

色距離法を用いた野球ボールの追跡と 適合関数切り替えによる到達点の予測

村井 祐一[†] 番匠 一雅^{††}
山本 和弥^{†††} 野田 健一^{††}

ピッチャーが投球するボールをステレオ観測し、ボールの空間座標の変位をリアルタイムに決定するために、自然シーン中より背景除去を行った後に色距離法を用いるボール像抽出および中心点決定アルゴリズムを開発した。さらに次フレーム到達点予測を利用するボール追跡アルゴリズムを開発し、次フレームにおけるボール存在位置を予測することでボール像探索領域を限定した。これにより処理時間の大幅な短縮を実現し、汎用パーソナルコンピュータによるリアルタイムでのボール追跡を可能とした。またステレオビジョンを用いて連続して取得されたボールの三次元空間座標を使い最終到達点を予測するための軌道関数式を作成するアルゴリズムを開発した。さらに到達点予測軌道関数式に対し、しきい値以上の論理距離を持つボール取得座標を除去し再び軌道関数式を作成することにより予測位置の振動を減少させた。また、予測アルゴリズムを特定位置で切り替えることにより本システムにおいて良好な精度を得ている。

Baseball Trajectory Pursuit using Color Distance Recognition and Arriving Position Forecast Using Trajectory Functions Adaptively Applied

YUICHI MURAI,[†] KAZUMASA BANSHO,^{††} KAZUYA YAMAMOTO^{†††}
and KEN-ICHI NODA ^{††}

New color distance method and background scene extraction have been conveniently utilized to recognize and extract ball area on the TV scenes. Also new ball position forecast algorithm that succeeds in searching the ball process within a TV frame is effectively utilized to organize get a real time ball search. The results have successfully been utilized to stereo vision ball trajectory searching system which is one of the typical problems of moving particle extraction processes. The obtained coordinated ball on TV image are converted into three dimensional ball trajectory. Real time three dimensional ball position determination has been successfully demonstrated using conventional personal computers. Continuously obtained three dimensional ball positions have been utilized to get the flying ball trajectory as simple mathematical functions, the least square method. In addition, ball arriving point on catcher plane has been forecast with high accuracy equal to several tens of millimeters which is sufficiently smaller than the bat diameter of 71 mm.

1. はじめに

自然シーン中より特定の移動物体の抽出を行い、その運動パターンや形状の時間的変化を高速に解析し、動作予測や追跡を行う技術に関する多くの研究が行われている。ステレオビジョンによる移動物体解析処理

の応用分野の1つに飛行する野球ボールの追跡¹⁾および到達座標予測の問題がある。これはピッチャーの投げるボールの映像をステレオ観測し、ボールの時々刻々の空間位置の精密計測、最終到達位置の予測、ロボット捕打球などの高度処理を汎用パーソナルコンピュータを用いて行おうとするものである。従来技術による単なる飛球の速度計測はすでに実用されており、ストライクやボールの判定も試行され始めている。しかし、より高度な解析機能を持ち、カーブ、シュート、フォークなどを代表とする変化球に対する詳細かつ正確な飛跡の客観的計測データを得ることができる技術や、ロボット捕球やロボット打球を行う技術は実現されてい

[†] 調布学園女子短期大学

Chofu Gakuen Women's Junior College

^{††} 拓殖大学工学部

Faculty of Engineering, Takushoku University

^{†††} 日本電気セキュリティシステム

NEC Security Systems

ない。これらの技術が実現すれば、特別なセンサなどを利用しないストライクやボールの自動判定、変化球などの球種の判断、投手の能力評価および訓練などに、きわめて有効であると考えられる。

特定の移動物体の追跡を行う技術として、専用プロセッサを用いたピンポンボールの飛跡観測やロボットラケットによる打球の可能性が示されている²⁾。またオプティカルフローを用いた移動物体追跡についてシミュレーション等によって動作が報告されている^{3),4)}。またステレオビジョンによる移動物体の対応付けおよび追跡の問題を解決する有効な技術としてEZDF⁵⁾なども提案されている。これらの技術は実時間処理には至っていないものや、実時間処理を実現するために専用設計されたハードウェアを用いるものが多く、本研究の目的としている汎用パーソナルコンピュータによる実時間処理とは目的が異なる。また、パターンマッチングのような比較的単純なアルゴリズムでは本システムにおいて撮影されるボールの大きさが4~20ピクセルと変動するためリファレンスデータを決定することが難しい問題もある。

本研究では観測する対象物体を「野球のボール」という基本的に単一色で構成される小物体と限定しているため、色距離法¹⁾や連続度法¹⁾を利用することにより複雑な画像処理を必要とせずステレオ画像間におけるボール像の対応付けを行うことが可能である。同時に動き予測による探索領域の限定を行い計算コストも抑さえ、汎用パーソナルコンピュータ（富士通 FM-TOWNS i486DX2-40 MHz, 320×240 ピクセル）での実時間処理を実現した。

本研究の最大のねらいはボールが飛行中にボール到達座標を予測するアルゴリズムを作成し、誤差の少ない予測データをロボットキャッチャーやロボットバッターに駆動情報として与えることにおかれている。しかし予測計算は時々刻々に取得されるボール三次元空間座標を入力データとし、予測アルゴリズムで計算されるが、その際に両眼のテレビカメラ上で取得されるそれぞれのボール座標には、量子化誤差が含まれることはさげられない。したがって両眼のボール座標から計算されるボール三次元空間座標にも誤差がさげられない。また、ロボットの駆動時定数は0.1[ms]のオーダーであって電子回路機器と比べるとかなり遅い。そこで我々は、この誤差処理にあたってロボットに与える駆動情報に含まれる誤差をボールがバッター平面に到達するよりかなり早い時期にいかにはらつきの少ない量に抑圧できるかに最大の研究目標を置くべきであるとの結論に達した。5章以降説明する予測アルゴリズ

ムは特殊な軌道関数を利用するなど、この指針に沿うよう考案作成検討されたものである。

2. システムの構成

本システムは図1に示すように、フレーム同期をとってステレオ配置された左右のカメラ、カメラより得られた自然シーンからボール像を抽出し、その中心点の決定を行う画像処理部、画像処理部より送られてくるボール中心点座標を元にボールの三次元空間位置を算出し、複数の連続して得られた三次元空間位置よりバッター平面上のボール到達座標を予測する計算部、ロボットキャッチャー（現在は未実装）およびロボットバッター（現在は未実装）から構成される。画像処理部および計算部は汎用パーソナルコンピュータとソフトウェアにより構成される。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2、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面図および側面図である。2台のカメラ設置位置は現実に配置可能でピッチャー・キャッチャー間をレンズ視野に収めることができ、かつバッターの存在を問題としない位置としてピッチャープレ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1.5[m]で設置する。左右それぞれのカメラで撮影された自然シーンはデジタル化され、各画像処理部に入力される。画像処理部では入力された画像に対し各種ボール探索アルゴリズムを用いてボール像の検出と中心点の決定を行い、計算部に対しボール中心点座標の送出を行う。計算部側では左右の各画像処理部から得られたボール中心点座標より三次元空間上における

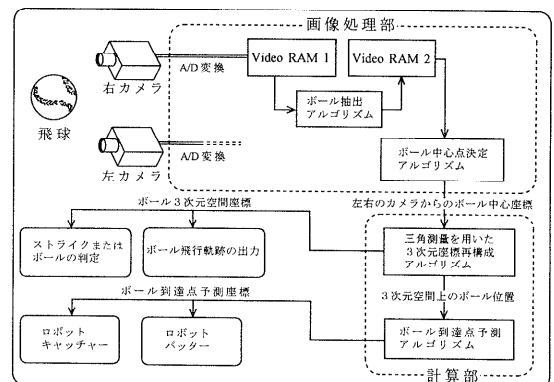


図1 システム構成図

Fig.1 System configuration.

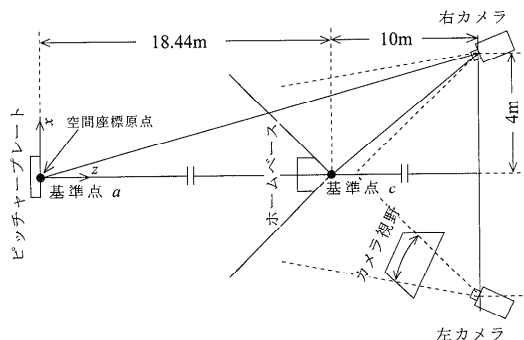


図2 上面図
Fig. 2 Up view.

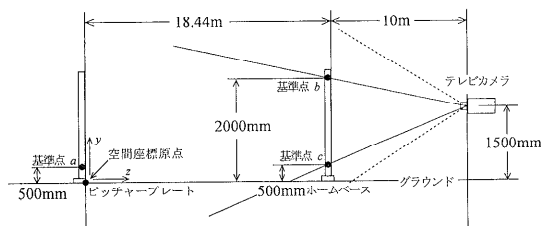


図3 側面図
Fig. 3 Side view.

ボール座標の再構成計算を行い、さらに連続して得られるボールの三次元空間座標から、ボールのバッター平面上の到達座標位置の予測を行い、ロボットキャッチャーやロボットバッター機器に現在のボール座標と予測到達座標の送出を行う。

3. 自然シーン中からのボール像の抽出

移動物体の抽出には背景除去^{6),7)}が有効であり、本研究でも RGB (24 bit color) カラー画像間における背景除去を用いてボール像の抽出を行っている。しかし背景除去のみでは撮影像中にボール像以外の移動物体が映った場合や微妙な背景シーンと撮影シーンとのズレなども移動物体として抽出してしまう。この問題を解決するために背景除去とは別の処理として色距離¹⁾を用いて自然シーン中から直接ボール像を抽出するアルゴリズムを作成した。また、観測対象となる自然シーンに対してボール像が占める面積はわずかなものである。したがって自然シーンの全領域をボール探索領域とせず部分的に限定することができれば、ボール像認識時の障害となるノイズ成分や他の移動物体などが探索領域に混入する確率を抑えることができ、同時に領域を限定することで処理時間の短縮が図れるため、ボール像探索領域を限定するアルゴリズムも開

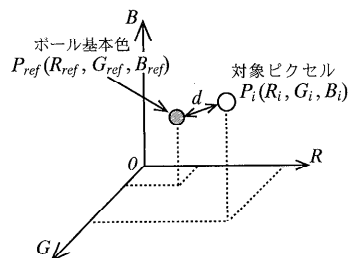


図4 色距離概念図
Fig. 4 Concept of color distance.

発した。以下に各アルゴリズムについての説明を行う。

3.1 色距離を使ったボール像抽出アルゴリズム

自然シーンおよび背景除去画像中からボール像の抽出を行う場合、画像中よりボール像を構成している可能性があるピクセルの検出を行い、そのピクセルが実際にボール像を構成しているかどうかの判定を行う。ボール像を構成している可能性があるピクセルの判定は図4に示すようなボール基本色 P_{ref} と呼ぶ、毎投球ごとに取得した自然シーン中におけるボール像の平均的な RGB (24 bit color) の色情報と検出対象であるピクセル P_i 間における色距離の比較を行うことで決定する。色距離とは基本色と検出対象ピクセルの RGB それぞれの値を RGB を三軸とした三次元空間に対して投影し、互いの空間上における論理距離を求めたものである。よって互いの色距離が短い検索対象ピクセルをボール像近似色として判断し、ボール像の候補とする。

さらにボール像検出時における信頼性と精度の向上をはかるため、ボール像候補ピクセルに対し背景除去も併用して移動物体であるかどうかを調べるアルゴリズムも開発した。ここでの背景除去はあらかじめ撮影しておいた背景シーン中における同一座標上のピクセルとの色距離の比較を行い、その差がしきい値 (現在は 60) を超えている場合に、ボール像を構成しているピクセルとするものである。本アルゴリズムを用いて自然シーン中よりボール像を抽出する実験を 6.1 節に示す。

3.2 ボール中心点決定アルゴリズム

ボールは約 71 [mm] の直径を持つため、撮影像中では 4~20 ピクセルの横幅を持つ。したがってステレオビジョンによる正確な対応付けを行うためには、つねにボール中心点を決定する必要がある。ここで、画像処理部のビデオメモリの構成上、ラスタ走査が最も効率が良いため、次に示す 2 種類のボール中心点決定アルゴリズムを開発した。これらのアルゴリズムは画像を 1 回走査するだけですべての処理が完了する特徴を

持つ。実験により中心点計測精度の評価を行った。以下に各ボール中心点決定アルゴリズムについて述べる。

(1) 分布中心法

画像内におけるボール像は基本色に近い色情報を持ったピクセルの集合体である。この点に注目し探索領域内において、基本色に近似したピクセルを検出し、検出されたピクセルの X, Y それぞれの座標を加算する。次に、得られた座標の総和を検出したピクセルの総数で割ることによって、領域内における基本色に近いピクセルが分布する分布中心座標を得ている。この方式では探索領域内に実際のボール位置と離れた地点にノイズ成分が存在している場合において取得されるボール分布中心座標がノイズ側に引っ張られてしまうという弱点が存在する。しかしこの問題は探索領域を限定することにより改善される。6.2 節に実験結果を示す。

(2) 連続度法

探索領域内をラスタ走査し、ボール像の候補となる基本色に近い色情報を持つピクセルが最も連続しているラインをボールの横方向の直径と等しいと考える。しかし本システムで取得されるボール像の大きさは4~20ピクセルであるため、この条件を満たさないラインはボール中心像以外のノイズ像であると判断する。よって前述の条件を満たすボール像において横幅が最も広いラインは縦方向の中心も通っているため、このラインの中点をボールの中心とする。6.2 節に実験結果を示す。

3.3 探索領域の限定と予測

ボール像探索領域の限定を行うため図5に示すような、ピッチャーの手から投球されるボールを必ずとらえる待機領域をあらかじめ定めておき、ボールの放出を待つ。この領域内にボール像が検知されれば、中心点の計測を行い記録し、領域内のボールが移動するのを待つ。領域内でのボール像の移動が確認された時点で次フレームボール位置予測処理が開始される。以下に次フレームボール位置予測アルゴリズムについて説明する。

ボールはいったんピッチャーの手を離れてしまえば、外部から力を加えることができないため、飛行中には重力および空気との摩擦による一定方向への偏向力が働くだけである。このため飛行中のボールはなめらかな飛跡を示し、飛行速度や方向が急激に変化することはない。したがって飛行しているボールの連続した3点 a, b, c 、について考えてみると、別の物体に衝突するなどの原因により速度や方向の急激な変化がない限り、同図に示すように \vec{ab} と \vec{bc} は、ほぼ等しいと考えられる。よって連続した2点 a, b が取得できれば、

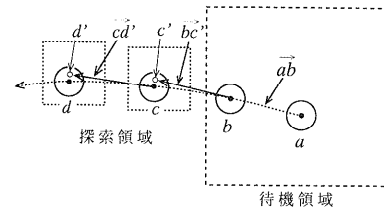


図5 次フレームボール位置予測

Fig. 5 Ball forecast in next frame position.

c 点の予測存在位置 c' をある程度予測することができるため、次フレームにおける探索領域を予測点 c' 近傍のみと小面積に限定することが可能となり、処理時間の短縮にもつながる。ボール像探索領域限定アルゴリズムにより1シーンの解析に必要とする処理時間の短縮と領域の限定にともなう認識率の向上を実験(6.2 節)によって確認した。

4. 実空間座標への変換

実空間上における野球ボールの座標はステレオビジョンを利用した三角測量の原理によって求めている。ステレオビジョンにおいて三次元情報を抽出するには対応点の決定が大きな課題となる⁸⁾。しかし本システムにおける対応点(ボール中心点)は3.2 節の分布中心法や連続度法により決定されているため、前述した問題は解決されている。

次に、実空間上における三角測量においてカメラの設置場所や高さを正確に設定するのは困難ではないが、カメラの視線方向を目的の角度に正確に調整するのは必ずしも容易ではない。そこで、撮影フィールド上に空間座標が既知、または正確に計測可能な点を複数点設置し、撮影シーン中に映し出されるそれらの点を三次元空間上における基準参照点として、画像中から得られるボール中心点との相対座標関係より三次元空間上の位置計測を行っている。この方法によりカメラ角度のずれの問題や画像取り込み時におけるアスペクト比の問題が解消される。

三角測量を用いてボールの空間位置を取得するには2台のテレビカメラ間を通る直線とカメラとボール中心点を通る直線との角度を取得しなければならない。図6は、テレビカメラに映し出される撮影シーンである。同図に示すように撮影フィールド内のピッチャープレート上に1点、ホームベース上に2点の基準点を設け、その位置に基準点測定器を設置し、2台のテレビカメラで撮影を行う。左右のテレビカメラに映し出された、 a, b, c 点それぞれの基準点の X, Y 座標を記録しておく。次に基準点の撮影時と同じカメラ位置で撮影された投球シーンからボール座標 $p(Xp, Yp)$ を取得

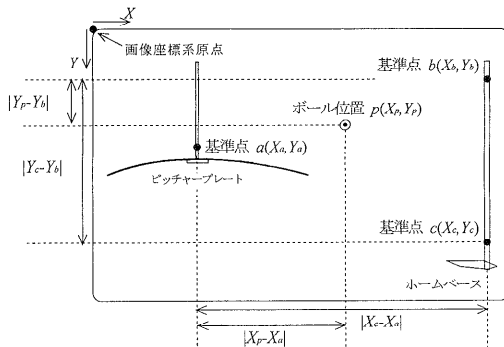


図6 撮影シーン
Fig. 6 Picture scene.

する。三角測量に必要なボール座標に対する角度を取得するには、 X 軸方向の角度は同図に示す $|Xc - Xa|$ と $|Xp - Xa|$ 、 Y 軸方向は $|Yc - Yb|$ と $|Yp - Yb|$ の相対座標関係から求めることができる。本システムの計測精度を測るための実験は 6.3 節で行っている。

5. ボール到達座標予測処理

ロボット捕打球を実現するためにはボールがバッター面に到達する以前にボール到達位置を予測して捕打球機器を移動する必要がある。ボール到達位置の予測はボールの連続した三次元空間座標よりボールの描く軌跡を求め、この軌跡がバッター面と交差する位置を求めることにより行っている。

5.1 飛行するボールの軌跡

飛行するボールの軌跡について考察する。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って変化が生じる。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、表面形状など多くの要素によって決定される。また一定以上の回転数で、飛行しているボールに働く偏向力は、ナックルボールと呼ばれる特殊な変化球を除いて絶えず一定方向に影響する⁹⁾。このような投球の軌跡は、2次程度の低次の関数式にあてはめることができると考えられる。ボール到達座標予測アルゴリズムでは、リアルタイムに観測されたボールの軌跡にあてはまる軌道関数式を求め、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ることで、バッター平面における予測到達座標を求めている。また地面に対して垂直方向には、重力の影響も受け、重力加速度は約 $9.8 [m/s^2]$ と一定であるため、あらかじめ影響力を予測することが可能である。

5.2 予測処理の流れ

ボール到達点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座標を元に、実時間でボール三次元座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ を計算し記録する。数点（現在は5点）のボール座標値が取得できた時点で記録しておいたボール座標に適合する1次式 $x = f_1(z) = a_0 + a_1z$ および2次式 $x = f_2(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2$ 、 $y = g_2(z) = b_0 + b_1z + b_2z^2$ を最小自乗法によって求め、予測に利用するための軌道関数式とする。これらの式で $z = z_0$ (z_0 はバッター平面の z 座標値) とおけばボール到達点の x, y 座標を予測することができる。以降、新しいボール座標 P_i を得る度に予測計算を行うことで、最新の座標データによる軌道関数式が得られ、バッター平面に近づくに従い、予測座標が実際の到達点に収束することを 6.4 節の実験によって確認した。以下に到達点予測アルゴリズムについて説明を行う。

5.3 予測アルゴリズム

x 軸方向におけるボール到達点予測の場合、予測に利用する軌道関数式の係数は実験により1~2次程度で問題がないことが分かっている。1次式による予測は2次式による予測に比べて、投球直後よりばらつきが少ない予測結果を得ることができるが、変化球のようにボールの変化量が大きい投球の場合は予測精度の低下が発生する。これに対し2次式による予測の場合、投球直後は測定誤差などの原因による予測到達座標の大きなばらつきが発生する場合があります。ロボット捕打球が困難となる。しかし、取得座標が増加するにともない予測精度が向上し変化球にも対応する。

y 軸方向のボール到達点予測については、最小自乗法2次の軌道関数式による予測と図7に示すボール落下量計算法がある。前者の軌道関数予測においては、 x 軸と同様にボール飛跡に最も近似した2次の軌道関数式の係数を求める。その軌道関数とバッター平面との交点が到達予測点である。この軌道関数はボールの新しい三次元空間座標が得られるたびに更新されるので、到達予測点もそれに応じて更新される。

後者のボール落下量計算法は、順次得られるボール三次元空間座標に対して最小自乗法2次式により、ボールの飛跡に最も近似した軌道関数式を求めるところまでは前者と同じである。その軌道関数に対する最新のボール位置での接線を求める。この直線とバッター平面との交差点 y_s がボールが落下しないと仮定したときの到達点である。さらに取得したボールの三次元空間座標を $P_i(x_i, y_i, z_i)$ としたときの z_{i-1} と z_i 間で進んだ距離 d_1 と1フレーム表示時

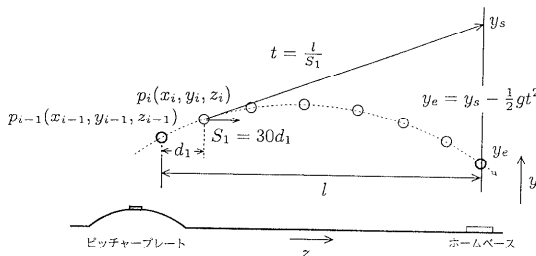


図7 ボール落下量計算法による予測

Fig. 7 Arriving position forecast by quantity of ball dropping.

間 33.3 [ms] からボールのバッター方向の速度 S_1 が求まる。ボールは水平方向にはバッター平面まで等速度運動をすると仮定すれば、バッター平面までの所要時間 t が求まる。ボールは周知のとおり、下方に $g = 9.8 [\text{m/s}^2]$ の重力加速度を受けるため、 t 時間後の落下量は $\Delta D = (1/2)gt^2$ で計算できる。ボール速度により異なるが、速度 150 [km/h] 程度のボールがピッチャーの手を離れた直後では $\Delta D = 1000$ [mm] 程度、ボールがピッチャー・キャッチャー間の中心付近を飛行時には $\Delta D = 250$ [mm] 程度である。バッター平面上のボール到達予測点は y_s の ΔD 下の点として求まる。新しいボールの三次元空間座標が取得されるたびに到達予測点が更新されるのは前者の方法と同じである。

ボールは上下方向には重力加速度以外に、空気との摩擦による偏向力を受ける。ところが、後者の方法では重力加速度のみしか考慮に入れていない、またボールの水平方向の運動を等速度運動と仮定しているため、これらが予測誤差の原因となる。しかし、この予測誤差はボールがバッター平面に近づくにしたがって減少する。しかも空気との摩擦による偏向力は最高技能を持ったプロ選手でも g のたかだか 20%程度⁹⁾といわれており、ボールがピッチャーからキャッチャー間の中心付近を飛行時にはその誤差は 40 [mm] 程度となり、十分他の方式と比較検討の対象となりうる。後の説明で分かるように、この方式は安定した予測結果を示す有力な方法であることが実験で明らかになった。6.4 節に到達点予測実験の結果を示す。

5.4 誤差データ除去および関数切り替えアルゴリズム

ロボット捕打球を行おうとする場合、投球後なるべく早い時期に捕打球機器に対して予測到達座標を与える必要がある。しかし取得ボール座標中に大きな誤差が含まれている場合、予測精度が低下し、また予測到達点のばらつきが生じる。よって取得されたボール座

標中より誤差データを除去することができれば、予測精度の向上と予測到達点のばらつきを押さえることができると考え、誤差データを除去するアルゴリズムを作成した。

数点（現在は 5 点）の連続した三次元ボール座標が得られた時点で最小自乗法 1 次の予測および最小自乗法 2 次の予測での近似軌道関数式を求める。この関数式と各フレームにおいて取得されたボール座標の距離を計測し、しきい値（ボールの z 座標により変化）を越すボール座標を誤差データとして除去する。しきい値は 6.2 節で求めたボール中心点決定誤差 (21 ~ 9 [mm]) の 2 倍 (42 ~ 18 [mm]) とした。

また、ボール到達点予測処理において投球前半では最小自乗法 1 次予測およびボール落下量計算法による予測誤差が少なく、後半では最小自乗法 2 次予測の精度が向上することが 6.4 節の実験によって分かっている。よって、予測に利用する関数を特定のタイミングにおいて切り替えることで全領域での予測精度の向上を計っている。特定タイミング決定のための実験結果は 6.4 節に示す。

5.5 予測誤差上限目標値

ボール到達点予測誤差をいくら以下にすればよいか、絶対的な基準があるわけではない。しかし、予測の効果を高いものとするには「ロボット打球に際して少なくとも空振りをしない予測データを出力する」ことを目標とする考え方が最も手軽であろう。そのためには、ボールの直径およびバットの直径が約 70 [mm] であることから、 y 軸方向予測誤差上限を 70 [mm] とする⁹⁾。 x 軸方向の誤差上限は y 軸方向より大きくてよいから、その 2 倍の 140 [mm] とする⁹⁾。 z 軸方向の誤差上限は、打球がフェアグラウンド内に飛行することを基準とすると約 200 [mm] となる。キャッチャーミットによる捕球については、予測誤差上限を、捕逸しないことを目標とすることから x 、 y 軸方向ともミットの寸法 130 [mm] とする。 z 軸方向については、打球の場合の 200 [mm] よりかなり大きな値でもよいとする。次にロボットバッターを対象とした場合に、ロボットに通知するボールのバッター平面到達予測時刻の所用精度は次のように評価できる。ロボットが予測時刻を得てからピッチャー返しの安打を打てるようなタイミングでバットのスウィングが行えるためには、系全体の固定の遅延時間を打ち消すための初期設定が必要である。初期設定ができたという条件下において、バットを等回転速度 400 [°/s] で回転させることができるロボットバッターがバットの回転軸を中心に 900 [mm] の位置でボールを打った場合、打球が少なくともフェア

グラウンド内に返されるための予測通知時刻の許容誤差は、80 [km/h] で飛行するボールの場合 ± 70.1 [ms], 140 [km/h] で飛行するボールの場合 ± 63.5 [ms] である。この値は処理系にとって難しいものではないため、これらの値をシステムの仮の誤差上限値とする。

6. 実験

6.1 ボール像抽出実験

背景除去、色距離法および背景除去+色距離法を使って自然シーン中よりボール像を抽出する実験を行った結果を図8に示す。同図より撮影像が背景像に対し何らかの理由により微妙にずれた場合、ボール像以外の部分も抽出してしまうことが分かる。また色距離法のみを利用してボール像の抽出を行った場合は、画像中に基本色に近似する色を持つ像が存在している場合、その像もボール像として抽出してしまっている。これに対し背景除去と色距離法を併用することで、より正確にボール像の抽出を行うことが可能となる。

6.2 ボール中心点決定実験

ボール中心点の決定精度を評価する実験を行った。60枚の自然シーン中から背景除去、色距離法、および色距離法+背景除去を利用してボール像の抽出を行い、抽出されたボール像に対して分布中心法および連続度法のボール中心点決定アルゴリズムを適用して得られたボール中心点と、自然シーン中から人間が決定したボール中心点との座標間の差に対する rms 誤差を求めた。同時に探索領域を限定することによる各アルゴリズムの精度の変化も調べた。実験結果を図9に示す。

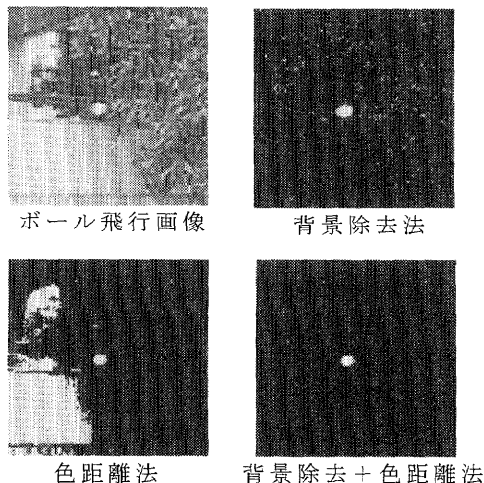


図8 ボール抽出実験

Fig. 8 Experimentation of ball extraction.

同図より、各アルゴリズムともに基本的には探索領域の限定にともない中心点決定精度が向上している。特に分布中心法では探索領域を限定することでの精度の向上が顕著であった。ここで注目する点は背景除去に連続度法を組み合わせたアルゴリズムと色距離法+背景除去に連続度法を組み合わせたアルゴリズムである。この両アルゴリズムは探索領域の大きさにほとんど影響されずノイズに強い特性を持つことが分かった。両者はボール中心点決定を連続度法で行っていることから連続度法はボール中心点決定を行うための有効なアルゴリズムであると考えられる。また最も精度が高い色距離法+背景除去に連続度法を組み合わせたアルゴリズムによる中心点決定時の rms 誤差は 1.5 [pixel] であった。三次元空間上における 1 ピクセルの大きさは 6~14 [mm] であるため、本アルゴリズムの三次元空間上における両眼視での誤差は図2 および図3のシステム配置の場合には投手による投球直後が最も大きく、最悪値で x, y 軸方向に 9~21 [mm] 程度、 z 軸方向に 60~140 [mm] 程度であると考えられる。探索領域と処理時間の関係を図10に示す。同図より探索領域面積の現象に応じて処理時間は直線的に減少し、探索領域面積 0 [pixel] において約 0.4 [ms] であり、十分短いものであった。

6.3 三角測量校正誤差の評価

三角測量校正誤差を計る実験を行った。この実験では図11のように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、それらの機知点をステレオ撮影し、撮影データより三次元座標を計算し、正しい三次元座標とどの程度ずれるか、すなわち校正誤差を調べた。なおボール中心点決定誤差の要因をなるべく除いた誤差評価を行うため、計測対象物を画像評価誤差の小さい直径 2 [cm] の球状の標的としている。既知点撮影のために地上 500, 1000, 1500, 2000 [mm] の4カ所に観測点を付けた基準点測定器を用意し、それをピッチャープレート上からホームベース上間に 1 [m] 間隔で設置した状態で観測し、理想値との誤差を計測した。 x 軸方向の平均偏差は 1.6 [mm], 標準偏差は 6.7 [mm] であった。 y 軸方向の平均偏差は 8.7 [mm], 標準偏差は 16.8 [mm] であった。 z 方向の平均偏差は 6.1 [mm], 標準偏差が 37.2 [mm] であった。以上求めた校正誤差にボール中心点決定精度の最悪値を加味すると x 軸方向では 27.7 [mm], y 軸方向では 37.8 [mm], z 軸方向は 177.2 [mm] となり、誤差上限目標値である。 x 軸方向 140 [mm], y 軸方向 70 [mm], z 軸方向 200 [mm] 以内であった。

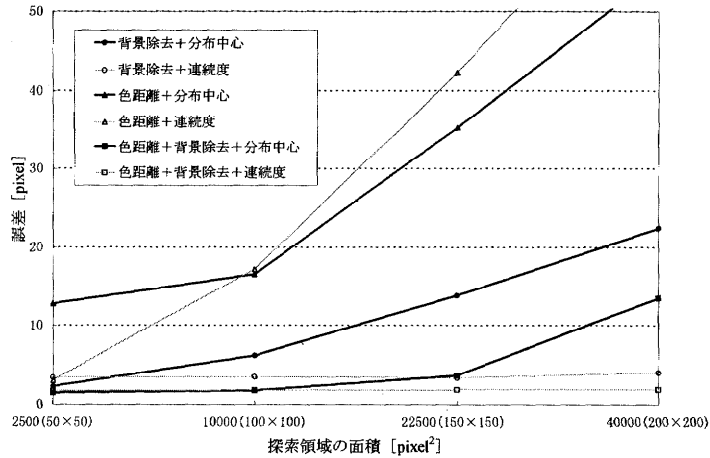


図9 ボール中心点決定精度
Fig. 9 Measured ball position accuracy.

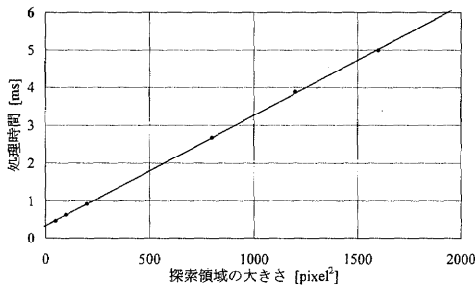


図10 探索領域と処理時間
Fig. 10 Relation between the size of search area and search time.

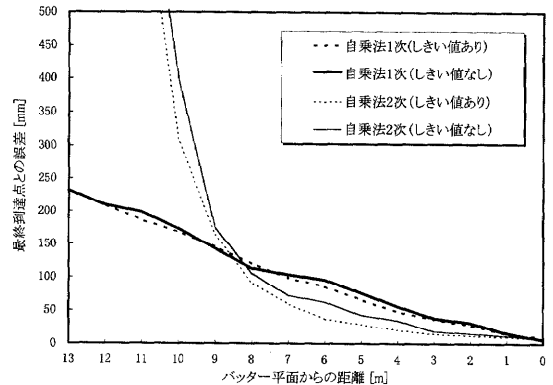


図12 x方向の平均予測精度
Fig. 12 Averaged accuracy of arriving x position forecast.

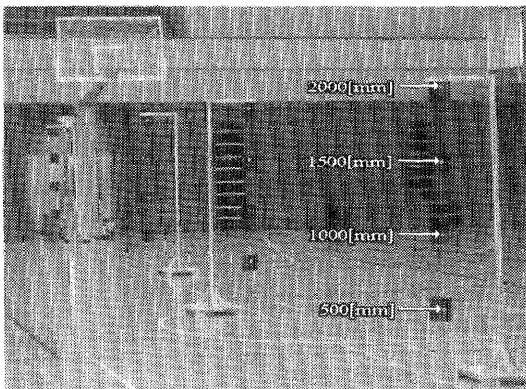


図11 基準点の測定
Fig. 11 Base point measurement.

6.4 実投球による予測精度とばらつきの評価

本予測方式の精度評価のために、ある社会人球団の投手にストレート、カーブ、シュート、フォークなどを含む40球を投球してもらった。図12の横軸はバッター平面からの距離である。横軸の各点における縦軸

の値は、その横軸の位置をボールが飛行している時に得られた予測x座標と、実際の到達x座標との差の絶対値を40球について平均して求めたものである。図13は同様な処理をy軸方向について行ったものである。これらの方法で求めた平均誤差のバッター平面からの距離の全域にわたって平均した値を“予測精度”と定義する。このような統計処理において、誤差のrmsを求める方法もあるが、安全側の誤差評価を得るために絶対値の平均をとった。

ロボットに与える駆動信号はなるべく“ばらつかない”ことが望ましい。ばらつきの度合いを評価するために、ある投球のフレームで得られた予測座標と、その前のフレームで得られている予測座標の差をとり、その絶対値の40投球についての平均をさらにバッター平面からの距離の全域にわたって平均した値を“ばらつき度”と定義する。

5.4節で述べた誤差データ除去法が予測精度とばらつ

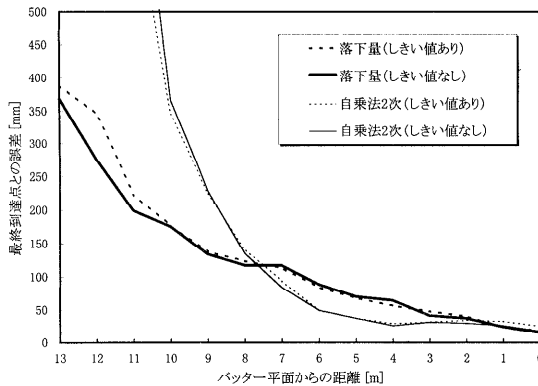


図13 y 方向の平均予測精度

Fig. 13 Averaged accuracy of arriving y position forecast.

き度と与えた改善度について評価する。 x 軸における最小自乗法1次予測は誤差データ除去を行うことによって予測点のばらつき度は24 [mm] から19 [mm] へと減少した。しかし、予測精度は106 [mm] から103 [mm] となりほとんど向上は見られない。最小自乗法2次による予測では誤差データ除去を行うことによって、ばらつき度は317 [mm] から301 [mm] へと減少し、予測精度も252 [mm] から239 [mm] と向上した。 y 軸におけるボール落下量計算法は誤差データ除去を行うことで予測点のばらつき度は55 [mm] から54 [mm]、予測精度は123 [mm] から131 [mm] となり向上は見られない。最小自乗法2次による予測では誤差データ除去を行うことでばらつき度は328 [mm] から279 [mm] へと減少し、予測精度も298 [mm] から241 [mm] と向上した。

前述した結果より、誤差データ除去は2次関数式を使う予測に対して効果があり、全体にばらつき度を抑える効果があることも分かった。また予測に利用する軌道関数式に3~6次の高次関数式を使って実験を行ったが、どの次数の関数式も1次および2次の関数式に比べ予測精度の向上は見られず、むしろ大幅に精度が低下する現象が見られた。これはシステムの持つ計測精度が3次以上の関数式に対しては十分でないため量子化誤差を中心とする計測誤差が強調されるためであると考えられる。

6.5 予測関数切り替え法の評価

ロボット捕打球のためのボール到達点予測誤差はなるべく小さくしたいが、漠然とバッター平面からの距離の全域で誤差を小さくするという考え方は不十分で、ロボットによる捕打球のための到達点予測に好都合な誤差分布を得るようにすることが重要である。また、ロボットの時定数は通常数十~100 [ms] 程度と、

電子機器に比べかなり遅い。したがってボール到達の100 [ms] 以前、たとえば300~100 [ms] 前にロボットに与える駆動信号がロボットの正確な動作に最も重要な要因となる。さらにストライクゾーンに到達しないボールの捕打球まで行おうとする場合は投球直後より、なるべく早い時期に少しでも到達点近傍に移動しておく必要があり、同時に大きな誤差をとまなう予測もなるべく避けたい。その意味から5.4節で述べた予測関数切り替え法が予測値の初期の大きなばらつきを減少させる効果は明らかである。予測関数を切り替えるタイミングは本実験では図12および図13より、 x 軸方向ではボール到達8.5 [m] 前、 y 軸方向では7.5 [m] 前付近であることが分かった。

また、前述した予測精度の向上やばらつき度を抑えるアルゴリズムおよび予測関数切り替え法を適用した結果、ロボット捕打球に必要な予測誤差が x 軸方向の目標値である140 [mm] まで収束する地点はバッター面より9 [m] の位置で、 y 軸方向の目標値である70 [mm] まで収束する地点はバッター面より7 [m] の位置であった。この距離は80 [km/h] で飛行するボールの場合 x 軸ではバッター平面到達409 [ms] 前、 y 軸では318 [ms] 前、また140 [km/h] で飛行するボールの場合では、それぞれ231 [ms] 前、180 [ms] 前である。各フレームにおける予測ボール到達時刻と実際の到達時刻との差を z 軸方向の予測誤差と定義する。実験データより z 軸方向の予測誤差が5.5節で求めた予測通知時刻許容誤差以内におさまる時刻は80 [km/h] 時で697 [ms] 前、140 [km/h] 時で397 [ms] 前であった。

7. むすび

テレビカメラより得られた自然シーン中を飛行するボール像のボール中心点座標を決定するアルゴリズムを開発し、ボール中心点決定時のrms誤差を1.5 [pixel] 以内とした。また時間的に連続して得られるボールの三次元空間座標より、誤差データ除去を利用した最終到達点予測実験を行い、 x 軸の予測ではバッター平面から8.5 [m]、 y 軸の予測ではバッター平面から7.5 [m] の位置で予測アルゴリズムを切り替えることで最適な予測が行えることを確認した。 x 軸における平均最終到達点予測精度は8 [mm]、 y 軸における平均最終到達点予測精度は19 [mm] であった。ボール中心点決定誤差と到達点予測誤差とを合わせると、本システムにおける最終到達点予測精度は x 軸方向では17 [mm] 程度、 y 軸方向では28 [mm] 程度であると考えられる。これらの値はロボット捕打球を実現することが可能な精度を持つと考えられる。また、ロボット捕打球機器

に残された時間を定量化した。またすべての処理は汎用パーソナルコンピュータにおいてフレームレートで行うことが可能であり、これにボール抽出、ボール中心点決定、三次元空間座標変換および到達点予測処理の総合時間である7[ms]を加算すると40[ms]となる。これがシステム全体の持つ絶対遅れ時間である。よってすべての予測処理を絶対遅れ時間を考慮して行うことで実時間処理が可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 村井祐一, 番匠一雅, 山本和弥, 野田健一: 投球された野球ボールの自然シーン中からのボール像の抽出と追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.1, pp.163-166 (1996).
- 2) Takayanagi, S.: Industrial Robots in Japan-Today and Future, Keynote Speak of *IEEE/R SJ Int'l Conf Intelig. Robot & Sys., Ralaigh* (Jul. 1992).
- 3) 千葉昌孝, 小沢慎治: 勾配法に基づく移動物体追跡のための一手法, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.3, pp.423-432 (1990).
- 4) 鈴木 智, 中根一成: 時空間輪郭積分法による動柔物体の抽出, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.10, pp.2184-2191 (1993).
- 5) 喜多伸之, Rougeaux, S., 國吉康夫, 坂根茂幸: 仮想ホロボタを用いた実時間両眼追跡, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4 (1995).
- 6) Takagi, M. and Sakaue, K.: The Analysis of Moving Granules in a Pancreatic Cell by Digital Moving Image Processing, *Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recognition* (1992).
- 7) Yachida, M. Asada, M. and Tsuji, S.: Automatic Analysis of Moving Images, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-3, No.1, pp.12-20 (1981).
- 8) 白井良明: コンピュータビジョン, pp.65-75, 昭晃堂 (1980).
- 9) ワッツ R.G., ベイヒル A.T.: ベースボールの科学, サイエンス社 (1993).

(平成8年3月25日受付)

(平成9年1月10日採録)



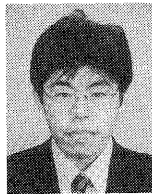
村井 祐一 (正会員)

1967年生。1991年拓殖大学工学部情報工学科卒業。1996年同大学院工学研究科博士課程後期満了。現在、調布学園女子短期大学専任講師(情報処理)。画像工学および福祉情報処理の研究に従事。著書「はじめてのVZエディタ」株式会社秀和システムほか。日本ロボット学会会員。



番匠 一雅 (学生会員)

1970年生。1993年拓殖大学工学部情報工学科卒業。1995年同大学院工学研究科博士課程前期修了。現在、同大学院工学研究科博士課程後期在学中。物体認識、物体の軌跡予測の研究に従事。著書(共著)「日本GATEWAY2000スペシャルファンブック」株式会社秀和システムほか。



山本 和弥 (正会員)

1970年生。1996年拓殖大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年日本電気セキュリティシステム入社。以来パターン認識、特に指紋照合の研究に従事。



野田 健一 (正会員)

1927年生。1948年東京大学第一工学部電気工学科卒業。同時に逓信省電気試験所入所。日本電信電話公社武蔵野電気電気通信研究所においてマイクロ波回路・光通信・光機能装置および方式等の研究を行い、後に所内の基礎研究の指導統括を行う。昭和56年に東京農工大学工学部電気工学科に移り、教育および光ファイバセンサ・光ファイバ特性計測等の研究に従事。1989年に拓殖大学工学部情報工学科に移り、教育および動画像処理・コンピュータビジョン・人工知能などの研究に従事している。工学博士、電子情報通信学会、IEEE、ロボット学会会員、工学アカデミー会員。