

適応的関数切り替えによる 野球ボール到達点の予測

番匠一雅 村井祐一 山本和弥 野田健一

拓殖大学工学部工学研究科
〒193 東京都八王子市館町 815-1
E-mail : ban@avc.cs.takushoku-u.ac.jp

バッターに向かって飛来する野球ボールの時々刻々の空間座標を、ステレオ観測により即時取得することが可能となり、ボール到達点即時予測が次の重要課題となった。関数近似を用いた到達点の予測の場合、ボールの空間位置取得時に発生する量子化誤差による予測精度の低下をいかに軽減するかが最重要課題となる。シミュレーションと実験により各種の到達点予測アルゴリズムの予測精度を調べた。さらにこれらのアルゴリズムを適応的に切り替えることによって誤差収束性のよい予測結果を得ることができた。

Baseball arriving point forecast using adaptively applying functions algorithm

Kazumasa Bansho, Yuichi Murai, Kazuya Yamamoto and Ken-ichi Noda

Computer Science Dept. Faculty of Engineering Takushoku University
1, Tate-machi 815, Hachiouji-shi, Tokyo, 193 Japan
E-mail : ban@avc.cs.takushoku-u.ac.jp

Baseball flying toward a batter is observed by stereo cameras, and its space coordinates real time calculation by the triangulation has become possible. Then, ball arriving point forecast has become one of the next most important problems. To get ball arriving point several hundred millisecond prior its arrival, simple algebraic functions and gravitation based functions have been applied to its trajectory. Forecast accuracy of those methods has been studied by simulation and experiments. The forecast error reduces as the ball approaches the arriving point. The error reduce rates of forecast are enough to use it for robotic catch and robotic bat of the ball. Finally, those functions are adaptively applied for ball trajectories, and accurate forecast have been successively demonstrated.

1. はじめに

バッターに向かって飛行するボールを2台のテレビカメラで観測し、ボールの毎テレビフィールドにおける空間位置を精密計測し、ボールがバッター平面へ到達する位置を予測し、ロボット捕球、ロボット打球等の高度処理をさせるのが本研究の目的である。これは、動画像処理技術の発展に寄与するのみならず、ストライクやボールの機械判定、球種の判断、投手の能力の評価および訓練に極めて有効であると考えられる[1]~[3]。

既に筆者らは、左右両テレビ画面上に得られるボール像からボールの3次元空間座標を決定するアルゴリズムを開発した[4]。そこで、ボール到達点予測アルゴリズムの実現が次の課題となった。決定したボールの3次元空間座標には、量子化誤差のため測定誤差が含まれる。この測定誤差は、予測の精度を低下させる大きな要因になっている。そこで、複数のボール到達点予測アルゴリズムを検討し投球シミュレーションおよび実際の投球実験データから予測実験を行い、各予測アルゴリズムを適応的に切り替えながら予測する手法を利用することで、量子化誤差の影響を軽減させ、安定した予測結果を得ることができたため報告する。

2. システム構成とボール像座標の取得

本研究におけるシステム構成は図1に示すように、ステレオ配置されたカメラ、画像処理部、計算部、ロボットキャッチャー、ロボットバッターから構成される。なお、左右とはキャッチャーからピッチャーを見ての左右であると規定しておく。

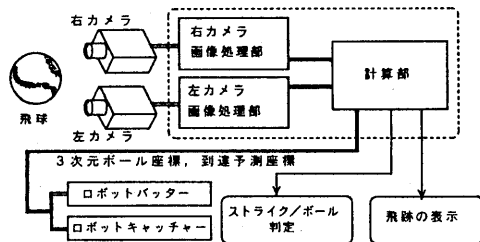


図1: システム構成図

左右のカメラで撮影された画像は量子化され、各画像処理部に入力される。この処理部ではあらかじめ撮影しておいた背景画像と、入力画像とのRGBそれぞれの階調成分の差分をとりボール像の抽出をおこなう。次にボール中心点座標を決定し計算部に対し座標を送る。計算部側では各画像処理部から得られたボール中心点座標より3次元空間座標の計算を行い、連続した座標値から、ボールのバッター平面上の到達点位置の予測やロボット機器に現在のボール座標と予測到達座標を送出している。

2.1 ボール像の認識

移動物体の抽出には背景除去が有効である。本研究でも部分的に背景除去を利用して移動物体の抽出を行っている。本実験で認識する移動物体は、野球ボールであると定義されているため、撮影画像中におけるボールの移動方向は常に一定していると仮定できる。そのため、ボールはピッチャー近傍から放出され、右カメラの場合、右から左方向へ、左カメラの場合、左から右方向へと移動方向が一定である。したがって、投球初期段階では、ピッチャー近傍の限定された領域のみに対し背景除去を行い、ボールが認識できた時点より背景除去領域をボール移動方向に移動させることで、背景除去領域を限定することができボール像認識のための処理時間の大幅な短縮が可能となった。

2.2 実空間座標への変換

ステレオビジョンによる物体の位置計測は三角測量によって行われる。2台のTVカメラの設置の際に発生する設置誤差の影響を緩和するために、撮影フィールド上に対し空間座標が既知、または正確に計測可能な点を複数設置し、撮影画面内に映し出されたそれらの点を基準参照点とし、画像中から得られるボール中心点の位置計測を行った。今後これらの既知な点を基準点と呼ぶ。この方法によりボール座標の計測後に基準点を使いカメラ角度の補正を行うことができるため、必要以上に

カメラ設置時における視覚方向に対する角度のずれを意識する必要がなくなり、カメラ設置による測定誤差が緩和される。

3 最終到達点の予測

人間がボールの捕打球を行う場合、ボールが描く軌跡から到達点を予測して実際の到達以前にミットの移動やバットのスイングを開始している。したがってロボットバッターやロボットキャッチャーを実現する場合も同様にボールの最終到達点位置を予測し、最終到達点に達する前に捕打球動作を開始する必要がある。ここで便宜上、左右方向を x 軸、上下方向を y 軸、ピッチャーとキャッチャー間を結ぶ線を z 軸として定めておく。

3.1 軌道関数による予測処理

飛行するボールの軌跡はボール表面を流れる空気流による偏向力の影響を受け変化が生じる。空気流によるボールの変化量と方向はボールの回転方向、回転数、飛行速度、ボール形状など多くの要素によって決定される。一定以上の回転数で、飛行しているボールに対する空気との摩擦による偏向力は絶えず一定方向に影響し、ボールの軌跡は飛行時間の2乗に比例して変化する。このような投球の軌跡は、2次から3次程度の低次の代数式にあてはめることが出来ると考えられる。基本となる予測アルゴリズムでは、このボールの軌跡にあてはめた軌道関数式を投球初期段階で求め、その関数式にボール到達点であるバッター平面までの距離を与え、バッター平面におけるボールの到達予測座標を求めている。

y 軸方向に対しては、空気流による偏向力の他に、重力の影響も受けるが、その値は約 $9.8[m/s^2]$ と安定している。

予測処理の流れは次のようになる。飛行中のボールは絶えず動き続け、画像処理部から次々と新しいボール中心座標が送られてくる。計算部では画像処理部から送られたボール中心点座標を元にボール3次元空間座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ を計算し、

メモリ内に記憶する。数個以上のボール座標が取得できた時点でストックされたボール座標の中から任意の数点をあてはめた連立方程式による代数式を解く。求めた関数式は任意の数点全ての座標を通る軌道関数式であり、その式に到達点の z 座標を与えることでボール到達位置の x 、 y 座標が求まる。以降、新しいボール座標 P_i が得られる度に予測計算を繰り返せば、最新データによる軌道関数式が得られ、ボールがバッター平面に近づくにしたがい、予測座標が実際の到達座標に収束して行くと考えられる。

3.2 軌道関数による予測処理の問題点

画像処理部で抽出される2次元ボール画像中のボール座標は、量子化誤差のため実座標に比べ $2 \sim 4 [mm]$ 程度の誤差が含まれる。また、計算部で再構成されるボール3次元空間座標にもカメラの設置誤差等による測定誤差が含まれている。代数式から求めた軌道関数を使う予測は、代数式にあてはめる各3次元空間座標の z 方向の距離が小さいほど、予測精度が低下する。このため複数のボール座標から予測に使う任意のボール座標を選ぶ際に、各座標点間の距離を最長にすることによって予測精度の向上が期待できる。

しかし、投球初期段階における予測処理では、予測に利用するボール座標間の距離を十分に取ることが出来ないため測定誤差が予測結果に与える影響が大きく、予測座標の信頼度は低い。このため投球初期段階でも信頼度の高い予測アルゴリズムを用意する必要がある。

また、連立方程式を利用した代数式の場合、軌道関数を求めるために必要となるデータ数は軌道関数式の次数+1となる。例えば2次軌道関数式を求めるために必要となるデータ数は3点となり、それ以外の取得データは利用されない。しかし、その3点のいずれかに大きな測定誤差が含まれていた場合、その誤差が予測結果にあたえる影響は非常に大きい。そこで、測定データ全ての座標から最小自乗法によって求めた軌道関数式を使う予

測アルゴリズムも同時に利用する。この場合、計算量は増加するが各座標間に含まれる測定誤差が緩和されるため、予測結果が安定する。

3.3 x軸方向の予測

x軸方向におけるボール到達点の予測を行う場合、ボールの方向ベクトルに影響を与える力は、ボール表面と空気との摩擦による偏向力だけである。このような、変化球により発生するボールの到達点のズレは最大でも60cm程度である[5]。打球直後の3~5点のボール座標を得た時点で、最小自乗法を利用して取得データの直線近似式を求める。求めた一次式は飛球の方向ベクトルを表しており、この方向ベクトルとバッター平面とが交差する位置をx軸方向の到達予測座標とした場合、その予測座標が最大60cm以上ずれることが無い。新しいデータが取得されるたびに最新のデータを使い予測処理を繰り返すと予測結果は実際の到達点に収束すると考えられる。この予測アルゴリズムでは打球の変化量が小さいほど予測誤差が軽減され、一定量以上の変化のない打球においては、2次以上の軌道関数式を利用した予測より精度が高くなると考えられる。

3.4 y軸方向の予測

y軸方向の予測処理の場合、ボールの方向ベクトルはボール表面と空気との摩擦による偏向力に加え重力の影響も受ける。そこで、重力に注目した予測アルゴリズムを考案した。ボール表面と空気による偏向力を受けないボールは、図2に示すように放物線を描いて飛行する。この様な打球の場合順次得られる3次元空間座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ の z_{i-1} と z_i 間で進んだ距離からz軸方向の移動速度 S_z を求め、バッター平面と交わるまでの時間 t を求める。次に各点におけるy座標を調べて、 y_{i-1} と y_i の値を比較し上昇または下降するy方向の速度 S_y の計算を行う。初速度 S_y で上昇または下降している物体の t 時間後の位置は $S_y t - 1/2 g t^2$ で得ることが出来るため、この式か

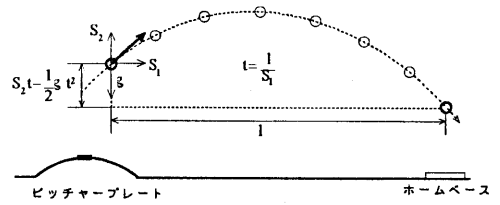


図2: 重力加速度を考慮した予測処理

らy軸に対する最終到達点予測位置を求める。しかし g を $9.8[m/s^2]$ と固定しているため、代数式を利用する予測に比べ変化球に対する予測精度が低い場合も考えられる。しかし、最新のボール座標データを得る度に、速度 S_1 および S_2 の補正を行い、同時に y_{i-1} および y_i に対する補正処理を行うことで誤差の拡大を防いでいる。重力加速度を利用した予測は代数式を使った予測に比べ、打球初期段階からきわめて大きな予測誤差が発生しない特徴を持つ。

3.5 適応的関数切り替え法

各打球アルゴリズムには、球種により長所および短所を持つため、1打球において単一のアルゴリズムを用いた予測のみでは精度が向上しない場合がある。このため複数の予測アルゴリズムを併用し、これらを適応的に切り替えることで、高精度な予測結果を得ようと考えた。

ボールの回転による偏向力が弱い場合の予測結果は、x軸では自乗法1次による直線近似、y軸では重力加速度による予測が安定した予測結果が得られると考えられる。また、代数式を利用した予測アルゴリズムでは、偏向力の大きさに関係なく打球直後の予測誤差が大きく、バッター平面に近づくにしたがい予測精度が向上している。そこで、打球直後は直線近似および重力加速度を利用した予測を行い、その後、全ての予測アルゴリズムの中から最適と思われる予測アルゴリズムを適応的に切り替える事で安定した到達点を予測するアルゴリズムを開発した。以下に適応的関数切り替えタイミングのための評価方法について述べる。

ボール到達点予測座標が以下の除外条件に対し1つでも一致した場合、対象となるアルゴリズムを予測候補から除外する。

- ① x軸方向の予測結果が自乗法1次による初期予測結果に比べ60[cm]以上離れている。
- ② y軸方向の予測結果が初期投球ベクトル方向とバッター平面の交差点より上になる。
- ③ 予測結果のばらつきが大きく、直前の予測結果との差がしきい値 d (本実験では50[cm]) を越えている。

次に、以上の条件に当てはまらなかった予測アルゴリズムに対し、直前の軌道関数式から現在のボール座標の予測を行う。最新の取得座標と各予測点との比較を行い、その差が最も小さくなった点を得た予測アルゴリズムを最終到達点予測アルゴリズムとして利用する。この処理を新しいボール座標が得られる度に繰り返す。これにより、通常の投球ではあり得ないようなイレギュラーな予測アルゴリズムを排除し、それ以外の予測アルゴリズムから、少なくとも現時点の座標を最も正確に予測しているアルゴリズムを適応的に利用することができる。

4. 実験

実験装置の計測精度を計る実験を屋外で行った。

この実験では撮影フィールド上の既知な点に対し等間隔に計測対象物を配置し、それを測定する事で実際の座標とどの程度誤差を生じるかを調べた。また、投球シミュレーションおよび実際の投球撮影を行い、これらのデータを元に本システムの予測精度の評価を行った。

4.1 基準点と三角測量の精度の評価

計測装置の精度を計る実験として、左右のカメラから得られたボール中心座標からボールの3次元空間座標を求める際の精度についての実験を行った。図3はピッチャー、キャッチャー、カメラの位置関係を表す撮影フィールドの上側面図および側面図である。2台のカメラはピッチャープレ

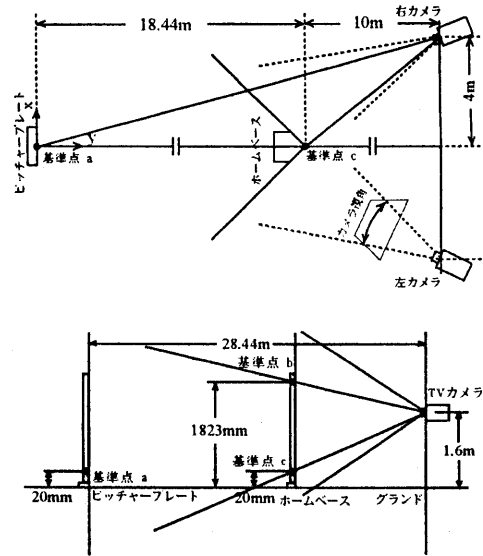


図3: 撮影フィールドの上側面図

ートからホームベースまでを結ぶ直線の延長上ホームベース後方10[m]の位置を中心として、その直線と垂直方向に各4[m]離れた位置に高さ1.6[m]で設置する。基準点の撮影のために地上200[mm]、1823[mm]の2ヶ所にマークを付けた棒状の基準点測定器を用意し、それをピッチャープレート上とホームベース上に設置した状態で撮影する。画面上に映し出された基準点測定器のマーク位置を基準

点の x 、 y 座標として記録しておく。同様に先程用意した測定器をピッチャー面からホームベースを結ぶ直線上に1[m]間隔で設置する。各地点の地上1823[mm]の位置を既知な空間座標として撮影し、 x 、 y 座標を記録する。記録したそれぞれの座標を三角測量の原理を用いて3次元空間座標に再構成し、理想値との比較を行う。実験の結果、理想値との誤差の平均は、 x 軸方向で約8[mm]、 y 軸方向で約16[mm]程度であった。ボールの直径71[mm]から考慮すると、この値は実用レベルであると考えられる。 z 軸に対する誤差は約35[mm]程度の値であったが、ピッチャーからキャッチャーま

での距離である18440[mm]から考えると、この値が全体に与える影響は少ない。

4.2 投球シミュレーションによる予測精度の評価

求めた測定誤差を加味した、投球のシミュレーションデータをコンピュータで作成し、そのデータを利用して、各種ボール到達点予測アルゴリズムの精度について検討した。

予測アルゴリズムは、 x 、 y 軸と共に連立方程式、最小自乗法による軌道関数式をもちいた予測を行い、それぞれの軌道関数式の次数、および計算に利用するデータ数を変えて実験を行った。

また、 x 軸に関しては最小自乗法1次による直線近似式による予測を、 y 軸に関しては、重力加速度による予測アルゴリズムを使い、変位量の違う複数のデータに対して予測を行い、変位量と予測結果の関係について検討した。

図4はシミュレーションによって得られた投球データに対して連立方程式により求めた軌道関数式を使い、予測処理を行った結果をそれぞれの飛跡画像に重ね合わせたものである。q1は2次軌道関数式による予測、q2は3次軌道関数による予測結果である。各取得座標の時間の間隔は1/30[s]である。図より3次軌道関数式を使った予測結果の精度は2次軌道関数式を使った予測結果に比べ、ばらつきが大きい。これは軌道関数式を使った予測の場合、関数式の次数のべき乗に比例して予測

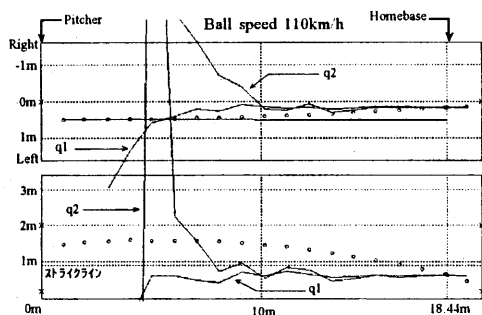


図4:シミュレーションデータによるボール到達点予測結果

誤差の値が大きくなるためであり、今後の予測実験において3次以上の軌道関数による予測処理は行わない。

最小自乗法の計算を利用した予測処理を行った結果、代数式にあてはめる測定座標の数が増加するに従い、予測結果のばらつきが減り、安定した予測結果が得られた。

最小自乗法1次による直線近似式による予測と重力加速度による予測のシミュレーション結果は、予測のばらつきが少なく、予測前半では代数式を利用した予測より良い結果が得られる。偏向力によるボール到達点変位量が約20[cm]以内に収まっている場合全体を通して軌道関数式を利用した予測アルゴリズムに比べ優れた予測結果が得られた。

4.3 実投球による予測実験

図5は、本システムで計測された2つの投球観測データに対して予測処理を行い、その結果を飛跡画像に重ね合わせたものである。 x 軸の予測には最小自乗法1次、最小自乗法2次および2次連立方程式の3種類、 y 軸には重力加速度、最小自乗法2次および2次連立方程式の3種類の手法を使用した。それぞれの結果をq1、q2、q3として図に示す。また、それぞれの予測アルゴリズムを、その時点で最適と思われるものに適応的に切り替え予測を行った結果をq4として図6に示す。ボールがバッター平面に到達するまでの時間を100[ms]単位で区切り、その間に求められた、予測到達点と実際の到達点を比較し、その差の平均を取った

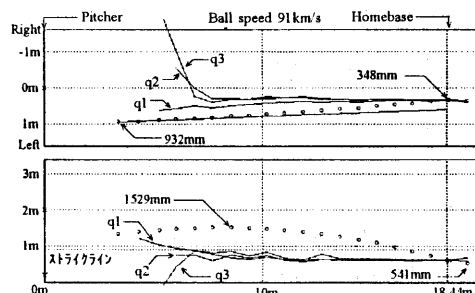


図5:計測されたボール軌跡と予測結果

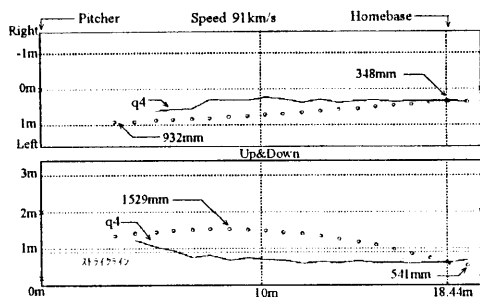


図6:適応的切り替え法による予測結果

表1:ボール到達座標の予測精度測定結果

| X 軸 予 測 誤 差 平 均 [mm] | | | | |
|----------------------|-----|-----|------|-----|
| 時間 [ms] | q1 | q2 | q3 | q4 |
| ~600 | 257 | 916 | 2050 | 257 |
| 500~400 | 157 | 149 | 63 | 96 |
| 400~300 | 101 | 65 | 64 | 64 |
| 300~200 | 43 | 37 | 60 | 43 |
| 200~100 | 26 | 12 | 12 | 9 |
| 100~ 0 | 5 | 2 | 0 | 2 |

| y 軸 予 測 誤 差 平 均 [mm] | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 時間 [ms] | q1 | q2 | q3 | q4 |
| ~600 | 441 | 143 | 538 | 364 |
| 500~400 | 229 | 104 | 164 | 102 |
| 400~300 | 140 | 59 | 41 | 88 |
| 300~200 | 66 | 22 | 18 | 49 |
| 200~100 | 28 | 4 | 5 | 16 |
| 100~ 0 | 3 | 7 | 10 | 7 |

値をまとめたものを表1に示す。

この投球はx軸方向の到達点が左方向に25[cm]程度曲がるカーブであり、自乗法1次による予測では、中盤の予測精度が悪くなる事がシミュレーションにより判明している。このような投球に対して適応的関数切り替え法による予測を行った場合、表1より到達600[ms]以前ではq1の値を、それ以降ではq2,q3の中間的な値を取っていることが判る。

y軸方向の予測に関しては、この投球は偶然的にq2の予測結果が投球初期段階から優れている。q1とq2,q3とでは、q1の方が、他の2つに比べ早い段階で予測結果を出すことが出来る。そのため、

適応的関数切り替え法では投球初期段階においてq1を強制的に使用してしまう。そのため表1のy軸のq4の初期項目はq1の結果の影響を受け、q2に比べて誤差が大きくなっている。その後はq1とq2の中間的な値を取る。以上のことから、適応的関数切り替え法は、全ての時間帯において必ずしも誤差が最小となるとは限らないが、総合的には単一アルゴリズムを利用し続ける方法に比べ予測精度が高い。

5. むすび

左右に配置されたTVカメラから得られるボール中心点座標からボールの3次元空間座標を決定し、連続して得られるボールの3次元空間上における軌跡データに対し低次の連立方程式や最小自乗法および重力加速度を加味した軌道関数式を決定し、これらを適応的に切り替えることで高精度な予測が可能であることを示した。また適応的切り替え処理で利用したしきい値dは、現在の所経験的に求めた数値を利用しているが、今後は定量化するための評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 村井, 榊田, 加藤, 諸角, 野田: "ステレオビジョンによる飛球の飛跡観測", 情処学会第44回全国大会, 7B, No.2, p.2-111, 1992.
- [2] T.Morozumi, Y.Murai, S.Masuda, T.Kato & K.Noda: "Stereo-Vision Observation of Flying Ball Locus", IEEE/RSJ Int'l Conf. Intelligent Robot & Sys., 1992 July, Raleigh.IROS'92, WP2-4, No.6, 1992.
- [3] 村井, 番匠, 山本, 野田: "両眼視による野球ボール追跡のための探索領域限定と飛跡予測", 情処学会第48回全国大会, 2-87, 1994.
- [4] 村井, 番匠, 山本, 野田: "野球ボールの追跡と到達点の予測", 情処学会研究報告, 95-CV-95, pp.1-8, 1995.
- [5] R.G.ワッツ, A.T.ベイヒル: ベースボールの科学. サイエンス社, 1993.