



## 修士学位論文

題名

軌道誤差に基づく角速度推定を用いた  
卓球ボールの軌道予測

Trajectory prediction of table tennis ball using  
angular velocity estimation based on trajectory error

三重大学大学院 工学研究科  
機械工学専攻  
メカトロニクス研究室

氏名 高村 幸希

主査 加藤 典彦 准教授

副査 矢野 賢一 教授

副査 早川 聡一郎 准教授

提出日： 平成 31年 2月 12日

# 目次

<b>第1章</b>	<b>緒言</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.1.1	ロボットの活躍の場の変化	1
1.1.2	事故を未然に防ぐ技術	1
1.1.3	スポーツ	3
1.2	従来研究	4
1.3	研究目的	11
<b>第2章</b>	<b>空気力学モデル及び抗力，揚力係数パラメータ</b>	<b>12</b>
2.1	空気力学モデル	12
2.2	抗力，揚力係数内パラメータ推定	13
2.2.1	パラメータ評価関数	13
2.2.2	パラメータ推定方法	13
2.2.3	パラメータ推定結果	14
<b>第3章</b>	<b>軌道推定法の提案</b>	<b>16</b>
3.1	空気力学モデルによる軌道推定条件	16
3.2	空気力学モデルの解法	16
3.2.1	ボール初期速度推定	17
3.2.2	ボール角速度推定	17
3.3	軌道推定	19
<b>第4章</b>	<b>ステレオカメラシステムの構築</b>	<b>21</b>
4.1	計測方法の選択	21
4.1.1	赤外線センサ	21
4.1.2	ステレオカメラ	21
4.2	装置製作	22
4.2.1	カメラ選定	22
4.2.2	ステレオ視による距離計測の原理	25
4.2.3	装置作成	26
4.2.4	カメラプログラム	27
<b>第5章</b>	<b>軌道推定条件の決定</b>	<b>34</b>
5.1	実験内容	34

5.2 実験結果 . . . . .	36
<b>第6章 検証実験</b>	<b>38</b>
6.1 実験内容 . . . . .	38
6.2 実験結果 . . . . .	38
6.2.1 トップスピン . . . . .	38
6.2.2 バックスピン . . . . .	42
6.2.3 サイドスピン . . . . .	46
6.2.4 考察 . . . . .	49
<b>第7章 結言</b>	<b>51</b>
7.1 まとめ . . . . .	51
7.2 今後の展望 . . . . .	52
<b>参考文献</b>	<b>53</b>
<b>謝辞</b>	<b>55</b>
<b>研究業績</b>	<b>56</b>
<b>図目次</b>	<b>57</b>
<b>表目次</b>	<b>59</b>

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

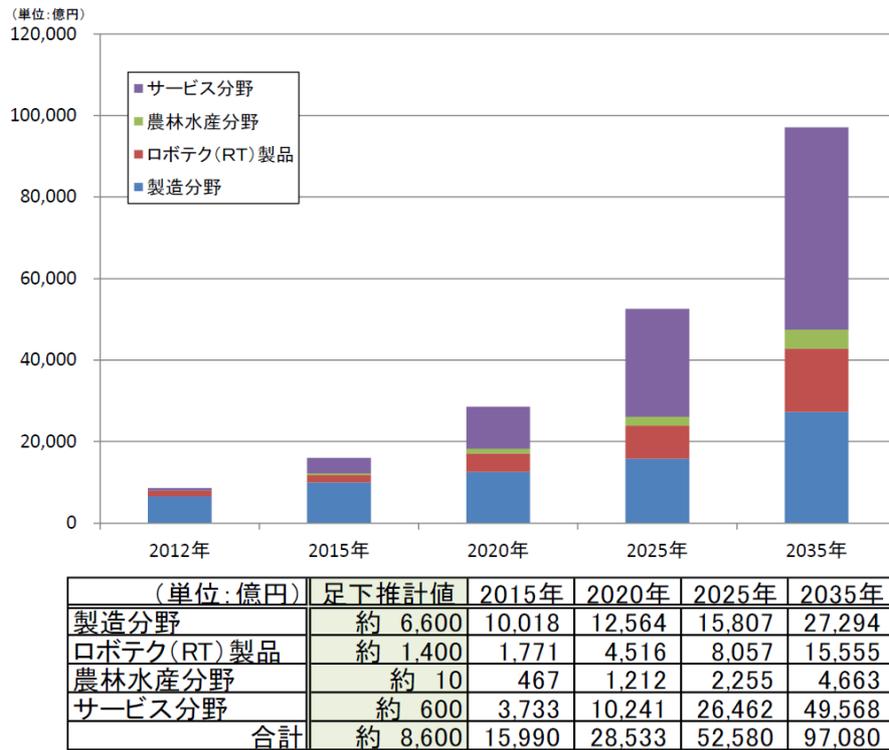
### 1.1.1 ロボットの活躍の場の変化

近年のロボット開発技術の目覚ましい発展により、ロボットの活躍の場は産業分野のみに限定されるものではなくなりつつある。図 1.1 に日本のロボット産業の足元市場規模推計を示す。<sup>[1]</sup> 経済産業省の規模推計では、2012 年はロボット市場全体の市場規模約 8600 億円のうち製造分野の市場規模は約 6600 億円と市場の大部分が製造分野に占められているが、2035 年での推定では市場規模全体約 97080 億円のうち製造分野は約 27294 億円に留まり、その他の分野の比率が高まることが予想されている。

ロボット技術の発展に伴い、使用される機会が増える場面として人間とロボットがより近い位置での作業が挙げられる。例として、街頭での観光案内、レストラン等での接客対応、引っ越し等の人間とロボットの共同作業がある。これらはすべて現在では人間が行う仕事であるが、ロボット技術の発展に伴い今後ロボットへと置き換えられることが予見される仕事である。これらの作業の共通点としてすべて人間とロボットが近くにあることが挙げられる。しかしながら、人間とロボットの距離が縮まることにより接触の危険性が増え、大事故へとつながる可能性が考えられる。

### 1.1.2 事故を未然に防ぐ技術

先に述べた事故を未然に防ぐ技術としてロボットの自己位置推定の技術や障害物回避の技術がある。障害物が移動しないものである場合、自己位置推定によりロボットが人間との正しい位置関係を常に把握することで、危険が起こりえない人間との位置関係を常に保つことを可能にし、障害物回避の技術で周囲の物体や人間との衝突を未然に防ぐことを可能にする。しかし人間の生活に近い環境では障害物も移動している場合があり、障害物の移動を考慮せず移動させた場合では障害物と接触、転倒や破損につながると考えられる。このような状況を避けるため、物体の移動先推定が必要となると考えられる。これは視覚センサ(図 1.2)などにより周囲の物体の移動情報を取得することにより行われ、得られた情報からロボットが周囲の移動物体の移動先を瞬時に推定し、ロボットが移動物体を避けて移動するよう次の動作が決定されるというものである。具体的な移動物体の例として、ボール等の球体が考えられる。立方体の障害物と異なり、



※2015～2035年の推計は平成22年度ロボット産業将来市場調査(経産省・NEDO)による。

図 1.1 日本のロボット産業の足元市場規模推計<sup>[1]</sup>

球体では外部環境の影響(外力)により姿勢が変わりやすく位置も移動してしまう。そのため、球体の移動先推定が必要であると考えられる。



図 1.2 スバルの三次元視覚センサ”アイサイト”<sup>[2]</sup>

### 1.1.3 スポーツ

一概にスポーツといえど数多くの種類のものが存在するが、テニス、野球等多くのものが道具としてボールを用いる。ボールスポーツについて試合を有利に運ぶために把握すべき情報として、ゲーム中におけるボールの軌道、対戦相手(複数の場合は相手すべて)の位置などが挙げられる。これを用いることによりボールをどちらに向け返球すべきなのか、次はどのようにボールが飛んでくるか等が決定される。今回はこの中からボールの軌道推定に焦点を当て、研究を行う。これはボールの飛行初期における並進速度および回転速度により飛行の様子が大きく変化するために、あらかじめ軌道の予測が無ければロボットが打ち返し動作を実行することが難しいためである。軌道推定は視覚センサなどにより周囲の物体の移動情報を取得することにより行われる。また、今回軌道推定を行うボールスポーツとしては卓球を選択する。この理由として、卓球のボール軌道は初期の飛行の様子から角速度等の影響により大きく様子が変わるために推定によるロボットの打ち返し性能への効果が大きいことが挙げられる。さらに卓球は一度のゲーム中におけるラリーの間隔が非常に短いものであるため、非常に短い時間での推定が必要となることも理由である。



図 1.3 卓球

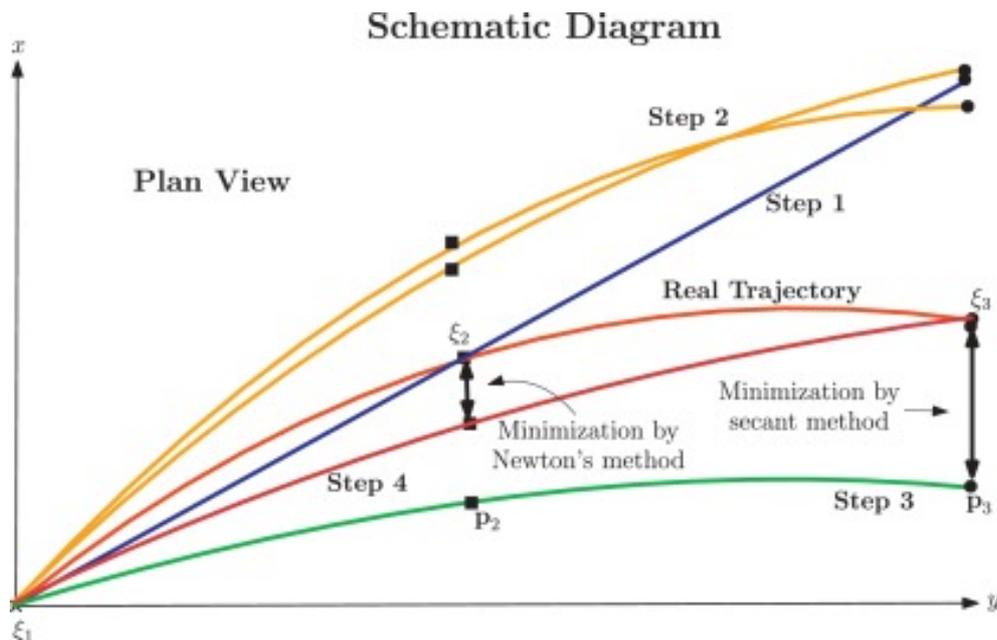
## 1.2 従来研究

オムロン社が開発したボール軌道予測を用いた卓球ロボット ”FORPHEUS(フォルフェウス)”<sup>[3]</sup> は, ”ラリーの継続” という目標を持つ. 図 1.4 に FORPHEUS を示す. これは複数のステレオカメラおよび動態検知カメラにより球の三次元計測を行い, 軌道予測と 1ms 単位でのロボット制御を行うことにより返球動作を可能としている. また人とラケットの位置を考慮し, 相手の打ち方に合わせた返球場所にボールを返すものである. また, FORPHEUS で行われている軌道予測は初期では  $\pm$  数 10cm 程度の返球精度であったが, AI によるディープラーニングを行うことにより  $\pm$  5cm の精度を実現している.



図 1.4 FORPHEUS

Mario A.Aguirre-Lopez らの ”Trajectories reconstruction of spinning baseball pitches by three-point-based algorithm”<sup>[4]</sup> ではボール軌道のうち三点のデータからボール軌道を推定する方法を提案した. これは二点分のデータから初期速度を導出, 角速度の初期値は適当な値に取る. 角速度初期値からセカント法を用いて各点における角速度を推定し, 推定結果を考慮したうえで各点での速度を計算し, その結果より各点の位置を推定する. 推定位置と実測位置 (三点分) の誤差を最小になるまで各点での角速度推定および速度計算を繰り返すことで軌道を推定する方法である.

図 1.5 実験概略図<sup>[4]</sup>

Yongsheng Zhao らの”Model Based Motion State Estimation and Trajectory Prediction of Spinning Ball for Ping-Pong Robots using Expectation-Maximization Algorithm”<sup>[5]</sup>ではk平均法を用いて軌道を複数のカテゴリに分け, それぞれをフーリエ級数を用いてフィッティングすることによって拡張連続運動モデル (ECMM) を導出する. ECMMに基づいて, 予測最大化 (EM) アルゴリズムを用いた新しい運動状態推定法を提案し, その結果, 正確な軌道予測を行った. 図 1.6 に実験概略図を示す. フーリエ級数の係数にドラッグ係数やマグナス係数を用いることによりさらにパフォーマンスを向上させることが可能となるが, これにより計算が複雑化するため今後の課題とされている.

Minyu Pan らの”卓球ロボットのための回転ボールの三次元回転状態推定法及び軌道予測法”<sup>[6]</sup>では卓球ボールの軌道推定について本研究と同じく重力, 揚力, 抗力項をもつ運動方程式を示した. また空気摩擦による回転数の変化方程式を導出した. 図 1.7 に実験概略図を示す.

Liu らの”Racket Control for a Table Tennis Robot to Return a Ball”<sup>[7]</sup>では卓球において相手側のカタパルトから飛んでくるボールの位置, 速度を相手コート上で高速度カメラを用いて測定し, これと空気力学モデル, テーブル反発モデルからボールの軌跡を推定する. 図 1.8 に実験概略図を示す. この推定結果とラケット反発モデルから反対側のコートに所定の並進/回転速度で目標着地位置にボールを返すことに適したラケットの姿勢と速度を推定した. この研究において空気力学モデルの解決には計算時間を短縮させるため空気力学モデルの代わりに概算空気力学モデルを推定し, それを用いて返球動作の制御を行った. この研究にて用いられた空気力学モデルは回転速度が常に一定であるという仮定の下に同定されている.

早川らの”Ball Trajectory Planning in Serving Task for Table Tennis Robot”<sup>[8]</sup>で

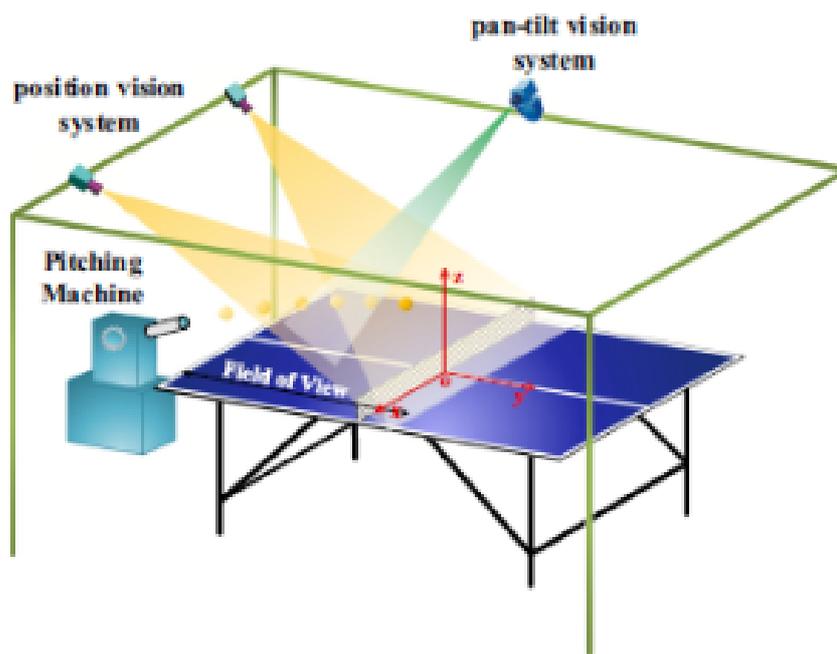


図 1.6 実験概略図<sup>[5]</sup>

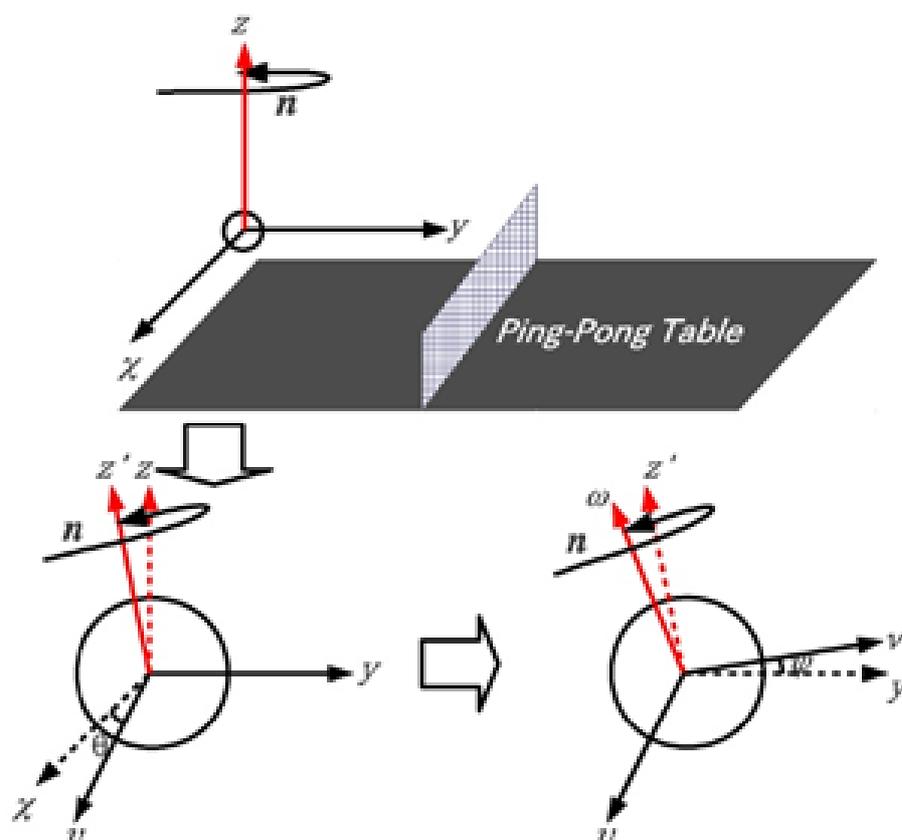
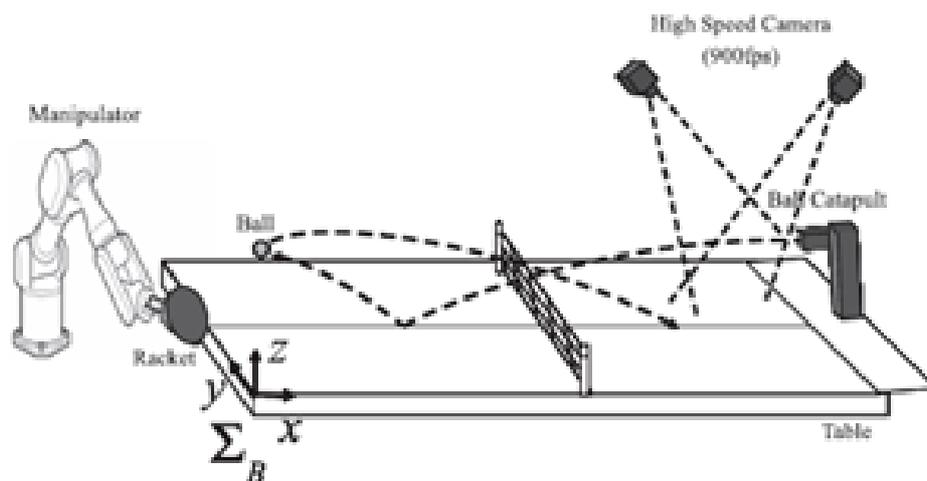
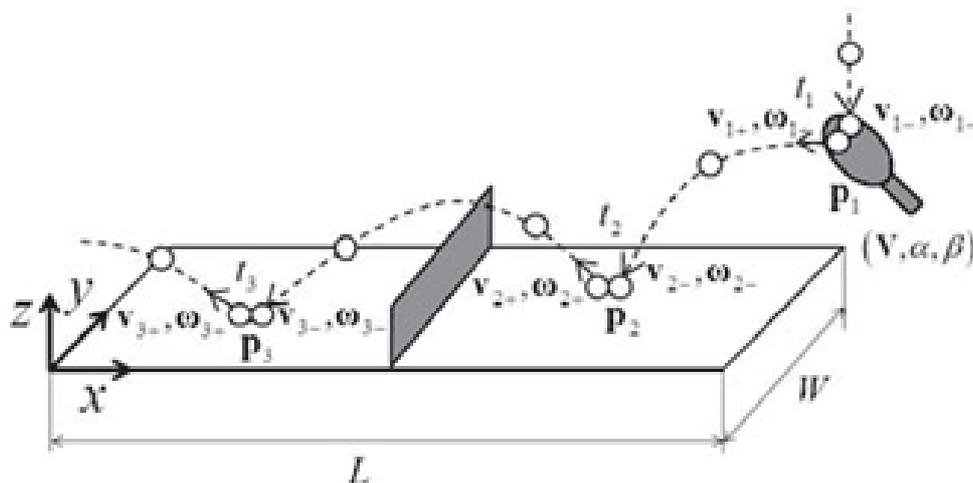


図 1.7 実験概略図<sup>[6]</sup>

図 1.8 実験概略図<sup>[7]</sup>

は卓球のボールをある点から自由落下させ、腕先にラケットを取り付けたロボットを制御し打ち返すことで自分のコートと相手のコートでそれぞれ一度ずつバウンドさせるサーブ動作を行った。図 1.9 に実験概略図を示す。ここでボールの位置推定には空気力学モデル、ラケット反発モデル、テーブル反発モデルが用いられる。この研究では第二リバウンド後のボールの状態（位置、並進速度、回転速度）を予測し、物理モデルからそれを達成するためのラケット入力をシミュレーションの結果より決定した。

図 1.9 実験概略図<sup>[8]</sup>

岡本らの” An Online Estimation of Ball States for Prediction of Ball Trajectory with Aerodynamics Model”<sup>[9]</sup> では卓球において飛んでくるボールの軌跡を推定する。軌跡の推定には空気力学モデル、テーブル反発モデルを用いる。図 1.10 に実験概略図を示す。ボールの初期の速度成分の測定には中速度カメラを用いたが、サンプリングレートが低いため回転速度を求めることが出来ない。また、並進速度が原因となり位置測定の誤差を正確に計算することが出来ない。そこで測定ノイズを考慮した空気力学モデル

を用い, 中速度カメラの情報から初期位置, 回転速度, 並進速度のオンライン推定法を提案した.

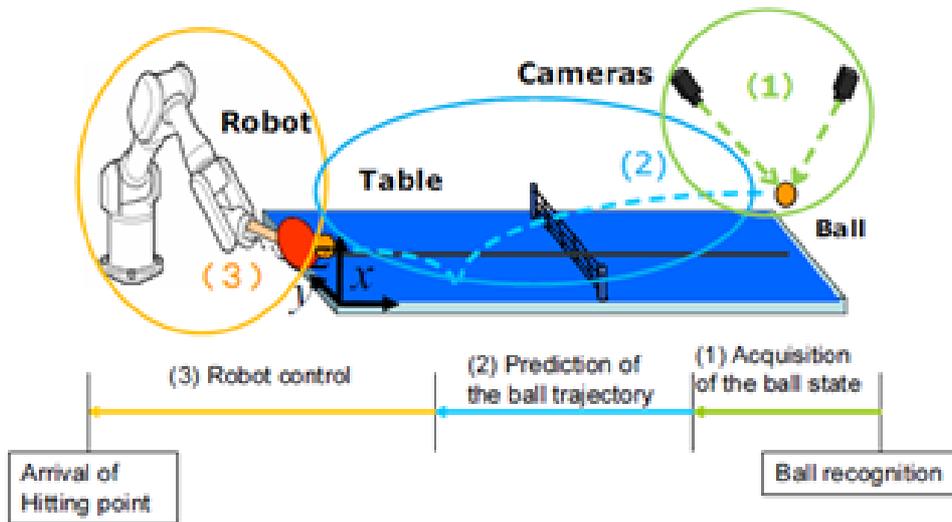


図 1.10 実験概略図<sup>[9]</sup>

野々村らの”物理モデルに基づくバックスピンのかかった卓球ボールの打ち返しによるロボットの軌道生成”<sup>[10]</sup>では, ボール自動打ちだし機により打ち出されたバックスピンのかかったボールを打ち返すためのラケットの速度, 角度を推定した. 図 1.11 に実験概略図を示す. ロボット側, 相手側それぞれのテーブルを  $3 \times 3$  の升目状に分割するとき, 打ち出し機からのボールは一般的なバックスピンをもちロボット側テーブルの E でバウンドして飛ぶとする. この条件とヤコビアンとニュートン法からラケットの打ち返し時の速度と角度を推定した.

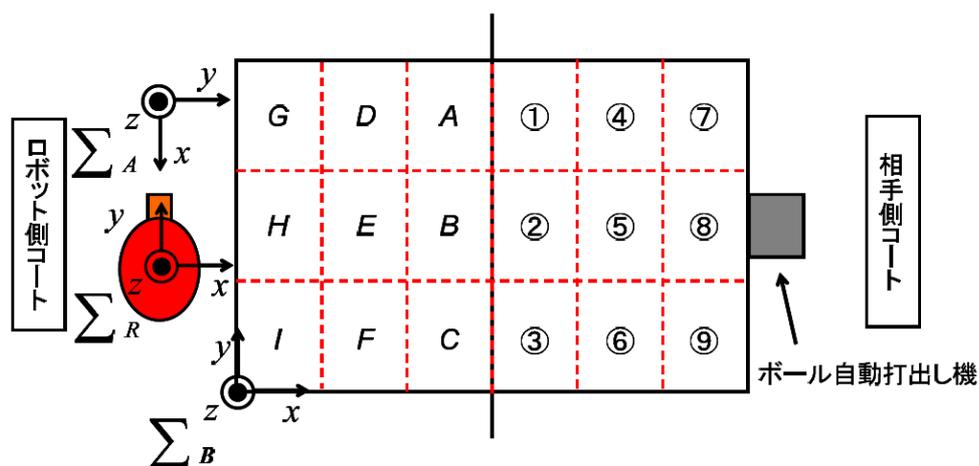


図 1.11 実験概略図<sup>[10]</sup>

Chen らの”Dynamic Model based Ball Trajectory Prediction for a Robot Ping-Pong Player”<sup>[11]</sup>では卓球ボールを空力モデル, 反発モデルの二つの方程式を用いて軌道を推

定した. 図 1.12 に実験概略図を示す. この空力モデルでは抗力係数, 揚力係数をそれぞれ一定値として軌道推定を行っている.

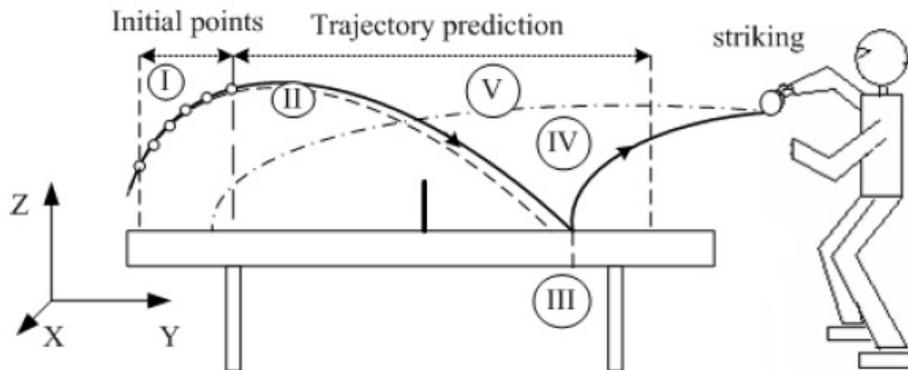


図 1.12 実験概略図<sup>[11]</sup>

田中らの”卓球ボールの空力特性”<sup>[12]</sup>ではトップスピン, バックスピン, 無回転時のボールの軌道を計測し, 計測結果から抗力係数, 揚力係数, レイノルズ数の関係性を確かめた. 図 1.13 に実験概略図を示す. この研究ではボールの進行方向正面方向, および横方向から高速度カメラを用いてボールの軌道を計測している. この実験により, 回転の様子により抗力係数, 揚力係数が一定ではないことが確かめられている.

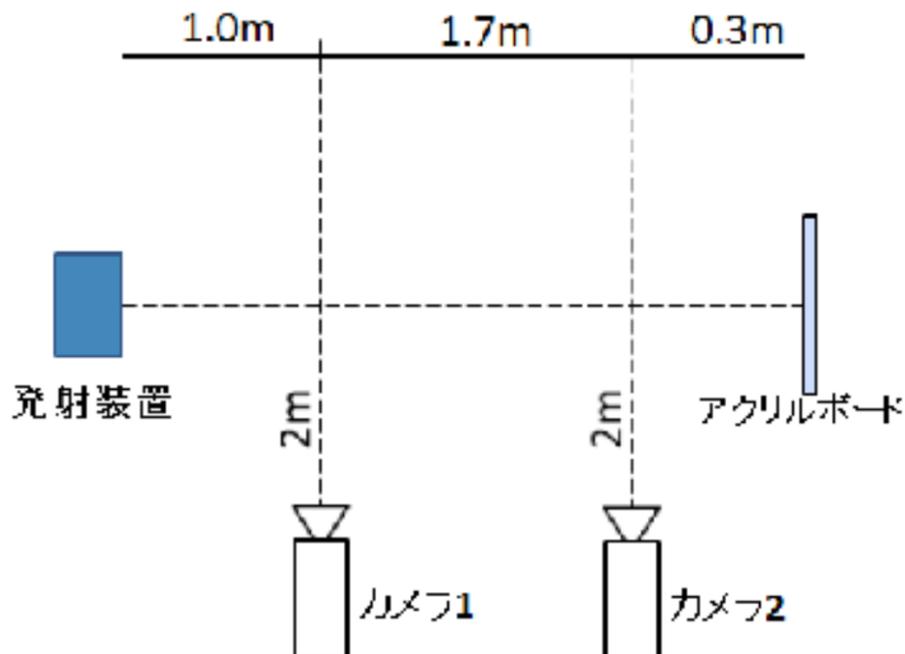


図 1.13 実験概略図<sup>[12]</sup>

また, 本研究室における先行研究である”並進, 回転速度を考慮した空気力学モデルによる卓球ボールの軌道推定”<sup>[13]</sup>では空気力学モデルを用いてあらかじめ得られてい

るボール軌道データの初期位置, 初期速度から角速度, ボール軌道の推定を行った. 図 1.14 に推定結果を示す. ここでは実際のボール軌道と推定結果の誤差が卓球ラケットの範囲内に収まることが示された. また, リアルタイム推定の方法として, 受け取った 5 点おきごとのデータから軌道の推定を行う方法を示した.

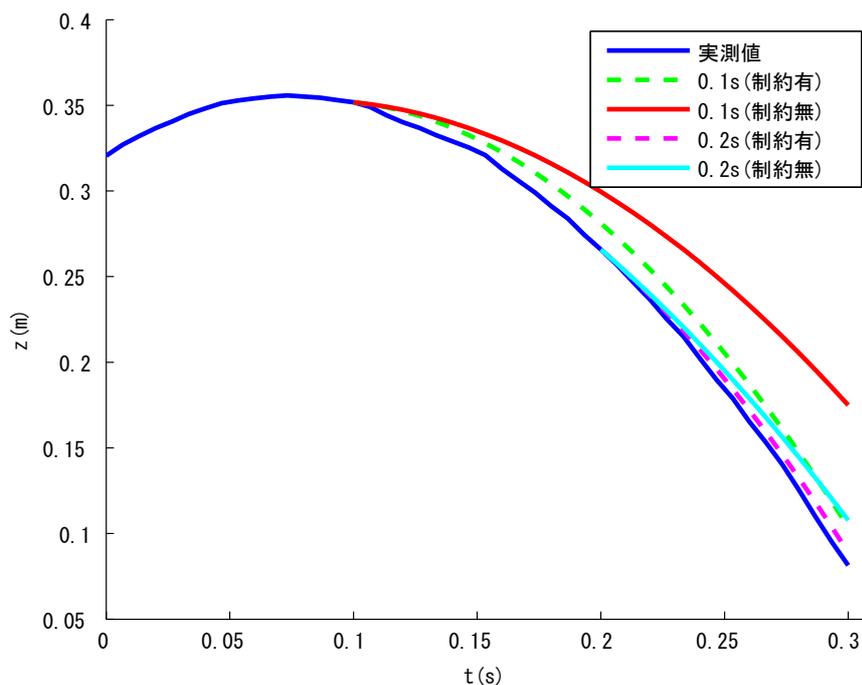


図 1.14 推定結果<sup>[13]</sup>

これまでのボール軌道推定はボールの回転を無視したうえで推定したもの<sup>[5]</sup>や回転は常に一定とし, 毎回異なる回転は考慮に入れないもの<sup>[7][10]</sup>が研究されている. また, 高性能な計算機を用いることにより非常に高速に取得した飛行データから非常に小さい時間単位での制御により返球動作までを可能とした装置も開発されている<sup>[?]</sup> .

モデル式の同定方法により各飛行における回転の様式を常に一定とすることで計算速度を向上させる研究が行われている. また回転を無視し, その他の要素を用いることで軌道を推定する方法も研究が進んでいる. しかし, モデルによる軌道推定を行う上で飛行の状態は常に一定となるとは限らず, 回転の方向, 大きさの違いによる誤差は無視できるものではない. これらの考慮はより誤差の少ない軌道推定を行う上で非常に重要となることが考えられる. 回転を無視, もしくは一定とする考え方の根底には計算速度の問題がある. 毎度異なる回転速度による影響を計算に含めることで計算時間は増加してしまうためである. 角速度の考慮と計算時間の関係性はトレードオフの関係と近いものがあるが, 角速度の考慮を行うことが可能であればより実際の軌道に近い推定軌道が得られるはずである. 以上より, 角速度を考慮に入れたうえで飛

行時間中に予測可能な軌道推定方法を研究する必要がある。

### 1.3 研究目的

移動物体の移動先推定において、球体の飛行軌道推定の分野では多くのものが回転をどのような場合でも一定のものとして軌道推定されているものが多い。しかしながらより確からしい軌道予測には回転状態の考慮が必要不可欠である。また回転状態の考慮が見送られる原因として計算時の負荷増加による計算時間の増加が挙げられるがこの解決には高性能な計算機による処理が必要である。またより高精度な軌道予測には非常に短いスパンでの軌道実測データより推定することも挙げられる。こちらも計算機への負荷を増加させる原因となりえるものである。そこで今回はこの計算負荷に着目し、角速度を考慮に入れたうえでより計算負荷が少なくなる推定法の研究を行う。また軌道計測時のフレームレートを一般的な高速度カメラから得られるものに抑えた環境での軌道推定法を考察する。なお、今回は打球動作、バウンドによる軌道への影響は無視し、飛行中の球体の飛行終了時点までの軌道推定を行う。このようにして高性能な計算機を必要としない、角速度を考慮に入れた空気力学モデルの同定を目指す。

## 第2章 空気力学モデル及び抗力，揚力 係数パラメータ

### 2.1 空気力学モデル

本研究ではボール射出機により打ち出されたボールの軌跡の推定のための空気力学モデルの同定を行う。打ち出されたボールを高速度カメラを用いて撮影，それにより得られた画像データから位置，並進速度，回転速度を得る。ここで，用いる空気力学モデルは従来研究<sup>[8]</sup>より，

$$m\ddot{\mathbf{p}} = -m\mathbf{g} - \rho C_D S_b \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| \dot{\mathbf{p}}(t) + \rho C_M V_b \boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{p}}(t) \quad (2.1)$$

$\mathbf{p}(p_x, p_y, p_z)$ : ボールの位置 [m]

$\mathbf{g}(0, 0, g)$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$\boldsymbol{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ : 角速度 [rad/s]

$\rho$ : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$m$ : ボール質量 [kg]

$C_D$ : 抗力係数

$C_M$ : 揚力係数

$S_b$ : ボール面積 [m<sup>2</sup>]

$V_b$ : ボール体積 [m<sup>3</sup>]

とする。ここにおいて，また，ボール面積，ボール体積はそれぞれ，ボール半径  $r$  [m] として，

$$S_b = \frac{1}{2} \pi r^2 [\text{m}^2]$$

$$V_b = \frac{4}{3} \pi r^3 [\text{m}^3]$$

である。

この式において  $C_D, C_M$  の同定を行い，ボールの軌跡の推定式とする。

本研究においては揚力係数  $C_M$  および抗力係数  $C_D$  はスピンパラメータの関数とする。

ここで，スピンパラメータ  $SP$  は以下の式で表される。

$$SP(\dot{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{r \|\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{p}}\|}{\|\dot{\mathbf{p}}\|^2} \quad (2.2)$$

抗力係数  $C_D$  および揚力係数  $C_M$  は次式のようにスピンパラメータの多項式とする。

$$C_D = \sum_{i=0}^{n_d} a_{Di} SP(\dot{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\omega})^i \quad (2.3)$$

$$C_M = \sum_{i=0}^{n_m} a_{Mi} SP(\dot{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\omega})^i \quad (2.4)$$

ここで  $a_{Di}, a_{Mi}$  は定数であり， $n_d, n_m$  は多項式の次数である。

## 2.2 抗力，揚力係数内パラメータ推定

先に挙げた空気力学モデルにおいて，軌道を推定するためには抗力係数  $C_D$  内の定数  $a_{Di}$ ，揚力係数  $C_M$  内の定数  $a_{Mi}$  を推定する必要がある．この各係数については，卒業論文時点にて推定を行った．<sup>[13]</sup> ここでは各係数内パラメータの推定法及び推定結果を示す．

### 2.2.1 パラメータ評価関数

各係数内のパラメータ推定用の評価関数  $f_{C_D, C_M}$  を次に示す．

$$f_{C_D, C_M} = \sum_{k=1}^K (\|\mathbf{p}_i(\mathbf{a}, \mathbf{v}^{(k)}, \boldsymbol{\omega}^{(k)}) - \mathbf{p}_{mi}^{(k)}\|^2) \quad (2.5)$$

$\mathbf{a}(a_{Di}, a_{Mi})$ :各係数内パラメータ

$\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ :ボール速度 [m/s]

$\boldsymbol{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ :角速度 [rad/s]

$\mathbf{p}_i(p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})$ :シミュレーションによるボールの位置 [m]

$\mathbf{p}_{mi}(p_{xmi}, p_{ymi}, p_{zmi})$ :カメラによる実測ボールの位置 [m]

$K$ :データの総試行回数

$k$ :データ番号

この評価関数によりシミュレーション結果によるボール位置とカメラにより実測されたボール位置の二乗誤差の和が最小となるような抗力係数  $C_D$  内の定数  $a_{Di}$ ，揚力係数  $C_M$  内の定数  $a_{Mi}$ ，および角速度  $\boldsymbol{\omega}$  を推定する．

### 2.2.2 パラメータ推定方法

9回のボール軌道の試行結果を用いて抗力係数，揚力係数内のパラメータおよび角速度の推定を行う．抗力，揚力係数の初期値をすべて0，角速度の初期値をx軸方向，z軸方

向を  $0[\text{rps}]$ ,  $y$  軸方向を  $300[\text{rps}]$  とし, 各データでの評価関数が最小値となるようなパラメータを推定する. 抗力および揚力のパラメータの項数はどちらも2次式 ( $n_d = n_m = 2$ ) にて表すものとした. また, ボール飛行データの取得周期が  $150[\text{fps}]$  のため, 推定についてもこの間隔に合わせ  $1/150[\text{s}]$  間隔で行う.

### 2.2.3 パラメータ推定結果

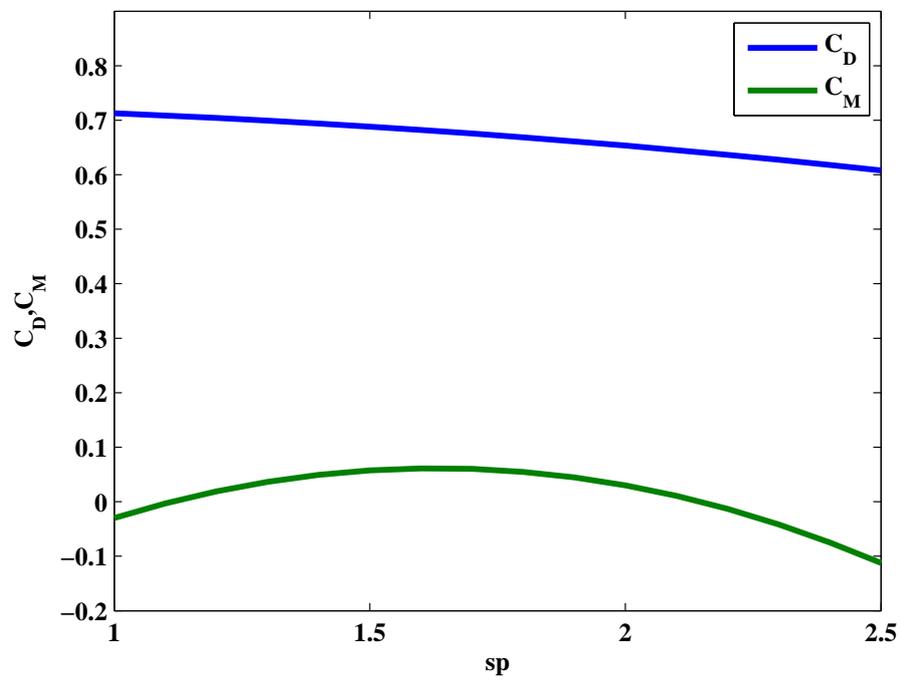
パラメータ推定結果を Table.2.1 に示す. また, Table.2.2 に各試行におけるスピンパラメータおよび抗力係数, 揚力係数の値を示す. 今回の9つのデータでのスピンパラメータの値は  $1.0 \sim 2.5$  の範囲内に収まった. また抗力係数の値は  $0.6 \sim 0.7$ , 揚力係数の値は  $-0.4 \sim 0.05$  となり, 一般的な卓球ボールの抗力係数, 揚力係数の値と近い値が得られた.<sup>[12]</sup> スピンパラメータと抗力係数, 揚力係数の関係を Fig 2.1 に示す. 以上の結果により, 今回推定した抗力係数, 揚力係数内のパラメータは妥当な値であると考えられる.

表 2.1 抗力係数, 揚力係数パラメータ推定値

$a_{D1}$	$7.3 \times 10^{-1}$
$a_{D2}$	$3.7 \times 10^{-3}$
$a_{D3}$	$-2.1 \times 10^{-2}$
$a_{M1}$	$-5.5 \times 10^{-1}$
$a_{M2}$	$7.5 \times 10^{-1}$
$a_{M3}$	$-2.3 \times 10^{-1}$

表 2.2 各試行におけるスピンパラメータおよび抗力係数, 揚力係数

データ	$SP$	$C_D$	$C_M$
1	2.187	0.637	-0.013
2	1.843	0.666	0.05
3	2.205	0.636	-0.019
4	2.109	0.644	0.005
5	2.038	0.650	0.021
6	2.133	0.642	-0.001
7	1.259	0.702	0.033
8	1.149	0.709	0.012
9	1.178	0.707	0.021

図 2.1 スピンパラメータ  $sp$  と抗力係数  $C_D$ ，揚力係数  $C_M$  の関係

## 第3章 軌道推定法の提案

### 3.1 空気力学モデルによる軌道推定条件

本研究では，空気力学モデルを用いてボールの軌道推定を行う．軌道推定に必要な条件として以下の3つが挙げられる．

- 軌道推定終了までの時間がボール飛行時間以下である
- 取得する情報はボールの各時間における位置情報のみ
- ボール飛行終了時での推定誤差がラケットの範囲内 (150mm × 150mm) である

各条件の理由として，一点目に関しては計算時間が実際の飛行時間を超えてしまう場合，推定法を他の装置へ転用した際に実用性が得られない．そのため軌道推定は遅くとも実際のボール飛行が終了する前に推定が終了している必要がある．

二点目は入力データの問題である．角速度などより多くの入力データが得られた場合，軌道推定自体の速度はより早く行うことが可能である．しかしながら，入力データを増やすためにはそのデータ種と同数の計測装置が必要となり，実用時の汎用性が低下してしまう．しかし入力データが位置データのみであれば単一の計測装置があれば取得が可能であり，より容易に推定環境を整えることを可能にするためである．

三点目は精度の問題である．今回対象とする卓球においてボールの打ち返しを考える際，誤差が大きくなると打ち返しが不可能となり利用するメリットが得られない．推定結果による飛行終了時点をラケット中央部にて打ち返すと仮定した際，実際に打ち返すためには推定誤差がラケットの範囲内であればよい．そこで誤差範囲はラケットの範囲内とした．

### 3.2 空気力学モデルの解法

具体的な空気力学モデルの解法として，数値積分による各時刻ごとの離散的な座標データを算出，組み合わせることにより軌道を再現する．推定にあたり用いる入力データは先の条件に示すようにボールの座標データのみである．しかしながら空気力学モデルを積分により解くためには，入力として座標データのみでなく各位置におけるボールの速度，角速度が必要となる．そこで今回は入力されたボール座標データを用い，ボール速度および角速度の推定を行なう．この推定結果を用いることで軌道推定の計算を行う．

### 3.2.1 ボール初期速度推定

ボールの初期速度は、座標計測開始時のボール座標、軌道推定開始時のボール座標、座標計測開始時を時刻  $t = 0$  とした場合の各座標取得時の時刻の関係性に着目し、推定する。ここで、 $x$  軸、 $y$  軸 (卓球台平面に対し平行となる座標軸) に対しては微小時間での移動ととらえた場合、外部からの力の影響を無視できると考えられる。これに対し  $z$  軸 (卓球台平面に対し垂直となる座標軸) に対しては外部より重力による鉛直下向き方向への力の影響があると考えられるが、時間内の移動量の平均により初期速度を推定した場合、推定したい時刻の  $1/2$  の時刻での推定速度となる。そこで今回は初期速度推定に重力による速度変化を盛り込むことにより、速度推定を行ないたい時刻での初期速度を推定する。初期速度推定式を以下に示す。

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p} - \mathbf{p}_0}{t_p} - \mathbf{g} \frac{t_p}{2} \quad (3.1)$$

$\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ : 軌道推定開始時のボール速度 [m/s]

$\mathbf{p}(p_x, p_y, p_z)$ : 軌道推定開始時のボール座標 [m]

$\mathbf{p}_0(p_{x0}, p_{y0}, p_{z0})$ : 座標計測開始時のボール座標 [m]

$\mathbf{g}(0, 0, g)$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$t_p$ : 軌道推定開始時の時刻 [s]

### 3.2.2 ボール角速度推定

角速度推定は、座標データのみから推定する必要がある。卒業論文時点では角速度の推定に非常に多くの計算を必要とする方法を用いたために軌道推定時間がボール飛行中に終了しないという問題点があった。この問題を改善し、ボールの動きのみから角速度を推定するため、今回はボールが無回転の場合と回転する場合のボール軌道の違いに着目することとした。回転により、ボールには抗力および揚力が発生する。これらの力はボールの動きに影響を与え、回転の有無及び回転の方向によりボールの軌道は変化するものである。この軌道変化を利用することで角速度を推定出来ないかと考えた。

今回は計算負荷の少ない角速度推定を行なう必要があるため、軌道の変化はある時間内における軌道の一致度にて推定することはできない。この方式は角速度推定の精度を向上させることは可能となるが複数点にて軌道が一致する角速度の最適化が必要となり、計算負荷が非常に大きくなるためである。そこで今回は軌道データから初期速度を推定し、その初期速度にて打ち出された無回転のボールの軌道を推定する。一定時間後のある一点において無回転での軌道推定の座標と同時刻の実際のボール座標を比較することで軌道誤差が得られる。この誤差はボールの回転により発生した抗力

および揚力がボールへ与えた力と等しいと考えられるため，どのような回転のボールであればその誤差を発生しうるかを最適化により推定する．この方式であればとある値に等しいような角速度を推定するため計算負荷を抑えることが可能である．

以下に実際の式変形について述べる．運動方程式より，外部より力のかかる運動を示す．

$$\mathbf{p}_\omega = \mathbf{v}t_\omega + \frac{1}{2}\mathbf{a}t_\omega^2 - \frac{1}{2}\mathbf{g}t_\omega^2 \quad (3.2)$$

$\mathbf{p}_\omega(p_{\omega x}, p_{\omega y}, p_{\omega z})$ :角速度推定時のボール座標 [m]

$\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ :ボール初期速度 [m/s]

$t_\omega$ :角速度推定時の時刻 [s]

$\mathbf{a}(a_x, a_y, a_z)$ :外力による加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$\mathbf{g}(0, 0, g)$ :重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

ここで，無回転のボールは外部よりかかる力は重力のみであるため，運動方程式は以下ようになる．

$$\mathbf{p}_{\omega 0} = \mathbf{v}t_\omega - \frac{1}{2}\mathbf{g}t_\omega^2 \quad (3.3)$$

$\mathbf{p}_{\omega 0}(p_{\omega 0x}, p_{\omega 0y}, p_{\omega 0z})$ :無回転推定時のボール座標 [m]

これらの位置の差を今回は用いるため，式 (3.2) と式 (3.3) の差をとると，

$$\mathbf{p}_\omega - \mathbf{p}_{\omega 0} = \frac{1}{2}\mathbf{a}t_\omega^2 \quad (3.4)$$

ニュートンの運動方程式より，

$$\mathbf{F}_\omega = 2m(\mathbf{p}_\omega - \mathbf{p}_{\omega 0})/t_\omega^2 \quad (3.5)$$

$\mathbf{F}_\omega$ :外力

$m$ :ボール質量 [kg]

ここで  $\mathbf{F}_\omega$  はボールへ掛かる外力，つまり抗力および揚力の合力に等しい．また，抗力，揚力の合力は空気力学モデルより，

$$\mathbf{F}_{DM} = \rho C_D S_b \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| \dot{\mathbf{p}}(t) + \rho C_M V_b \boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{p}}(t) \quad (3.6)$$

$\mathbf{F}_{DM}$ :抗力，揚力の合力 [N]

この式にて角速度を推定するため，以下の評価関数  $f_\omega$  を最小とする角速度  $\omega$  を求める．

$$f_\omega = \|\mathbf{F}_\omega - \mathbf{F}_{DM}(\mathbf{v}, \omega)\|^2 \quad (3.7)$$

### 3.3 軌道推定

空気力学モデルの計算にあたり，MathWorks 社の数値解析ソフトウェアである MATLAB(R2013b) を用いる．また，今回軌道推定に用いる計算機は EPSON の Endeavor PRO4000 を用いる．PRO4000 の概要図を図 3.1 に，本体仕様を表 4.3 に示す．

表 3.1 PRO4000 仕様

製品名	EPSON Endeavor PRO4000	
CPU	プロセッサ	Intel Core2 Quad CPU Q6700
	ソケット	LGA775 Socket
チップセット	Intel 975X Express + ICH7R	
メインメモリ	PC2-5300 DDR SDRAM 2GB	
電源容量	650W	
電源	AC100V $\pm$ 10% 50/60Hz	
外形寸法	W217×D501×H472(突起部除く)	
質量	約 19.6kg	



図 3.1 電子計算機 PRO4000

先に述べた空気力学モデルの計算により軌道推定を行なうが、実際の軌道推定の算出の手順を示す。図3.2に提案手法のフローチャートを示す。ボール座標データが入力された際、入力データの初期の数点間の座標から初期速度の推定を行なう。初期速度推定結果および座標データ、無回転時の角速度  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0, 0, 0)$  を用いてボールが無回転と仮定した場合の軌道推定を求める。軌道推定後、軌道推定開始時の座標データより後の時刻での推定座標と同時刻での実際の座標データの誤差を算出、先に述べた角速度推定法を用いて角速度推定を行なう。無回転時の軌道推定条件から角速度のみを推定された角速度に変更することで、再度軌道推定を行ないボールの実際の軌道を推定する。本手法を実行するにあたり、ボール座標の取得方法および初期速度、角速度の推定条件を決定する必要がある。そこでボール座標取得法を4章に、提案手法の条件の決定を5章にて述べる。また飛行終了時の実際のボール座標と、同時刻における軌道推定時の座標の誤差計算を行うことで、本手法の妥当性の検証を行う。

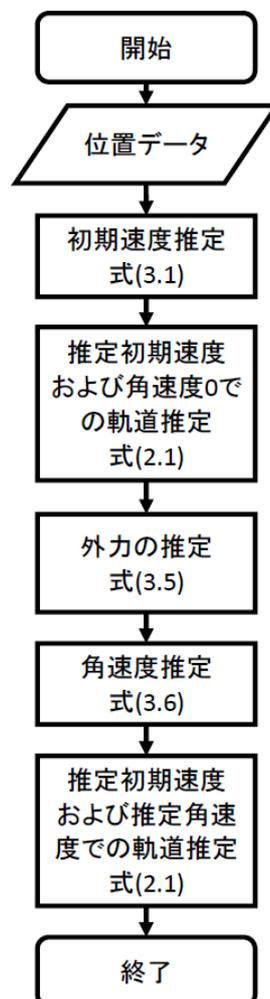


図3.2 提案手法 フローチャート

## 第4章 ステレオカメラシステムの構築

### 4.1 計測方法の選択

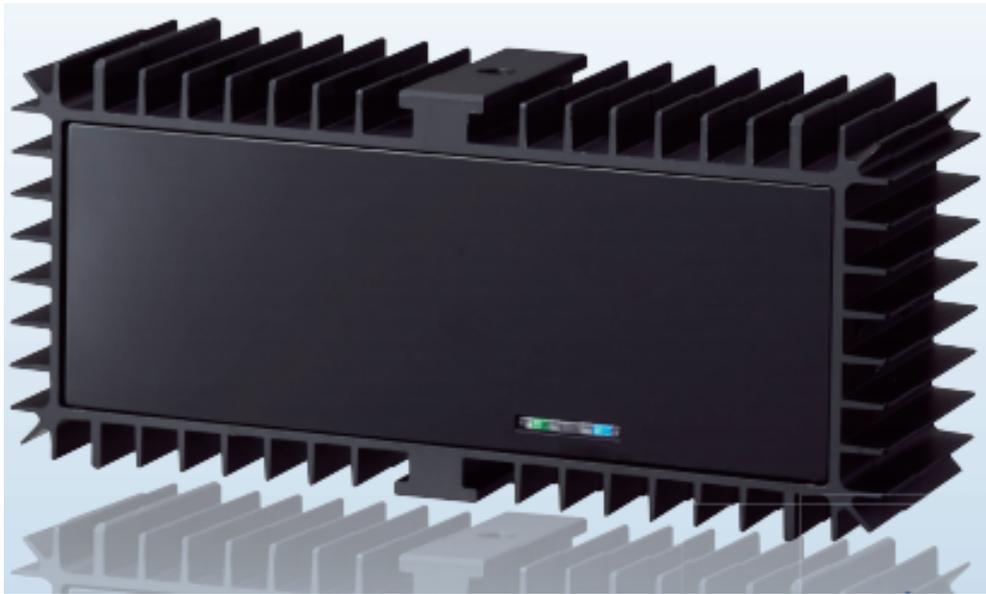
ボール軌道の予測を行うにあたり，必要となる重要な機器が多く存在する．中でもボール位置座標の計測機器は軌道予測結果に大きく影響を与えるものである．そこで本節ではボールの軌道計測に用いる計測方法および装置の検討を行う．

#### 4.1.1 赤外線センサ

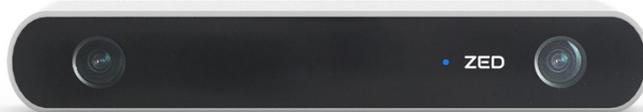
対象物までの距離を計測する装置の一つとして赤外線センサが挙げられる．これは赤外線 LED の高速光源により投光された光が測定対象物で反射し，CMOS イメージセンサを用いて反射光を受光する．反射光が CMOS イメージセンサに到達するまでの時間は高速光源から測定対象物までの距離に応じて変化する．この性質より，投光信号と受光信号の位相差を得ることで測定対象物との距離を算出することが可能である．主にロボット等の自己位置推定や障害物回避に用いられる技術である．具体的な製品として，図 4.1 に示す OPTEX 社製赤外線センサ (ZC-1070L-HP)<sup>[14]</sup> などがある．この計測方式では得られた信号の位相差のみから距離の計測が可能であるため，演算への負荷が少なく高速での計測が可能であるという特徴が挙げられる．しかしながら計測されるデータが対象との距離のみであるため，計測範囲内における特定の物体のみを認識し移動する対象物みの距離計測を行うことは容易ではない．そのため，今回のような特定の移動物体のみを認識し，連続的な距離を計測する用途においては最適ではないと考えられる．

#### 4.1.2 ステレオカメラ

赤外線カメラと同様に測定対象物までの距離を算出可能な装置としてステレオカメラがある．これは平行に設置され，左右の撮影時間を同期させた二台の RGB カメラを用いる．左右カメラにより同時に取得された左右の画像中の測定対象物の位置差を取得し，これに加えてあらかじめ既知である左右のカメラ間隔およびカメラレンズの焦点距離に三角法を用いることで測定対象物までの距離を算出するものである．主に物体認識に用いられる技術である．具体的な製品として，図 4.2 に示す STEREO LABS 社製ステレオカメラ (ZED)<sup>[15]</sup> などがある．この計測方式は画像データの処理が必要となるため，赤外線センサと比べ演算への負担は大きくなるものの，得られるデータとして対象物までの距離に加え左右カメラからの画像データも取得することが可能であ

図 4.1 OPTEX 社製赤外線センサ (ZC-1070L-HP)<sup>[14]</sup>

る．この画像データを取得可能であることによるメリットとして，対象物の認識が画像処理を加えることにより容易であり，必要となる対象物のみの距離が測定可能である点が挙げられる．特定の対象物のみでの計測であれば距離画像を作成するほどの演算負荷をかけず距離データが取得可能と考えられるため，今回はこのステレオカメラ方式の距離計測装置を用いてボール軌跡の取得を行う．

図 4.2 STEREO LABS 社製ステレオカメラ (ZED)<sup>[15]</sup>

## 4.2 装置製作

### 4.2.1 カメラ選定

今回の対象である卓球ボールの飛行時間はボール速度にもよるが一般的に 0.2 s ~ 0.6 s である．この時刻での距離データを計測する用途において，一般的に用いられるカメラのフレームレートとなる 30 fps ~ 60 fps では十分な時間間隔でのデータ取得が

行えない．そのため今回は高速度カメラを用いて計測を行うこととした．そこで今回は BASLER 社の高速度 USB3.0 カメラである acA640-750uc - Basler ace を 2 台用いることとした．高速度カメラの仕様及び外観を図 4.3 および表 4.1 に示す．このカメラは最大フレームレートとして 751 fps での撮影が可能であり，ステレオカメラでの視差計測にて一般的な解像度である 640 pixel×480 pixel を満たす．また外形サイズも 29mm × 29mm × 29mm と非常に小型であり平行に配置した場合においても撮影環境に影響を大きく受けないサイズである．

また，このカメラに対応したレンズとして Basler Lens C125-0418-5M を用いる．レンズの仕様及び外観を図 4.4 および表 4.2 に示す．今回は卓球台全体を撮影可能となるよう，レンズの焦点距離を 4 mm の物を選定した．



図 4.3 高速度カメラ (acA640-750uc)

表 4.1 高速度カメラ (acA640-750uc) 仕様

画素数 (pix)	640 × 480
画像素子サイズ (inch)	1/4" CMOS
センサーサイズ (mm)	3.1 (H) × 2.3 (W)
水平/垂直解像度	640 px × 480 px
解像度	VGA
ピクセルサイズ (μm)	4.8(H)×4.8(W)
フレームレート	751 fps
モノクロ/カラー	カラー
インターフェース	USB3.0
同期モード	外部同期またはフリーラン
電源必要条件	USB3.0 インターフェース
消費電力 (標準値)	2.8 W
外形サイズ (L × W × H)	29 mm×29 mm×29 mm
準拠規格	CE, RoHS, IP30, FCC, USB3 Vision, GenICam, UL



図 4.4 Basler Lens C125-0418-5M

表 4.2 Basler Lens C125-0418-5M 仕様

レンズ焦点距離	4.0mm
レンズマウント	C-mount
アイリス	F1.8 - F22.0
アイリス種別	manual
IR カットフィルター	no
対応センサーサイズ	1/2.5"
最短撮影距離	100 mm

#### 4.2.2 ステレオ視による距離計測の原理

先に述べたように，ステレオカメラでは左右カメラの視差を利用し，カメラから測定対象物までの距離を得る．ステレオカメラにおける三角測量の原理を図 4.5 に示す．注目点  $P$  の 3 次元位置  $(x, y, z)$  について，異なる 2 点に配置された観測面上での像の位置  $(x_a, y_a)$ ， $(x_b, y_b)$  および左右カメラ間隔  $L$ ，レンズ焦点距離  $f$  から三角比より，

$$y : L = y + f : L + (x_a - x_b) \quad (4.1)$$

の関係が得られる．この式変形により

$$y = \frac{fL}{x_a - x_b} \quad (4.2)$$

が得られる．また，同様にして

$$x_a : x = f : y \quad (4.3)$$

$$y_a : z = f : y \quad (4.4)$$

の関係が得られる．この式変形により

$$x = \frac{x_a y}{f} \quad (4.5)$$

$$z = \frac{y_a y}{f} \quad (4.6)$$

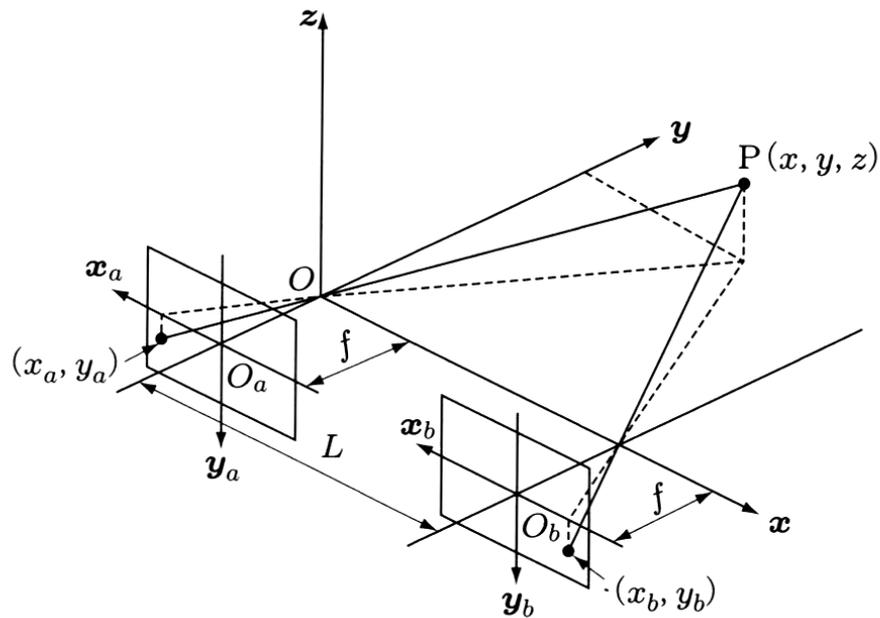
が得られる．それぞれに先ほど得られた  $y$  を代入することで

$$x = \frac{x_a L}{x_a - x_b} \quad (4.7)$$

$$z = \frac{y_a L}{x_a - x_b} \quad (4.8)$$

が得られる．

この様に，左右カメラ間隔  $L$  およびレンズ焦点距離  $f$  が既知であれば左右カメラからの画像をもとに測定対象物への距離を導出することが可能となる．

図 4.5 三角測量の原理（”ロボット工学の基礎”より引用）<sup>[16]</sup>

### 4.2.3 装置作成

測定対象物までの距離を求めるにあたり，左右カメラの間隔およびレンズ焦点距離が既知である必要がある．レンズ焦点距離については  $f=4\text{ mm}$  にて固定のものであるため，カメラ間隔のみ設定する必要がある．そこで今回は各カメラを金属板に平行となるよう固定することで常に一定のカメラ間隔とした．また，左右カメラ間隔は一般的な人間の左右眼球の中心間距離である  $L=60\text{ mm}$  と設定した．光源としてスポットライト二機をカメラ左右に配置し，カメラに映るボールの影を低減させることとした．図 4.6 にステレオカメラ装置を示す．また，ステレオカメラ装置の設置場所は卓球台後方  $1480\text{ mm}$ ，高さ  $2400\text{ mm}$  とした．



図 4.6 ステレオカメラ装置

#### 4.2.4 カメラプログラム

ステレオカメラ装置を用いてボール位置の三次元データを得るためには、画像中からボールのみを認識、その中心点を正しく得る必要がある。これはカメラの機構的な面ではなくプログラムによる画像処理を用いる。具体的な流れとして、今回は次に示す方式で行う。

- 画像中から白色の領域を抽出
- 白色領域内のボールのみを抽出
- ボールの重心位置を算出
- 左右の重心位置より距離計測

これらの画像処理を行うプログラムとしては Itseez 社のオープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリである OpenCV を用いる。こちらの選定理由として、学術用途、商業用途のどちらの場合でも無料で利用可能であり、C++、Python、Java 等の広く利用されるコンピュータ言語、Windows、Linux、Mac OS、iOS、Android 等の数多くの OS に対応している点が挙げられる。また使用例の入手が容易であることも選定理由である。

今回，ボール軌道計測に用いる計算機は軌道推定に用いるものとは異なるものを用いる．用いる計算機 (Monarch GE) の本体仕様を表 4.3 に示す．

表 4.3 Monarch GE 仕様

製品名	Monarch GE	
CPU	プロセッサ	Intel Core i7-7700 CPU @3.60GHz 3.60Ghz
	ソケット	LGA1151 Socket
チップセット	Intel 200 Series Chipset Family LPC Controller(B250)	
メインメモリ	4GB Hynix 1Rx16 PC4-2400T-UCO-11 DDR4 2400MHz ×2	
電源容量	650W	
電源	AC100V ± 10% 50/60Hz	
外形寸法	W190×D475×H420(突起部除く)	

カメラを用いてボール座標を取得するにあたり，カメラレンズの影響による画像の湾曲を補正する必要がある．この湾曲の補正方法として，OpenCV 内に実装されているカメラキャリブレーションを使用する．また，これに加え左右カメラの対応点の平衡化处理も併せて行う．方法として， $8 \times 10$  のチェッカーボードを距離，角度を変更し複数枚撮影する．この際左右のカメラにて同時にチェッカーボードを撮影することで，左右カメラの対応点を求めることが可能となる．チェッカーボード上のタイルの交差点を認識することにより，レンズによるゆがみの度合いを計測，これを直線になるよう画像を補正する．修正前の撮影画像を図 4.7 に，修正後の撮影画像を図 4.8 に示す．

具体的な画像処理として，カメラからコンピュータへ送られる画像データは RGB 画像である．これを HSV 画像へ変換することにより特定の色相 (Hue)，彩度 (Saturation)，明度 (Value) のみの識別を可能にする．そして識別を行った箇所をグレースケールにて描画することにより，画像内の白色部分のみを抽出する．次にボールの識別方法として，円形度の考え方を利用する．これはとある領域における周囲長と面積を用いて，その領域がどれだけ完全円に近いかを数値化するものである．円形度の式を次に示す．

$$f_{circle} = \frac{4\pi S}{c^2} \quad (4.9)$$

$S$ :面積 [m<sup>2</sup>]

$c$ :図形の周囲長 [m]

白色識別画像において，画像内の各白色領域にこの円形度を適用する．今回は画像にこの円形度を用いるため，面積及び周囲長の単位はメートルではなくピクセルとなる．一定値以上の円形度を持つ白色領域をボール，一定値以下はボールではないとすることで白色の領域内からボールのみを識別することが可能である．画像変換によるボール検知の流れを図 4.9 ~ 図 4.12 に示す．

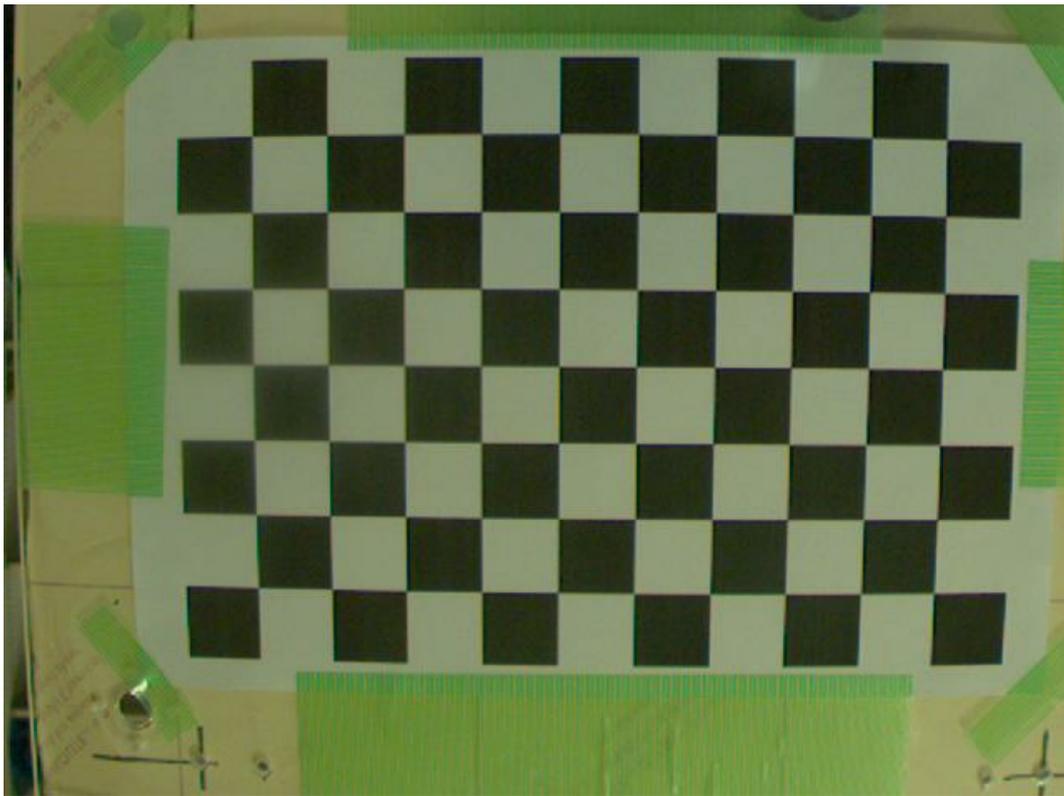


図 4.7 補正前画像

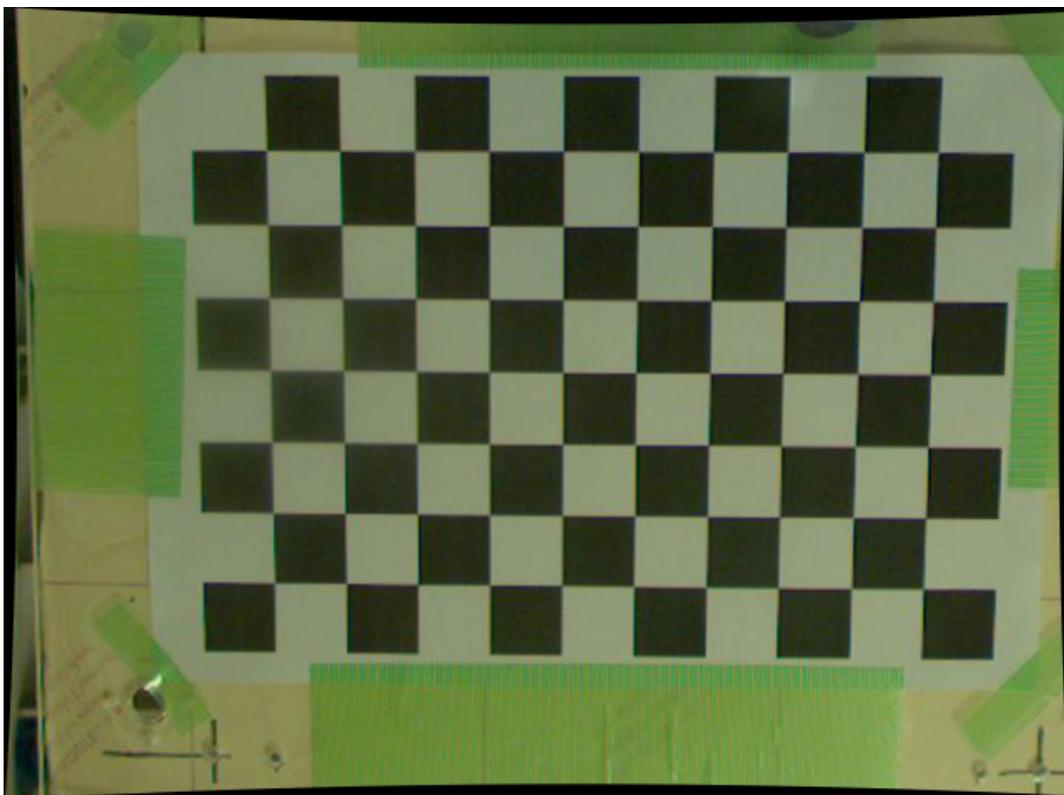


図 4.8 補正後画像

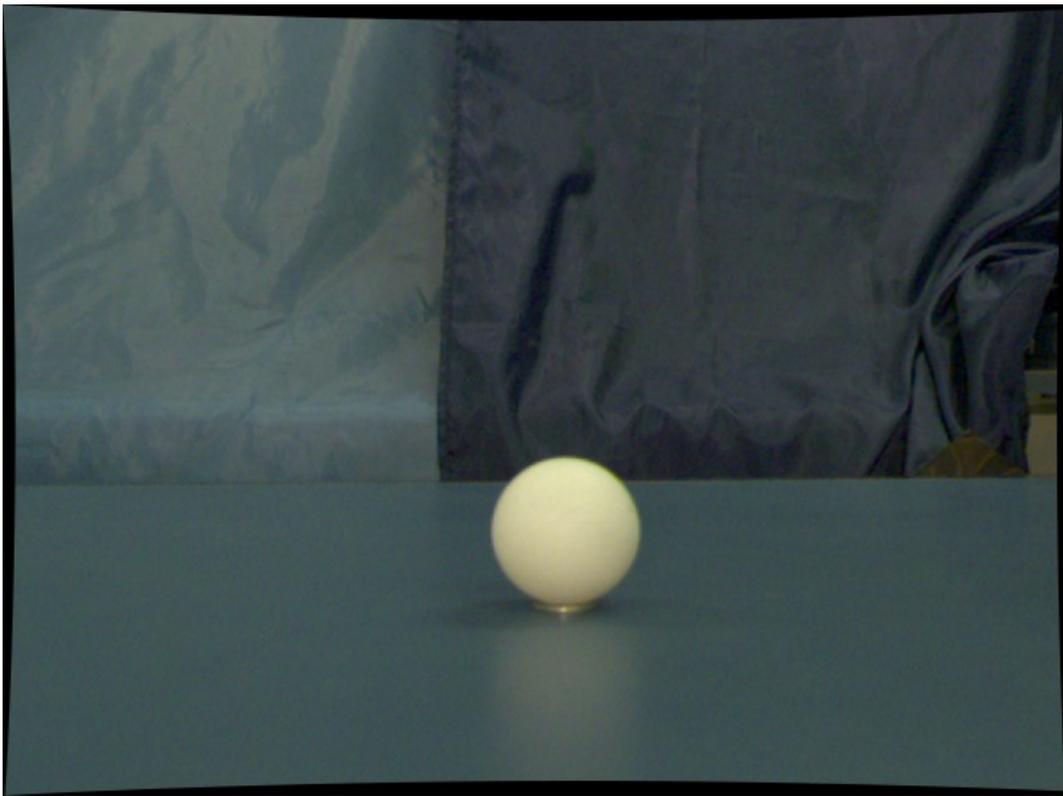


図 4.9 元画像

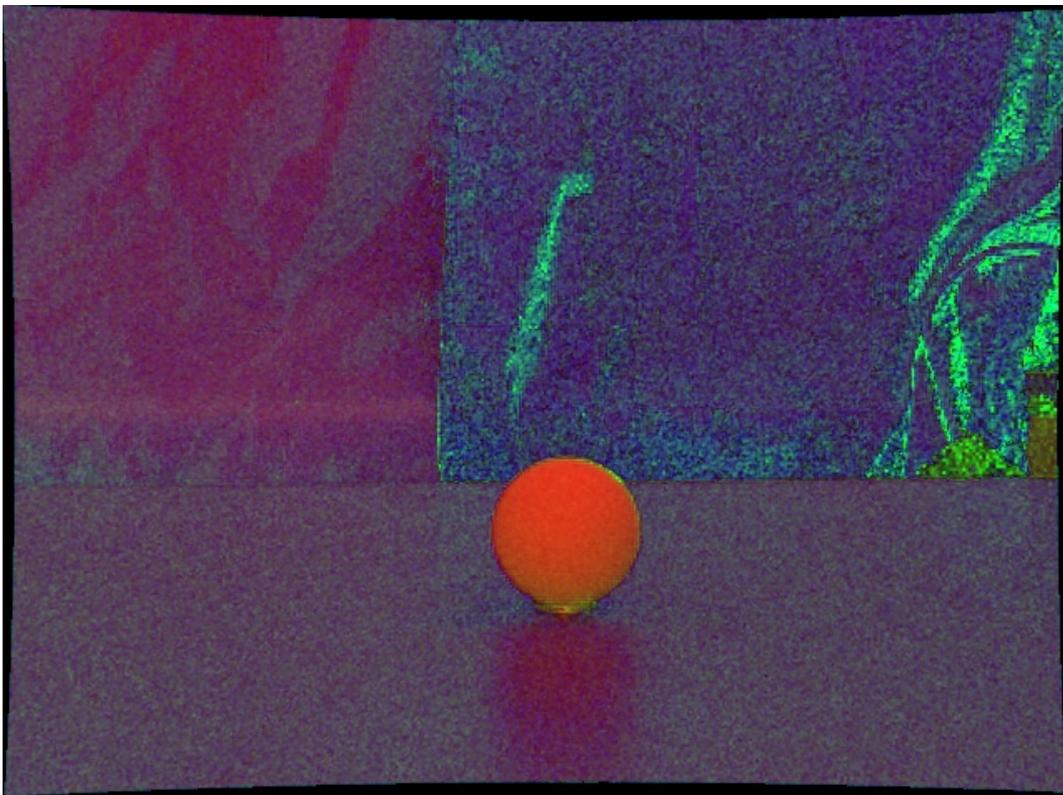


図 4.10 HSV 画像

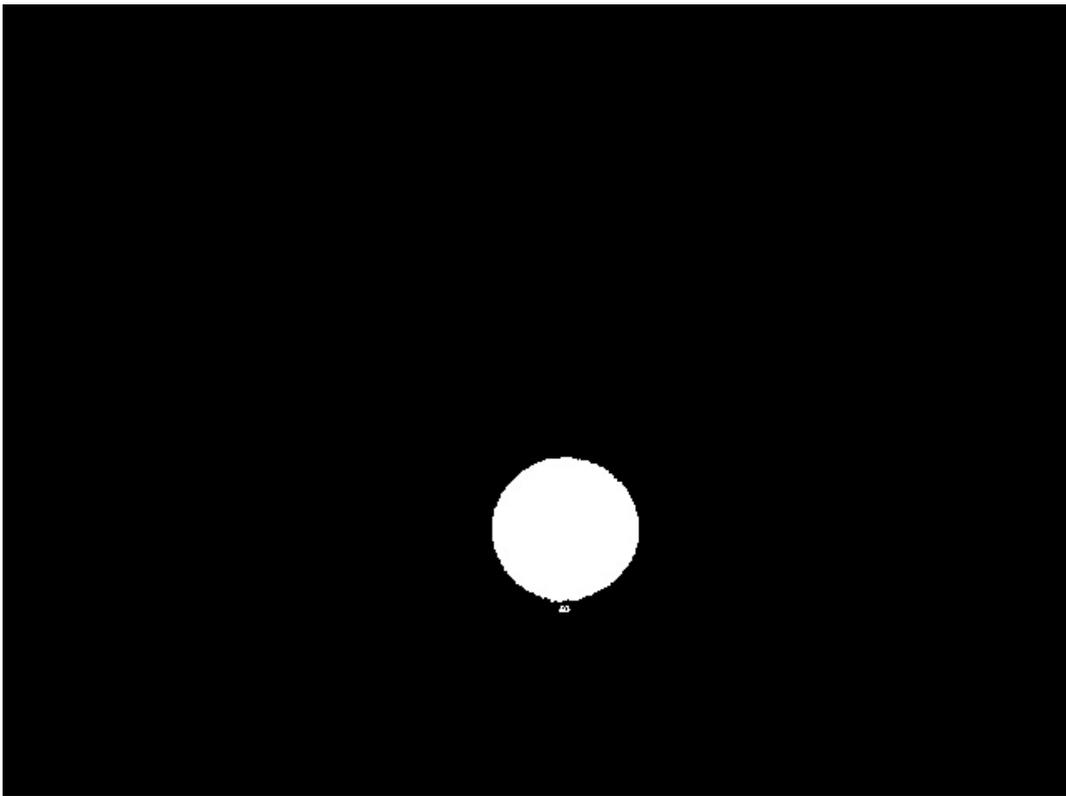


図 4.11 白色識別画像

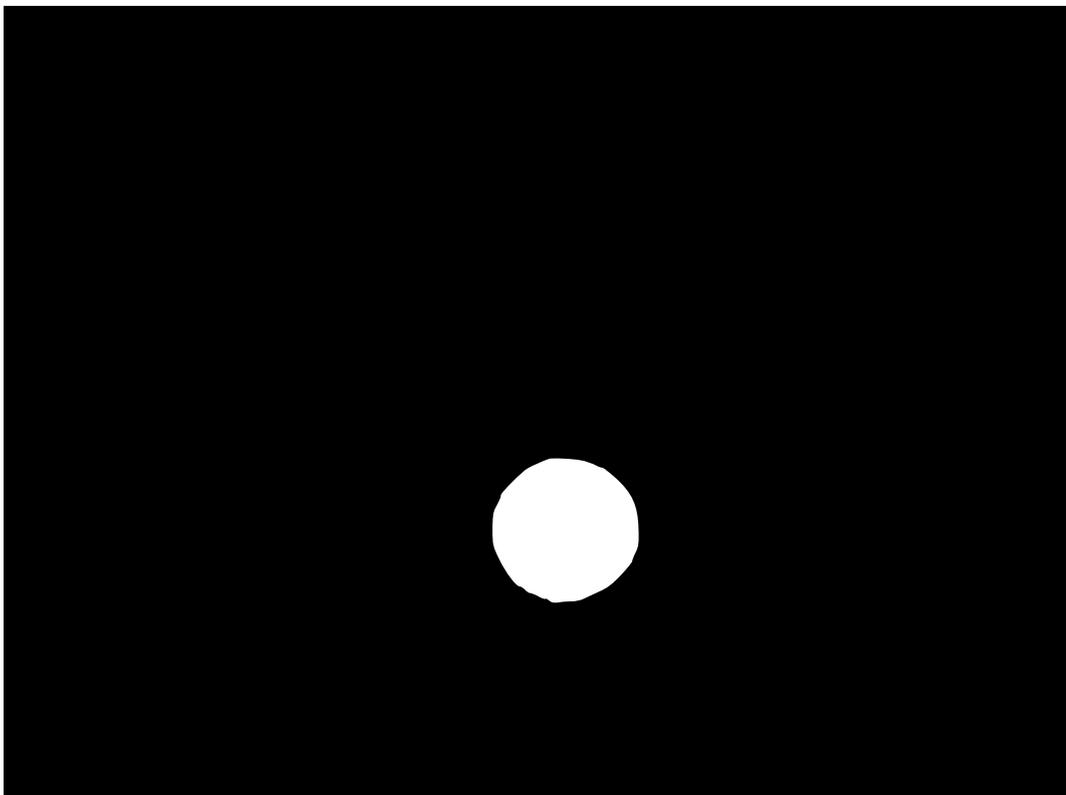


図 4.12 ボール識別画像

この方式の問題点として、ボールへの光の入射角による影部分の影響がある。ボールは円形であるものの、ボールへの光の入射方向によって一部がボールの他の部分と比べカメラに暗く映ることにより、白色識別時に暗く映る部分が削られてしまう。ボール認識時の円形度の適用では一定値以上の円形度を持てばボールと識別可能であるため多少削れた場合も問題なく識別が可能であるが、一部が削れた状態で重心位置の計算を行うと実際のボール中心位置とは異なる場所が中心と認識されてしまい、位置計算時に誤差が生じてしまう。そこで、ボールに補正を掛けることで正しい中心位置を取得する。ボール識別後の画像に最小外接円を重ねることで欠けた一部を埋めることが可能である。その後、重ね合わせた最小外接円の重心位置を算出することでボールの中心位置を取得する。ボール画像への影部分補正の影響を図4.13および図4.14に示す。

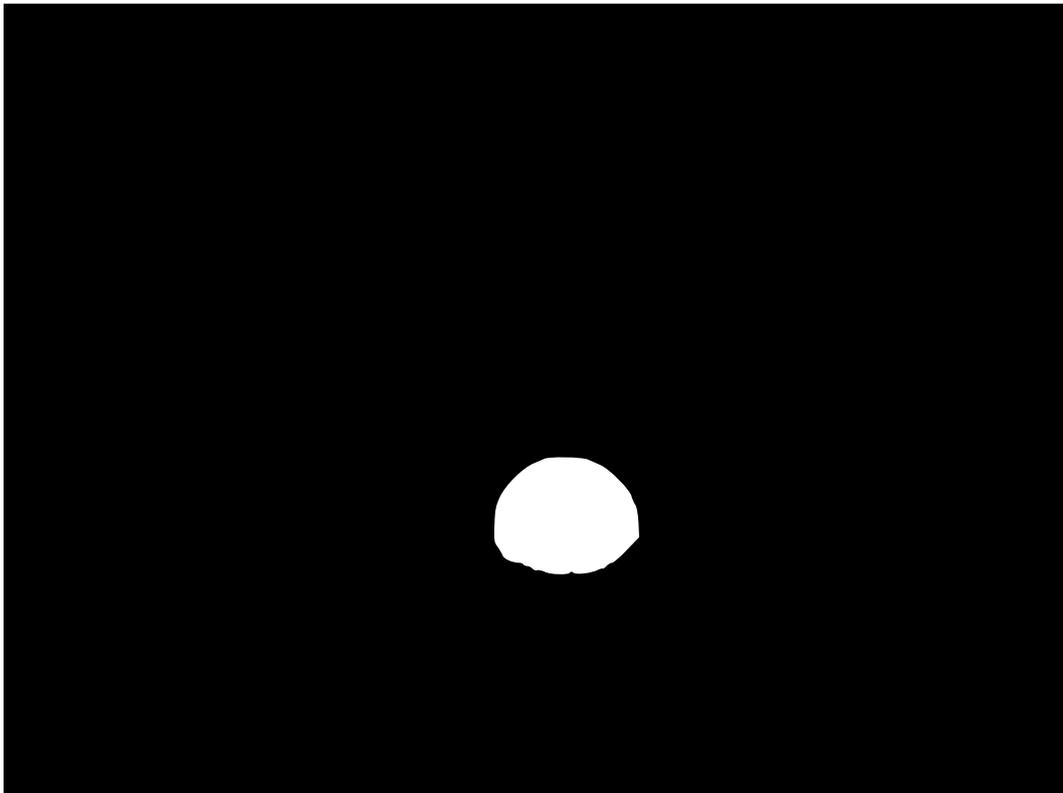


図 4.13 影による影響

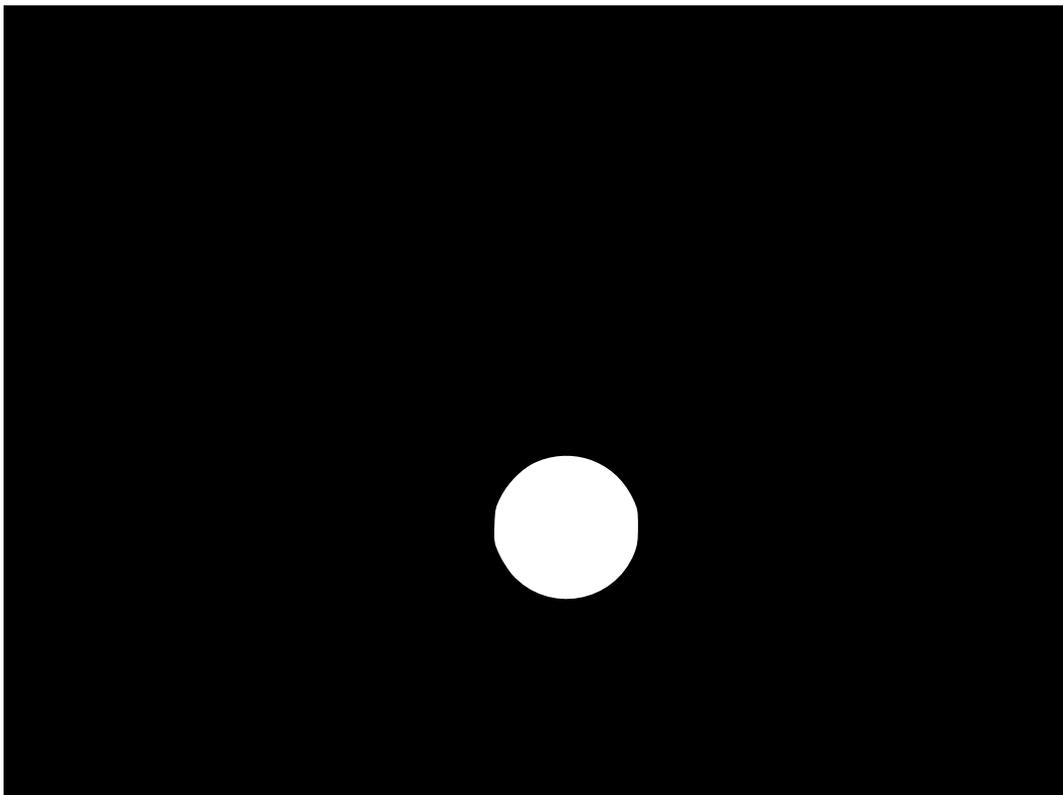


図 4.14 最小外接円補正

計測にあたり，視差による距離計算にはピクセル単位での計算を行ったが，カメラからの距離が離れるほどに視差が短くなり，一定の距離の間位置が異なる場合でも計算されるボールまでの距離が変わらないという問題が発生した．そこで今回は補正されたボールの重心位置をサブピクセル単位で求めることとした．これによりピクセル単位での計算にて正しく得ることのできないボール位置を正しく求めることが可能になった．

## 第5章 軌道推定条件の決定

### 5.1 実験内容

提案手法による軌道推定のための予備実験として、推定条件の決定実験を行う。決定する推定条件としては初期速度推定を行なうまでの取得座標数，角速度推定を行なうまでの取得座標数である。この2つの条件における取得座標数とは、ボール座標が初めて得られた際を0とした場合の、各推定を行なうまでに得られた座標データの数とする。この実験により単一のバックスピンでのボール軌道データから、提案手法を用いて角速度推定、軌道計算時間を調査した。また推定条件の変化による推定結果の変化を調査するため、初期速度推定時までの取得座標数を3, 5, 7の3通り、角速度推定時までの取得座標数を初期速度推定時までの取得座標数からさらに3, 5, 7増加する場合の3通り、つまり合計9通りの条件による推定結果を比較した。この実験により軌道推定を行なうバックスピンでの軌道データを図5.1~5.3に示す。

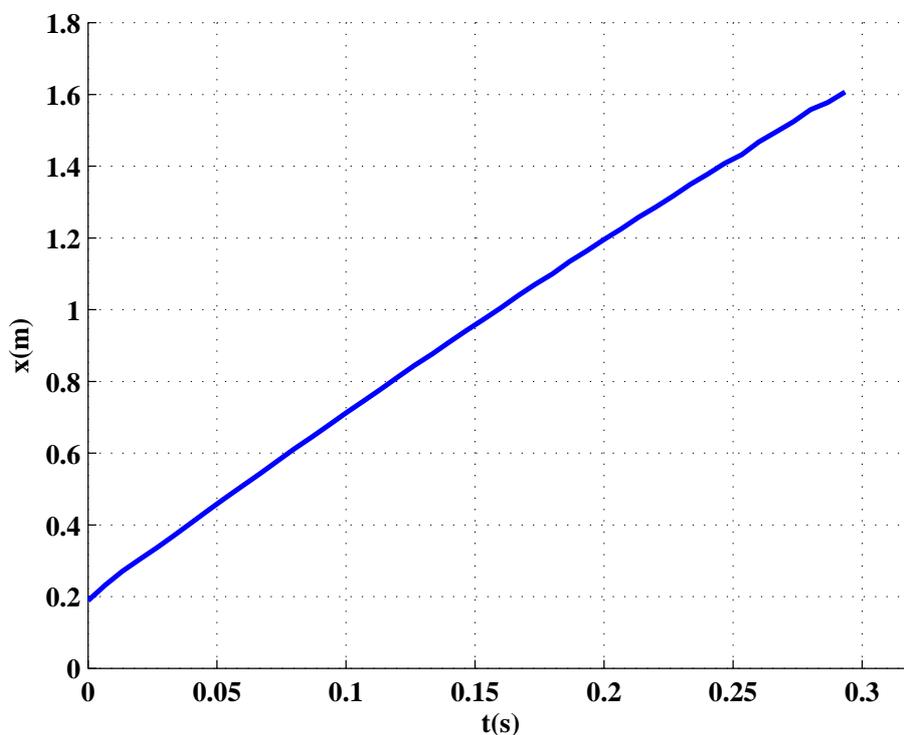


図5.1 バックスピン軌道データ (x軸)

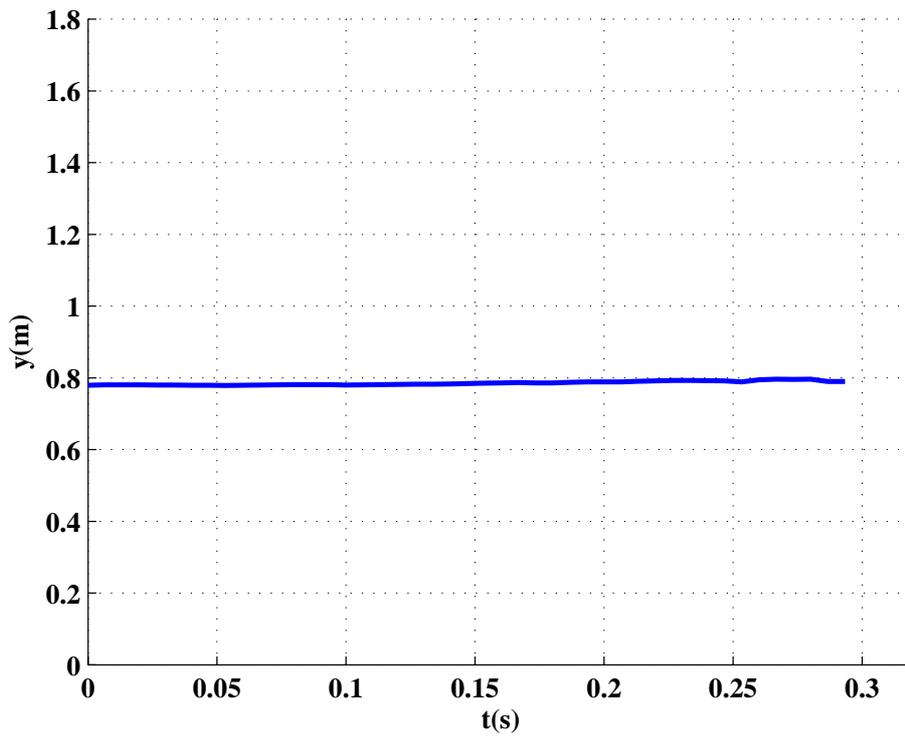


図 5.2 バックスピン軌道データ (y 軸)

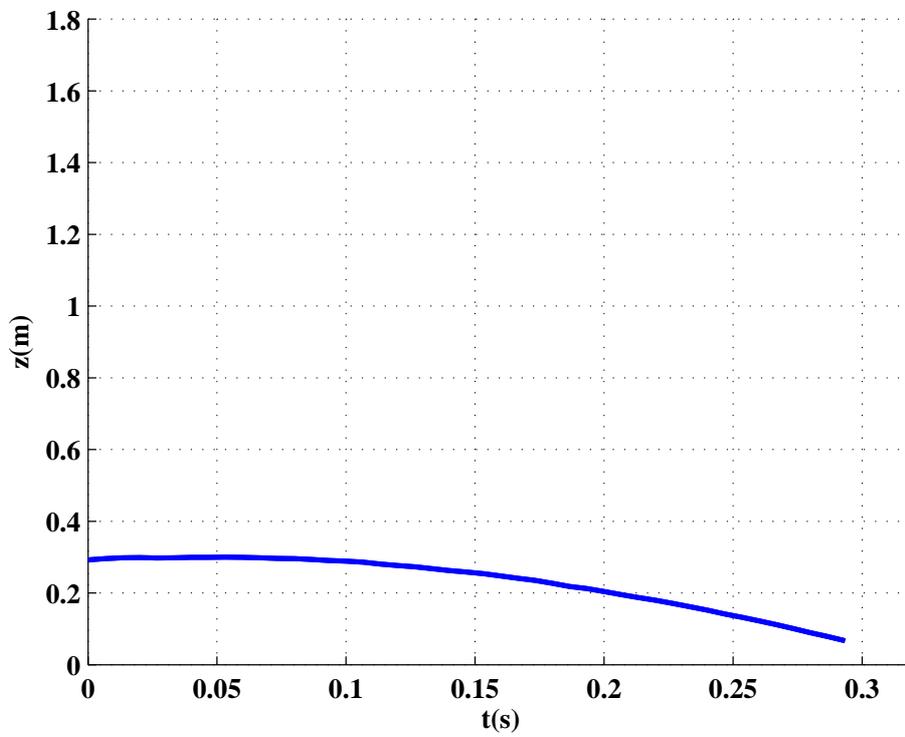


図 5.3 バックスピン軌道データ (z 軸)

## 5.2 実験結果

計算時間，飛行終了時における推定誤差，ボール回転数の推定結果について，初期速度推定時の座標データ番号が3点目での推定結果を表5.1に，5点目での推定結果を表5.2に，7点目での推定結果を表5.3に示す．

すべての場合において推定終了までの計算時刻は0.125秒以下と非常に短く，どの条件を用いた場合でもボール飛行時間内(0.3s)での計算終了という目標を満たした．また推定された回転数は，初期速度推定までの取得座標数が3での場合はy軸回転が正，取得座標数が5および7の場合はy軸回転が負という結果となった．本実験にて用いた軌道データはボールがバックスピンの場合のものであるため，y軸方向の回転は負となる．そのため初期速度推定までの取得座標数が3での推定結果は誤った結果であると考えられる．飛行終了時点での座標誤差は回転方向を誤って推定した初期速度推定までの取得座標数が3の場合が他の場合と比べ大きくなるものの，その他の場合は大きな誤差は見られなかった．そこで今回は回転方向を正しく推定した条件の中で最も推定開始までの時刻が短いもの，つまり推定に必要なデータ数が少ない初期速度推定までの取得座標数が5，角速度推定時までの取得座標数が初期速度推定時までの取得座標数からさらに3増加したものである8とすることを今後の実験の条件として選定した．

表5.1 取得座標数3での初期速度推定を用いた推定結果

角速度推定までの取得座標数		3	5	7
計算時間 (s)		0.109	0.118	0.120
誤差 (m)	x 軸	-0.075	-0.081	-0.073
	y 軸	0.017	0.037	0.028
	z 軸	0.077	0.061	0.045
回転数 (rps)	x 軸	-75.6	-123.7	130.9
	y 軸	160.2	100.4	53.7
	z 軸	-102.3	-163.2	-170.6

表 5.2 取得座標数 5 での初期速度推定を用いた推定結果

角速度推定までの取得座標数		3	5	7
計算時間 (s)		0.109	0.113	0.125
誤差 (m)	x 軸	0.016	0.012	-0.004
	y 軸	0.019	0.009	-0.005
	z 軸	0.032	0.027	0.025
回転数 (rps)	x 軸	107.4	234.7	335.3
	y 軸	-177.7	-196.5	-219.7
	z 軸	-79.1	-52.0	-11.0

表 5.3 取得座標数 7 での初期速度推定を用いた推定結果

角速度推定までの取得座標数		3	5	7
計算時間 (s)		0.125	0.124	0.123
誤差 (m)	x 軸	0.016	0.007	0.003
	y 軸	0.009	-0.005	0.003
	z 軸	0.020	0.020	0.017
回転数 (rps)	x 軸	117.2	-2.42	-205.6
	y 軸	-201.9	-211.7	-226.5
	z 軸	-10.1	67.9	60.4

## 第6章 検証実験

### 6.1 実験内容

5章にて決定した軌道推定条件を用いて、実際にボール軌道推定を行なう。今回はボールの回転を考慮した軌道推定を行なう必要があるため、トップスピン、バックスピン、サイドスピンの回転の状態の異なる3パターンの軌道について軌道を推定する。各スピンにおけるボール軌道は4章にて製作した軌道計測装置を用いて取得した。各スピンの軌道データは3回ずつ、計9回のデータの取得を行った。これらのデータについて推定結果と実測データを比較し、飛行終了時の座標誤差、回転数、計算時間の観点から考察を行う。また、各時刻における推定結果と実測ボール座標の誤差を調査する。誤差関数を以下に示す。

$$e = p_e - p_m \quad (6.1)$$

$e(e_x, e_y, e_z)$ :推定誤差 [m]

$p_e(x_e, y_e, z_e)$ :ボール推定座標 [m]

$p_m(x_m, y_m, z_m)$ :ボール実測座標 [m]

### 6.2 実験結果

#### 6.2.1 トップスピン

トップスピンのボール軌道データによる回転数推定、飛行終了時の座標誤差、計算時間を表6.1に、推定軌道を図6.1~6.3に示す。推定軌道の図には実測ボール座標、角速度0の場合での軌道推定結果、角速度推定結果を用いた軌道推定結果を示す。また、各時刻における実測座標と角速度0の場合の推定座標および実測座標と推定された角速度の場合の推定座標の誤差を図6.4~6.6に示す。トップスピン時はy軸方向に正方向の回転が大きく表れるが、表6.1にこの特徴が現れている。よって角速度推定結果は正しいものと考えられる。

表 6.1 トップスピン推定結果

推定データ		data1	data2	data3
計算時間 (s)		0.123	0.120	0.125
誤差 (m)	x 軸	-0.005	0.028	0.018
	y 軸	0.007	0.023	0.007
	z 軸	0.011	0.020	-0.052
回転数 (rps)	x 軸	-94.8	-4.9	-4.1
	y 軸	120.0	94.1	106.2
	z 軸	-33.9	-28.6	-33.3

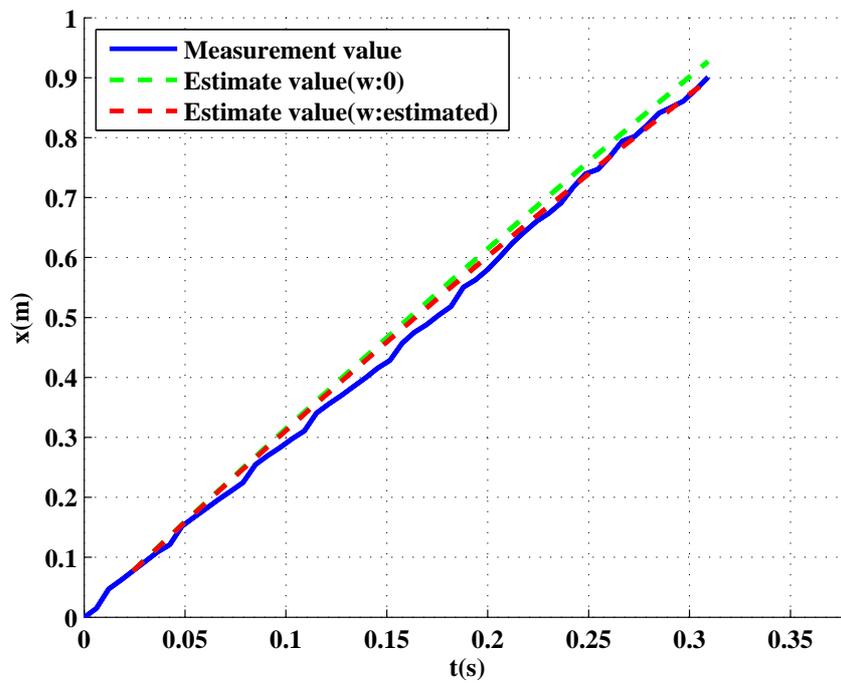


図 6.1 トップスピン推定結果 (x 軸)

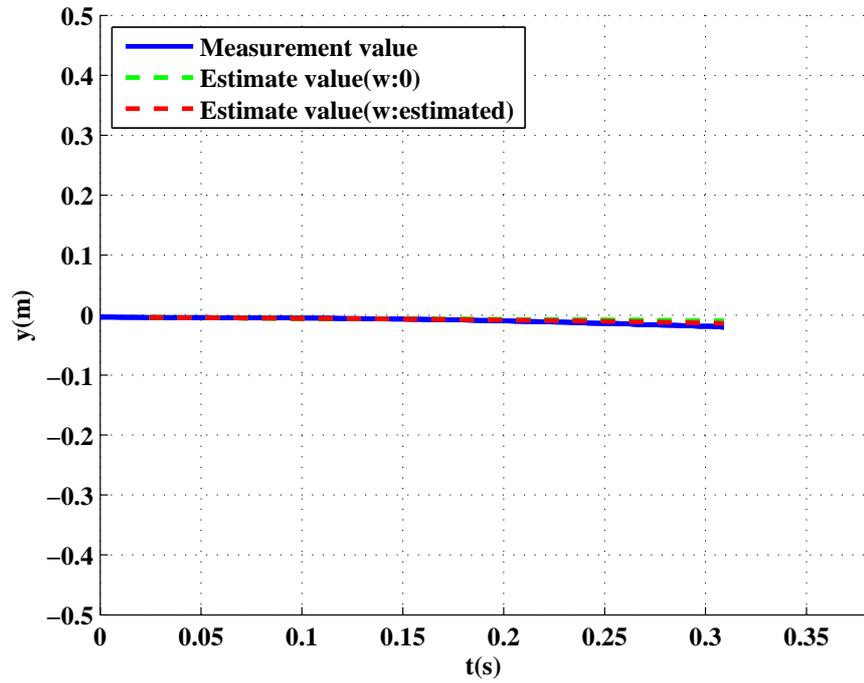


図 6.2 トップスピン推定結果 (y 軸)

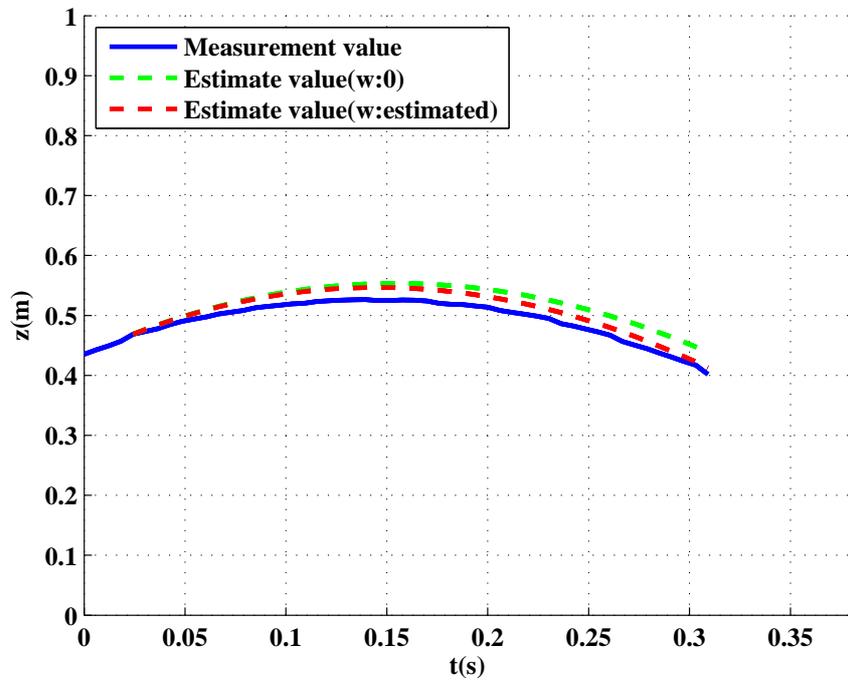


図 6.3 トップスピン推定結果 (z 軸)

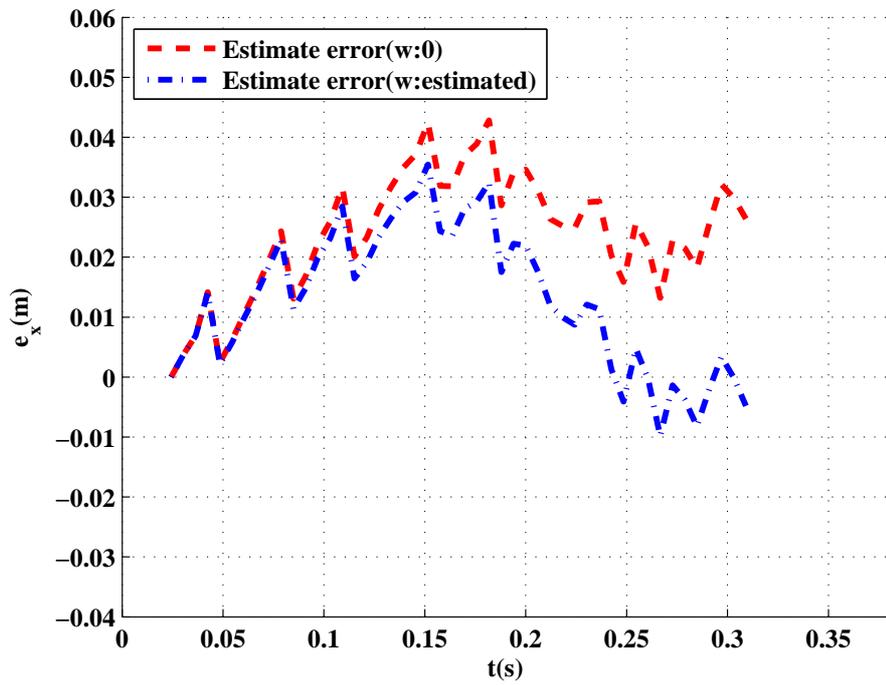


図 6.4 各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (x 軸)

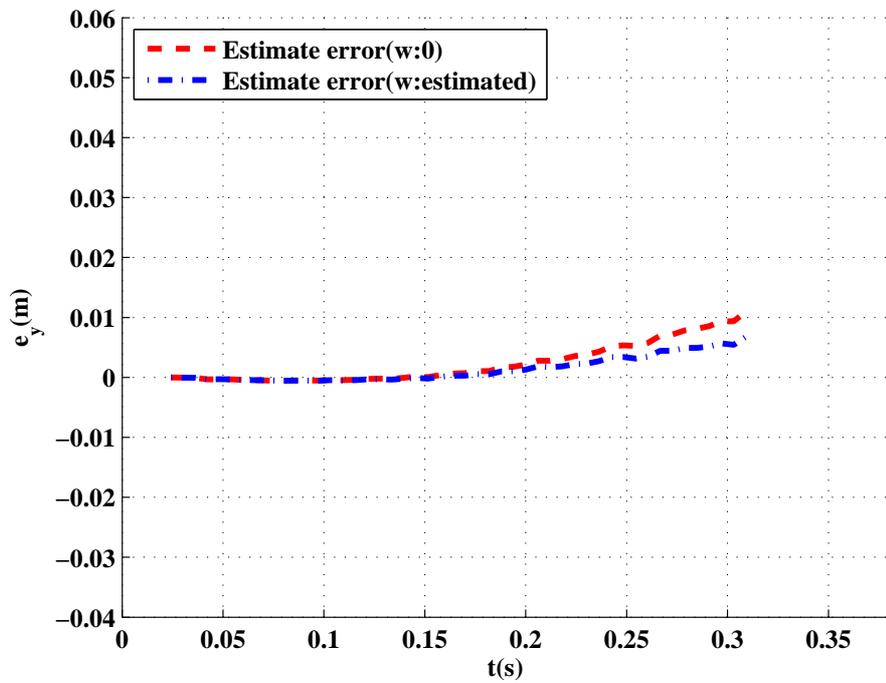


図 6.5 各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (y 軸)

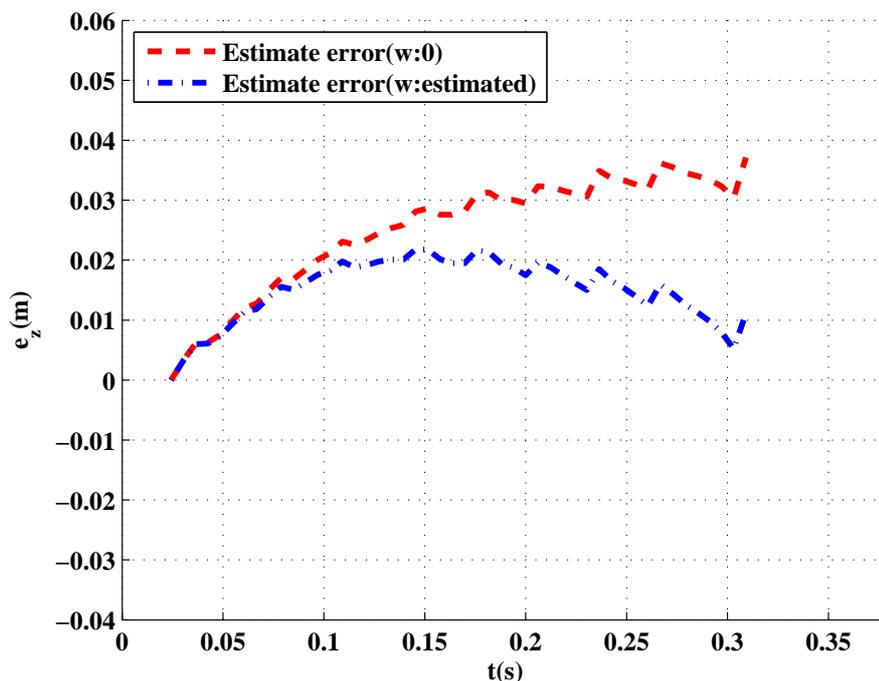


図 6.6 各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (z 軸)

### 6.2.2 バックスピン

バックスピンのボール軌道データによる回転数推定，飛行終了時の座標誤差，計算時間を表 6.2 に，推定軌道を図 6.7～6.9 に示す．また，各時刻における実測座標と角速度 0 の場合の推定座標および実測座標と推定された角速度の場合の推定座標の誤差を図 6.10～6.12 に示す．バックスピン時は y 軸方向に負方向の回転が大きく表れるが，表 6.2 にこの特徴が現れている．よって角速度推定結果は正しいものと考えられる．

表 6.2 バックスピン推定結果

推定データ	data1	data2	data3	
計算時間 (s)	0.120	0.139	0.124	
誤差 (m)	x 軸	-0.019	0.021	0.012
	y 軸	0.041	0.026	0.012
	z 軸	-0.116	-0.009	-0.014
回転数 (rps)	x 軸	44.6	65.5	63.9
	y 軸	-109.3	-94.1	-115.1
	z 軸	-11.1	-22.9	4.2

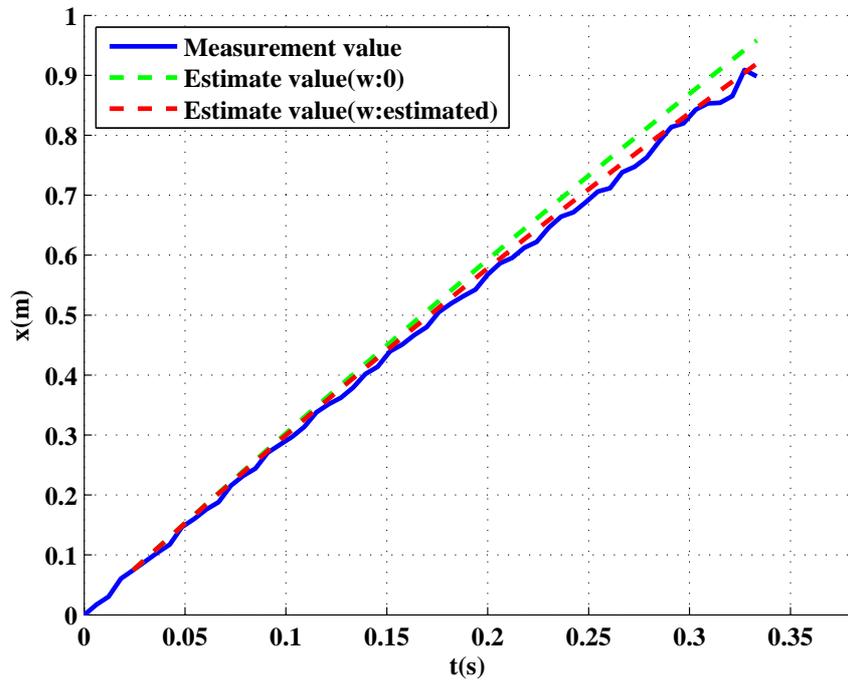


図 6.7 バックスピン推定結果 (x 軸)

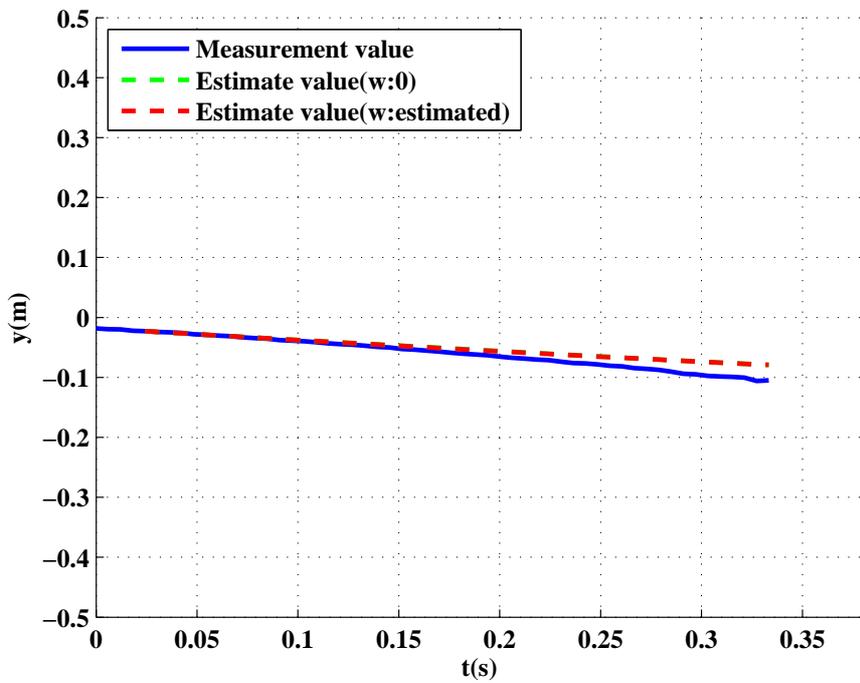


図 6.8 バックスピン推定結果 (y 軸)

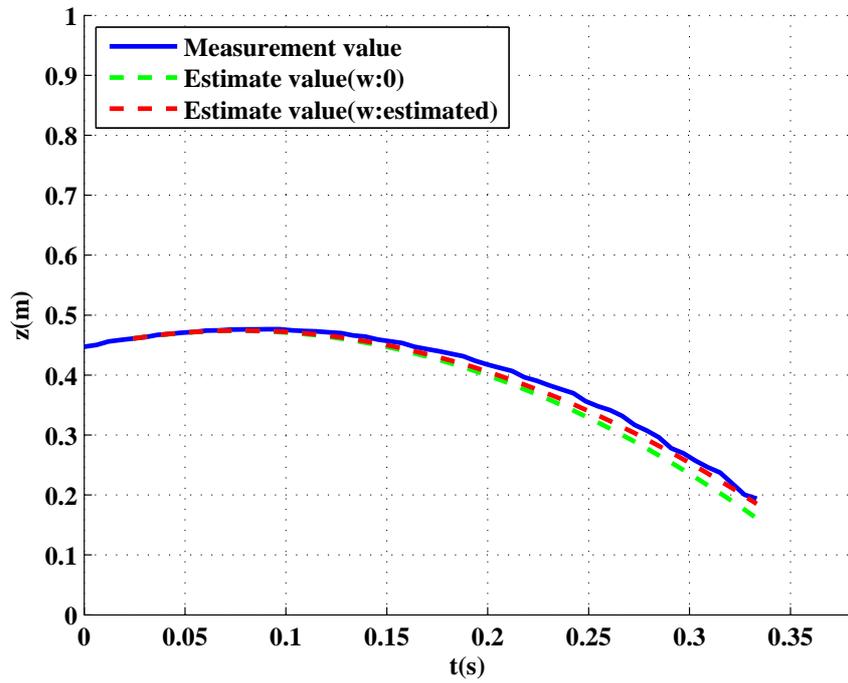


図 6.9 バックスピン推定結果 (z 軸)

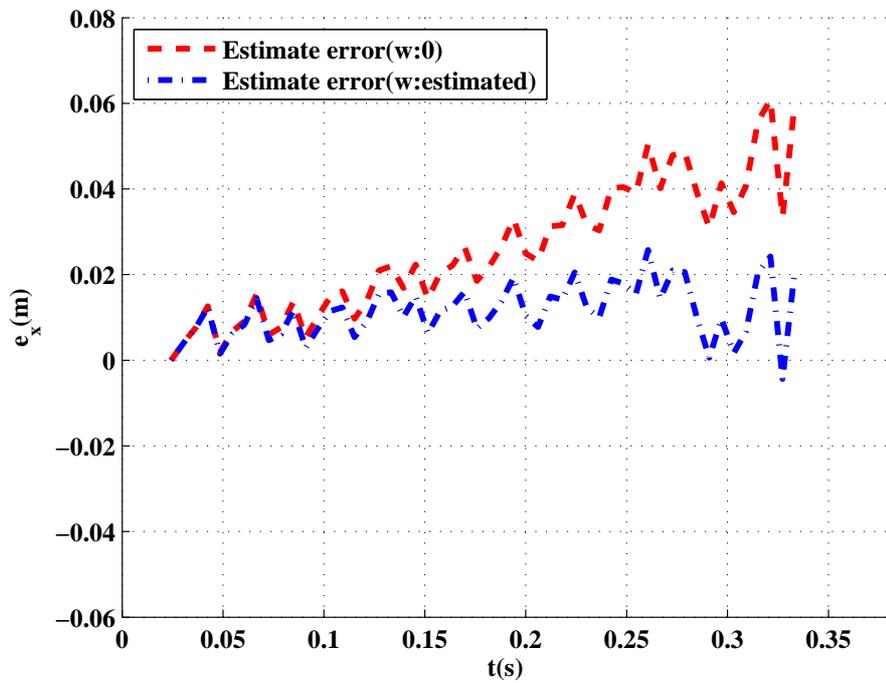


図 6.10 各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (x 軸)

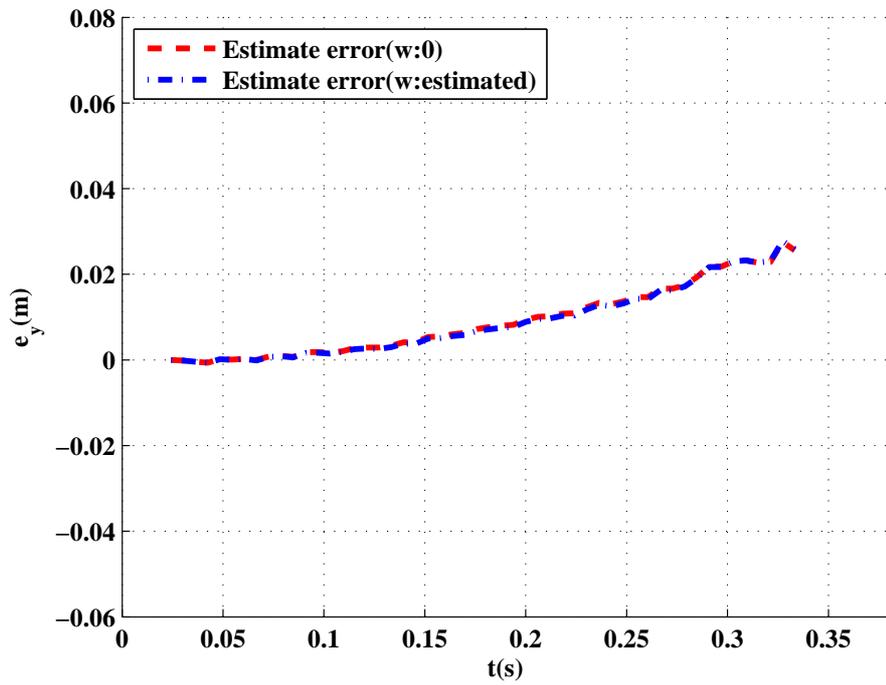


図 6.11 各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (y 軸)

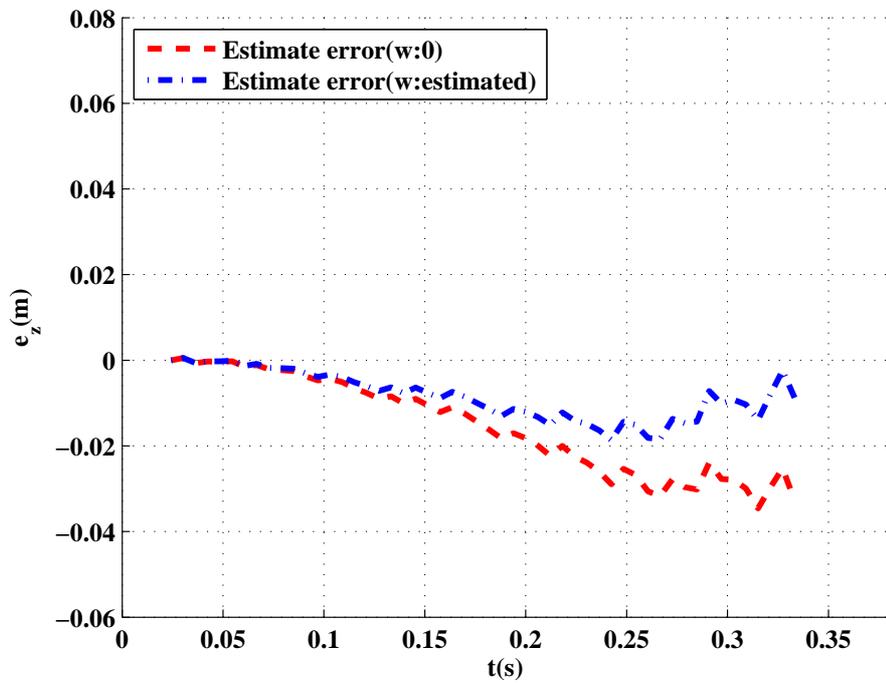


図 6.12 各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (z 軸)

### 6.2.3 サイドスピン

サイドスピンのボール軌道データによる回転数推定，飛行終了時の座標誤差，計算時間を表 6.3 に，推定軌道を図 6.13 ~ 6.15 に示す．また，各時刻における実測座標と角速度 0 の場合の推定座標および実測座標と推定された角速度の場合の推定座標の誤差を図 6.16 ~ 6.18 に示す．サイドスピン時は  $x$  軸，および  $z$  方向に回転が大きく表れるが，表 6.3 に  $x$  軸負方向に回転が大きく表れている．よって角速度推定結果は正しいものと考えられる．

表 6.3 サイドスピン推定結果

推定データ		data1	data2	data3
計算時間 (s)		0.121	0.128	0.136
誤差 (m)	x 軸	0.009	0.033	0.004
	y 軸	-0.047	0.017	-0.008
	z 軸	0.045	0.008	0.022
回転数 (rps)	x 軸	-124.2	-126.4	-123.0
	y 軸	26.9	110.4	124.3
	z 軸	-69.9	64.1	-29.5

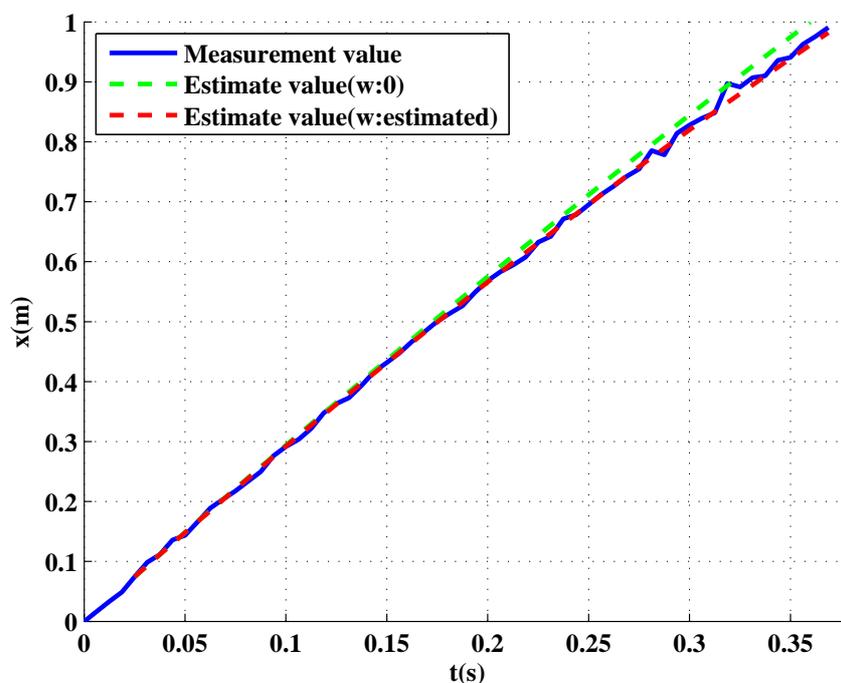


図 6.13 サイドスピン推定結果 ( $x$  軸)

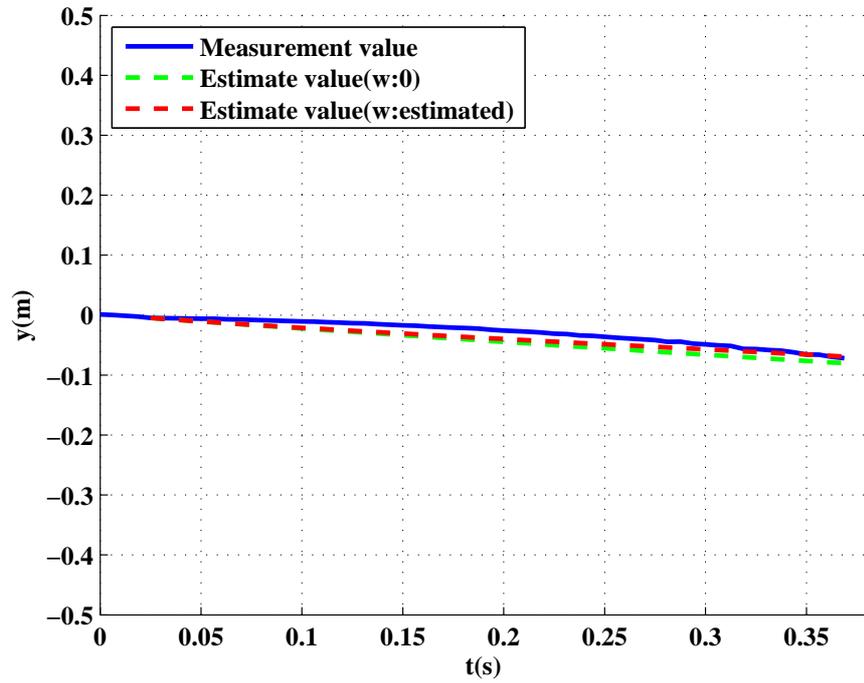


図 6.14 サイドスピン推定結果 (y 軸)

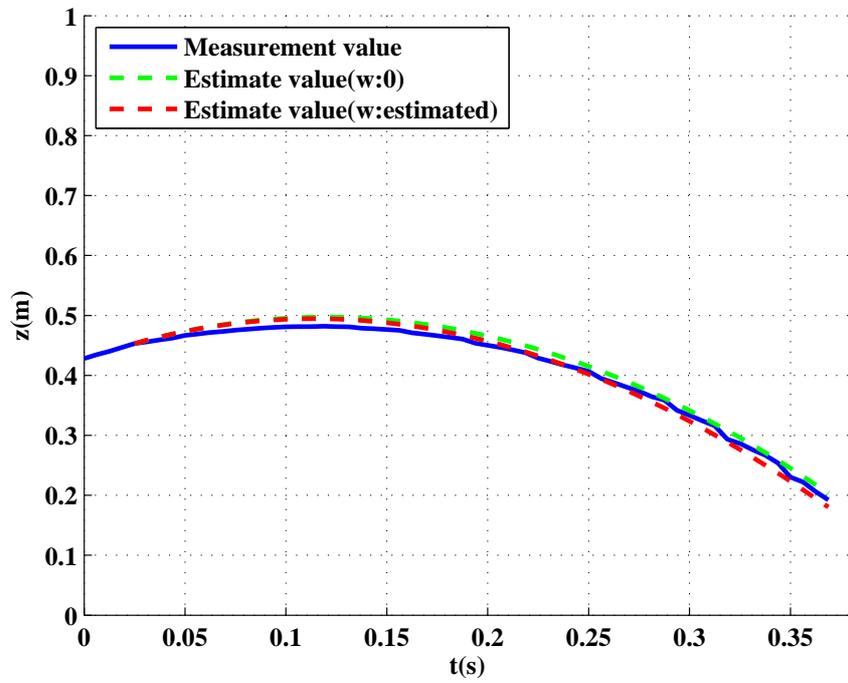


図 6.15 サイドスピン推定結果 (z 軸)

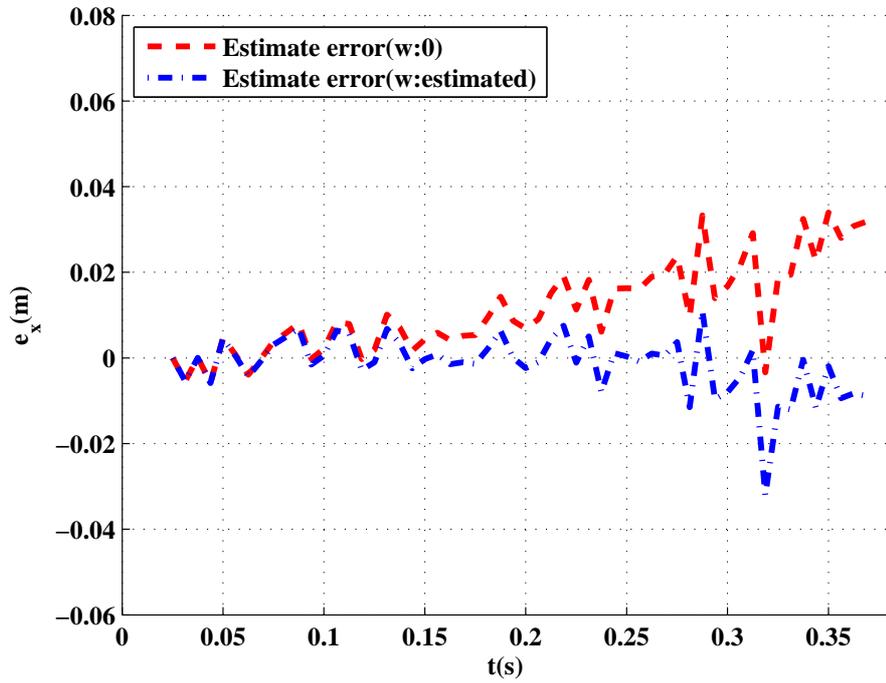


図 6.16 各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 (x 軸)

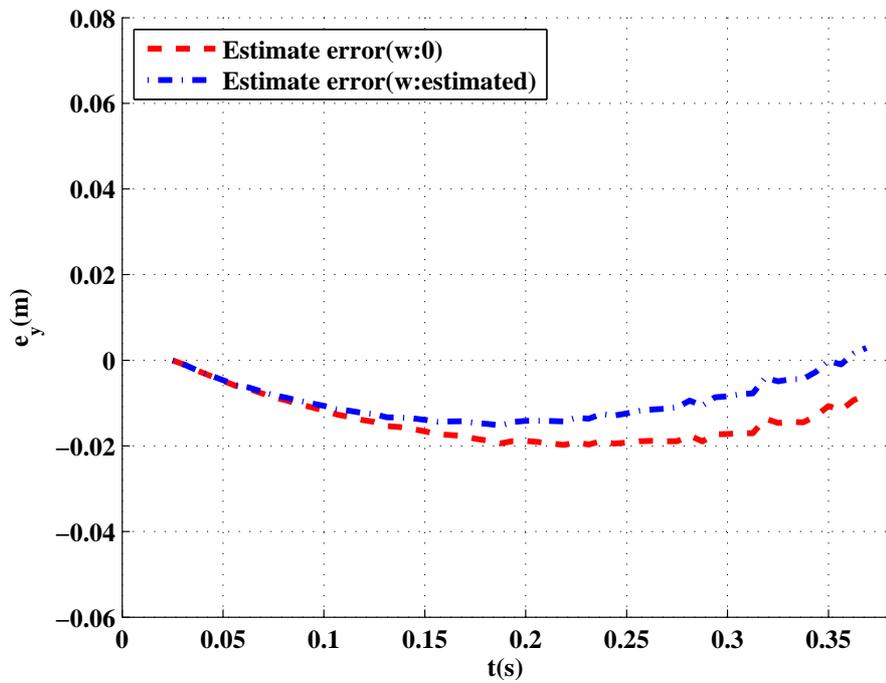


図 6.17 各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 (y 軸)

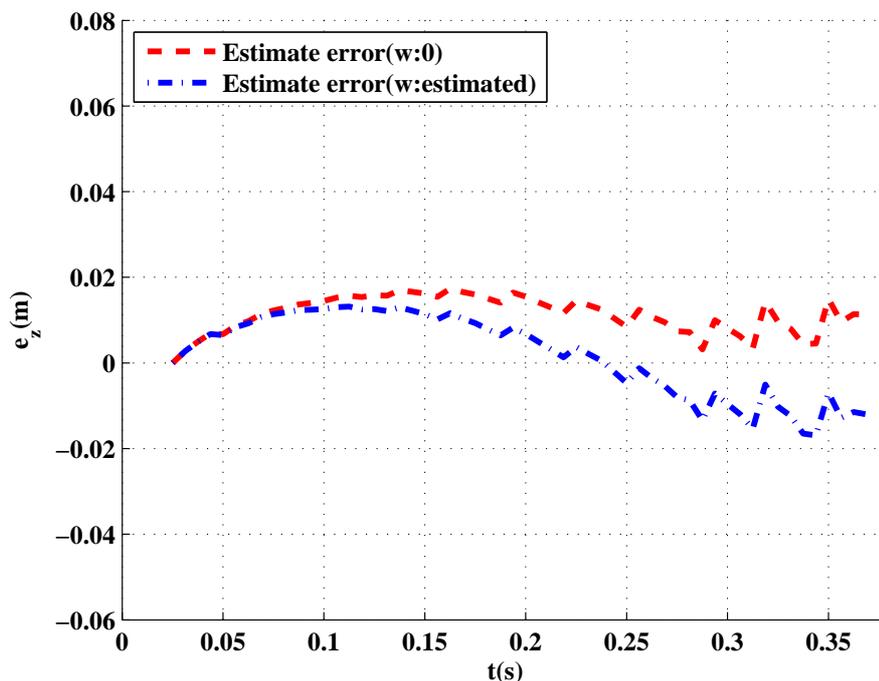


図 6.18 各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 ( $z$  軸)

#### 6.2.4 考察

各回転方向における推定結果より，ボールの回転推定については実際の回転方向と同様の向きの回転が推定された．また，軌道推定に必要な計算時間は長いものでも 0.139 秒と従来の問題点であった飛行時間中での計算終了を十分に可能とするものとなった．計算時間については，今回用いた計算機の CPU である Intel Core2 Quad CPU Q6700 は現行の多く用いられる CPU と比較し性能面で劣るものであるため，現行の CPU にて提案手法を用いることでさらなる向上が期待できる．

本研究での目標は，許容誤差がラケットの範囲内に収まる  $150\text{mm} \times 150\text{mm}$  内である．軌道推定における飛行終了時での平均座標誤差および標準偏差を図 6.19 に示す．図 6.19 より誤差はこの範囲内に収まった．しかしながらトップスピン時の  $z$  軸方向において他の軸と比べ誤差が大きくなるという結果となってしまった．この原因として，計測データに含まれる誤差が考えられる．計測データをより正しいものとする事でこの推定誤差は低減するものと考えられる．

以上の結果より，本提案手法の有効性を示した．

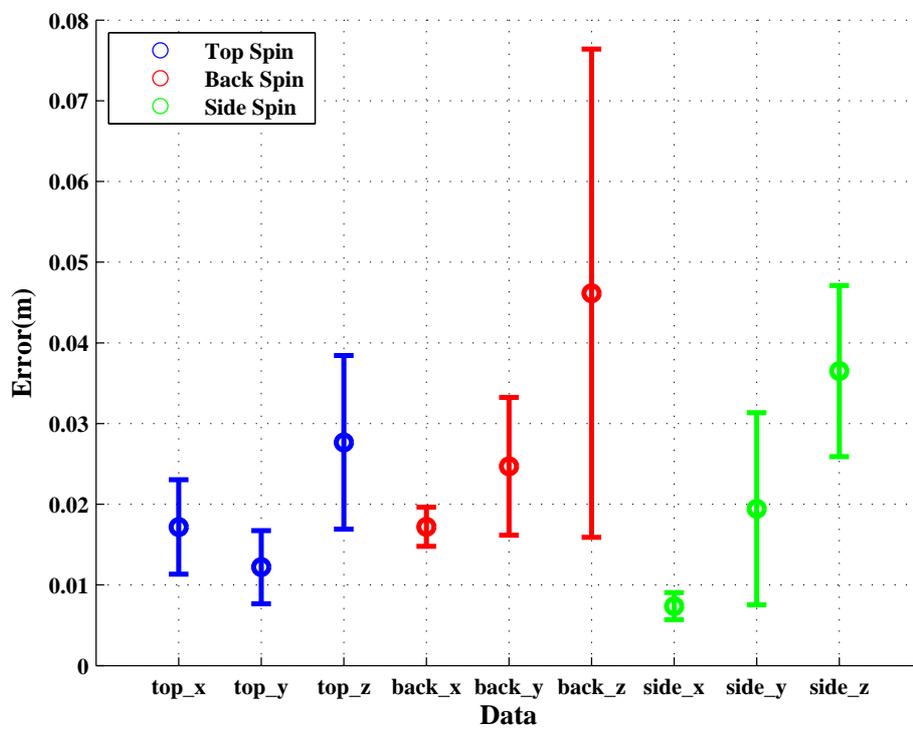


図 6.19 平均座標推定誤差および標本分散

## 第7章 結言

### 7.1 まとめ

近年のロボット開発技術の発展により、ロボットの活躍の場は産業分野のみでなくサービス業などでの利用が増加することが考えられる。これにより人間とロボットがより近い位置で作業をする可能性が増加するが、人間とロボットの距離が縮まることにより接触の危険性が増え大事故へとつながることが考えられる。これを未然に防ぐ技術としてロボットの障害物回避の技術があるが、障害物が移動物体である場合、回避には移動先の推定が必要となる。そこで外力の影響により運動の様子が変化しやすい球体を例に挙げ、移動先推定を行なう。球体の移動が頻繁に発生するものとして球技があるが、中でも卓球は回転による軌道への影響が大きく表れるため軌道推定が難しい。

この問題に対し、様々な軌道推定法が研究されている。オムロン株式会社の FOR-PHEUS はセンサにより球の三次元計測を行い、AI によるディープラーニングを用いた軌道予測と 1ms 単位でのロボット制御を行うことにより返球動作を可能としている。また、Mario A. Aguirre-Lopez らの研究ではボール軌道のうち三点のデータからボール軌道を推定する方法を提案した。推定位置と実測位置 (三点分) の誤差を最小になるまで各点での角速度推定および速度計算を繰り返すことで軌道を推定する方法となる。この他にも、あらかじめ決められた角速度を用いることで軌道推定を行なう手法もある。

しかしながら、軌道予測を行う上で従来の手法では高速な制御を行うことや、角速度推定時に非常に多くの計算を要するために高性能な計算機を用いる必要がある。また、これを回避するためにあらかじめ決められた角速度を用いる手法があるが、複数回の球体の飛行時は毎度同じ回転になるとは限られないため軌道推定結果に多くの誤差を含むことが考えられる。そこで本研究では、無回転時の軌道推定結果と実際のボール軌道との誤差を用いることで角速度の推定を行ない、これを用いた軌道推定法を提案した。この推定法では、実際のボール飛行初期の座標情報のみで軌道推定が可能である。

結果として、実際の回転の様子と同様の回転が推定され、軌道推定の結果を実際の飛行終了座標と比較した誤差がラケットの範囲内に収まることを確認した。また計算時間についてもボールの飛行時間内に計算終了することが確かめられた。

## 7.2 今後の展望

今後の展望として、提案した軌道推定法の他の機器への転用が挙げられる。今回は卓球という限定的な環境のみでの推定であったが、本手法はその他の環境でも適用が可能である。本手法を他の環境にて用いる場合、推定したい飛行物の重量および数回の実測データを得ることにより各係数のパラメータ推定を行うことで可能となる。これにより他のスポーツやサービス業等のより人と近い場所での作業時に事故の確率を低減させることが可能である。また、今回の推定法では初期速度の推定にて計測誤差による影響を低減させるため、軌道計測開始より5点分の時間を要した。この計測時間を低減させることでより高速での軌道推定が可能となる。また提案手法は飛行中に限られたものであり、より回転の影響を大きく受ける物体との接触後の軌道変化には対応していない。物体との接触時についての速度変化、回転量変化を考慮することにより接触後の軌道推定も可能になると考えられる。このように幅広い環境に対応した物体の飛行軌道推定法の確立により、事故を防ぐためにロボットへ与えられる作業環境の制約が減少することで、ロボットの活躍の場の拡大が期待される。

## 参考文献

- [1] 経済産業省 ,“ 2012 年 ロボット産業の市場動向 ” , 2012 , P.19  
[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/robot/pdf/20130718002-3.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/robot/pdf/20130718002-3.pdf)
- [2] スバル”アイサイト — New SUBARU SAFETY — SUBARU”  
<https://www.subaru.jp/safety/eyesight/> (参照 2017-10-24)
- [3] 山田 圭佑”卓球ラリーロボット-人と機械の融和を目指して-” 電気学会誌 Vol. 137 (2017) No. 2 P.81-84
- [4] Mario A.Aguirre-Lopez, JavierMorales-Castillo, O.Diaz-Hernandez, Gerardo J.Escalera Santos, F-JavierAlmaguera ”Trajectories reconstruction of spinning baseball pitches by three-point-based algorithm” Applied Mathematics and Computation 000 (2017) P.1-11
- [5] Yongsheng Zhao, Rong Xiong, Yifeng Zhang ,”Model Based Motion State Estimation and Trajectory Prediction of Spinning Ball for Ping-Pong Robots using Expectation-Maximization Algorithm” J Intell Robot Syst DOI 10.1007/s10846-017-0515-8, P.407-423
- [6] ハンビンイク, 水内郁夫, ”卓球ロボットのための回転ボールの三次元回転状態推定法及び軌道予測法” 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Tsukuba, Japan, May 22-25, 2013, 2P1-Q11
- [7] Chunfang LIU , ”Racket Control for a Table Tennis Robot to Return a Ball”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 4, July 2013, P.259-266
- [8] 早川義一, ”Ball Trajectory Planning in Serving Task for Table Tennis Robot”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 9, No. 2, March 2016, P.050-059
- [9] Takeshi Okamoto, ”An Online Estimation of Ball States for Prediction of Ball Trajectory with Aerodynamics Model”, SICE Annual Conference 2013, September 14-17, 2013, Nagoya University, Nagoya, Japan, P.233-241

- 
- [10] 野々村純子, ”物理モデルに基づくバックスピンのかかった卓球ボールの打ち返しによるロボットの軌道生成”, 第54回自動制御連合講演会, 2011年11月19日, 20日, 豊橋技術科学大学, P.1088-1093
- [11] Xiaopeng Chen, ”Dynamic Model based Ball Trajectory Prediction for a Robot Ping-Pong Player”, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, P.603-608
- [12] 田中晃平, ”卓球ボールの空力特性” 2014 日本流体力学会 ながれ 33(2014), P.37-45
- [13] 高村 幸希, ”並進, 回転速度を考慮した空気力学モデルによる卓球ボールの軌道推定” 2016 年度卒業論文
- [14] OPTEX Japan ホームページ, <http://www.optex.co.jp/>
- [15] STEREO LABS ホームページ, <https://www.stereolabs.com/>
- [16] 川崎晴久, “ ロボット工学の基礎 ”, 森北出版株式会社

## 謝辞

本論文は、平成 29 年 4 月から平成 31 年 1 月末日までに遂行された研究をまとめたものであり、多くの先生方の指導と多くの方々のご協力の賜物であり、ここに感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、主査及び指導教員を務めていただき、また研究室配属当初よりご指導いただいた三重大学大学院工学研究科機械工学専攻加藤典彦准教授には大変お世話になりました。3 年間研究について問題にあたった際に多くの助言を頂き、制御工学を中心に、プログラミングや設計についてもご指導いただきました。また日々のミーティングや輪講では、深く追求することや客観的に自分の研究を見直すことの必要性を、また、研究者としての心構えや社会貢献の意義など研究者としての考え方も丁寧にご指導いただきました。また、国際会議や国内講演会の参加の機会を与えていただき、見聞を広められたことに厚くお礼申し上げます。

ご多忙の中、本論文の副査を引き受けていただき、有益なご助言、ご指導を頂きました。三重大学大学院工学研究科機械工学専攻矢野賢一教授、早川聡一郎准教授に感謝の意を述べます。また、矢野賢一教授、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻松井博和助教授には、研究室内の報告会にて有益なご助言を頂いただけでなく、研究室活動における様々な事柄にご指導くださいましたことに深く感謝いたします。

さらに研究室活動において、研究を行いやすい環境を整えて頂いた事務補佐員の熊谷早織様、様々な助言を頂きました。同期の市川君、大林君、岡村君、濱口君、森本君、松崎君、同室にて研究を行った宮脇君、加茂田君、花田君をはじめとするメカトロニクス研究室の皆さま、ご卒業された先輩方や清水君、量子物性研究室の倉本君に深く感謝いたします。最後に、博士前期課程修了までの 25 歳までの間、辛き時を支え、勉学の機会を与えて頂き、有意義な学生生活、様々経験をさせて頂きました両親、祖父母に深く敬意を表すとともに、本研究に取り組む中にご協力頂いた全ての皆様に感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

# 研究業績

## 国際会議論文

1. Y.Takamura and N.Kato, "Trajectory Estimation of Table Tennis Ball by Aerodynamics Model Considering Translational and Rotational Speed", Proc. of ISIET2018 (International Symposium on Innovative Education and Technology), Paper No.10, Thailand, 16-17 July 2018 .

## 国内学会における発表

1. 高村幸希, 加藤典彦, 軌道差による角速度推定を用いた空気力学モデルによる卓球ボールの軌道予測, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 名古屋, 2018年9月3-4日 .

# 目 次

1.1	日本のロボット産業の足元市場規模推計 <sup>[1]</sup>	2
1.2	スバルの三次元視覚センサ”アイサイト” <sup>[2]</sup>	2
1.3	卓球	3
1.4	FORPHEUS	4
1.5	実験概略図 <sup>[4]</sup>	5
1.6	実験概略図 <sup>[5]</sup>	6
1.7	実験概略図 <sup>[6]</sup>	6
1.8	実験概略図 <sup>[7]</sup>	7
1.9	実験概略図 <sup>[8]</sup>	7
1.10	実験概略図 <sup>[9]</sup>	8
1.11	実験概略図 <sup>[10]</sup>	8
1.12	実験概略図 <sup>[11]</sup>	9
1.13	実験概略図 <sup>[12]</sup>	9
1.14	推定結果 <sup>[13]</sup>	10
2.1	スピンパラメータ $sp$ と抗力係数 $C_D$ , 揚力係数 $C_M$ の関係	15
3.1	電子計算機 PRO4000	19
3.2	提案手法 フローチャート	20
4.1	OPTEX 社製赤外線センサ (ZC-1070L-HP) <sup>[14]</sup>	22
4.2	STEREO LABS 社製ステレオカメラ (ZED) <sup>[15]</sup>	22
4.3	高速度カメラ (acA640-750uc)	23
4.4	Basler Lens C125-0418-5M	24
4.5	三角測量の原理 (“ロボット工学の基礎”より引用) <sup>[16]</sup>	26
4.6	ステレオカメラ装置	27
4.7	補正前画像	29
4.8	補正後画像	29
4.9	元画像	30
4.10	HSV 画像	30
4.11	白色識別画像	31
4.12	ボール識別画像	31
4.13	影による影響	32
4.14	最小外接円補正	33

5.1	バックスピン軌道データ (x 軸)	34
5.2	バックスピン軌道データ (y 軸)	35
5.3	バックスピン軌道データ (z 軸)	35
6.1	トップスピン推定結果 (x 軸)	39
6.2	トップスピン推定結果 (y 軸)	40
6.3	トップスピン推定結果 (z 軸)	40
6.4	各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (x 軸)	41
6.5	各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (y 軸)	41
6.6	各時刻におけるトップスピン軌道推定誤差 (z 軸)	42
6.7	バックスピン推定結果 (x 軸)	43
6.8	バックスピン推定結果 (y 軸)	43
6.9	バックスピン推定結果 (z 軸)	44
6.10	各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (x 軸)	44
6.11	各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (y 軸)	45
6.12	各時刻におけるバックスピン軌道推定誤差 (z 軸)	45
6.13	サイドスピン推定結果 (x 軸)	46
6.14	サイドスピン推定結果 (y 軸)	47
6.15	サイドスピン推定結果 (z 軸)	47
6.16	各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 (x 軸)	48
6.17	各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 (y 軸)	48
6.18	各時刻におけるサイドスピン軌道推定誤差 (z 軸)	49
6.19	平均座標推定誤差および標本分散	50

# 表 目 次

2.1	抗力係数, 揚力係数パラメータ推定値 . . . . .	14
2.2	各試行におけるスピンパラメータおよび抗力係数, 揚力係数 . . . . .	14
3.1	PRO4000 仕様 . . . . .	19
4.1	高速度カメラ (acA640-750uc) 仕様 . . . . .	24
4.2	Basler Lens C125-0418-5M 仕様 . . . . .	25
4.3	Monarch GE 仕様 . . . . .	28
5.1	取得座標数 3 での初期速度推定を用いた推定結果 . . . . .	36
5.2	取得座標数 5 での初期速度推定を用いた推定結果 . . . . .	37
5.3	取得座標数 7 での初期速度推定を用いた推定結果 . . . . .	37
6.1	トップスピン推定結果 . . . . .	39
6.2	バックスピン推定結果 . . . . .	42
6.3	サイドスピン推定結果 . . . . .	46