの形状と大きさを表すテンプレートを用意し、最も近い形状と大きさをもつ領域をボール領域とするテンプレートマッチングアルゴリズムも検討している。このアルゴリズムは、様々な大きさを持つボール画像のテンプレートと、画像の全ての候補ウィンドウとのマッチングを取るため、計算量が膨大になる。このため、FPGAなどによるボール抽出アクセラレータの開発が必要となる^{[4][5]}。

文献

- [1] 亀山, "個性の輝くコミュニケーション 21世紀への夢", 東北大学出版会, pp.126-154(2001).
- [2] 亀山, 張山, "リアルワールド応用知能集積システムの展望", 計測と制御, 第40巻, 12号, pp.841-847(2001).
- [3] 佐々木, 張山, 亀山, "軌道予測に基づく捕球ロボットの動作実験", 電気関係学会東北支部連合大会, 2A23, p.37, (2002).
- [4] 佐々木, 風間, 張山, 亀山, "捕球ロボットシステム用ボール抽出アクセラレータの構成", 電気関係学会東北支部連合大会, 2E2, p.179(2000).
- [5] 風間, 佐々木, 張山, 亀山, "ボール軌道予測アクセラレータを用いた捕球ロボットシステム", 計測自動制御学会東北支部, 第192回研究集会, 192-5, pp.1-10, (2000).