

卒業論文概要書

Summary of Bachelor's Thesis

Date of submission: 02/06/2019 (MM/DD/YYYY)

学科名 Department	情報通信	氏名 Name	望月 諒	指 導 教 員 Advisor	渡辺 裕 ⑩
研究指導名 Research guidance	オーディオビジュアル 情報処理研究	学籍番号 Student ID number	1w143138-8 ^{CD}		
研究題目 Title	全地球カメラを用いたテニスボールの3次元軌道推定 3D Trajectory Estimation of Tennis Ball Using Omnidirectional Camera				

1. まえがき

現在、硬式テニスのプロフェッショナルが出場するほとんどの大会ではホークアイシステム^[1]と呼ばれる電子審判技術が採用されている。コート脇に設置された複数の高性能レーザーカメラがテニスボールの位置をリアルタイムで追従し、判定困難なボールがインかアウトかを識別できる仕組みになっている。またホークアイシステムはテニスボールの3次元軌道推定のほかに、試合中に選手がコートのどの場所に何割の確率で打ったかがわかる3Dグラフィック画像も生成することができる。そのため、ホークアイシステムを導入し、高性能カメラから取得したデータを自身のトレーニングや練習メニューに活用しているプロフェッショナルのプレイヤーも存在している。

しかしプロフェッショナルのみならず、アマチュアにおいてもデータ活用は重要である。アマチュアの選手がテニスボールの軌道データを利用し、自身の動きやコースごとの確率を分析することができれば自身を客観的に把握することができ、コーチから修正すべき点を指摘してもらいやすくなる。そこで本研究ではより多くの方がテニスボールの軌道データを利用できるように、低コストかつ簡易的なデータ分析手法を提案する。

2. 関連技術

本研究では、RICOH社のコンシューマ向け全地球カメラであるTheta S^[2]で取得した全地球画像を入力画像としてテニスボールの3次元座標軌道を推定する。

Theta Sで行われる画像処理の流れを下の図2.1に示

す。

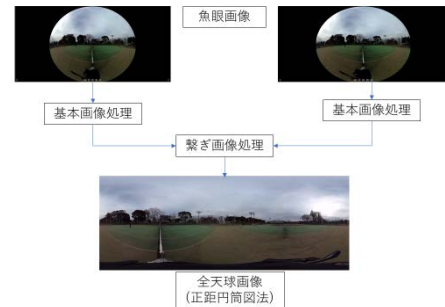


図 2.1 全地球画像における画像処理の流れ

まず、処理は全地球カメラの前後についている魚眼レンズから取得した画像を用いて、基本画像処理が行われる。基本画像処理では、通常のデジタルカメラでも行われている基本的な画像処理に加え、それぞれの魚眼レンズから明度や色相が合った部分が得られるような処理を行っている。次に、2枚の画像の繋ぎ画像処理を行う。2枚の画像それぞれにおいて、パターンマッチング処理によりエリア毎に基準画像と比較画像のずれ量を算出し、繋ぎ位置を検出する。そして検出した繋ぎ位置と各光学系のレンズ特性を考慮し2枚の画像を組み合わせることで1枚の全地球画像が生成される。

3. 提案手法

我々は2台のTheta Sを利用したステレオ法による距離測定^[3]をテニスボールの軌道推定に用いる。まず二つの全地球カメラが取得した動画をそれぞれ静止画に分割する。静止画に表示されるテニスボールの座標を特徴点とする。2枚の静止画における特徴点を選択する。選択した特徴点と二つの全地球カメラを結び、三角測量によりテニスボールの3次元座標を導出する。導い

た3次元座標を3次元空間上にプロットすることでテニスポールの軌道を得ることが可能になる。

4. 実験

始点を一方のコートのサービスライン、終点を他方のコートのサービスラインとして2点間における軌道推定を行った。図4.1にテニスポールの軌道を真横から見た図、図4.2にテニスポールの軌道を俯瞰した図を示す。また表4.1に始点と終点の実測値及び実行値を示す。

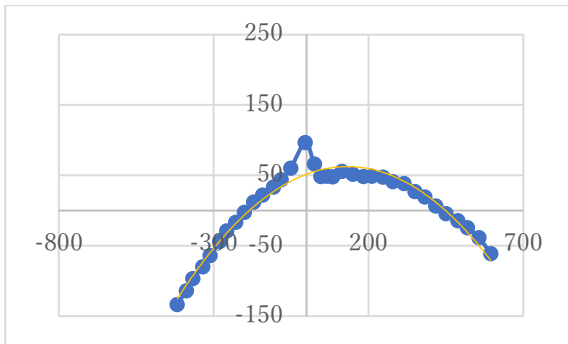


図 4.1 テニスポールの軌道を真横から見た図

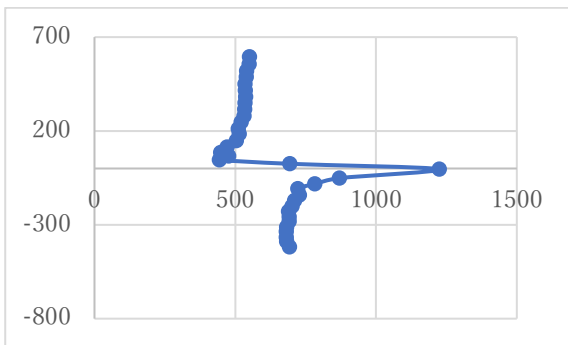


図 4.2 テニスポールの軌道を俯瞰した図

表 4.1 実測値と実行値の関係

		x	y	z
実測値	始点	639	640	#
	終点	639	-490	-140
実行値	始点	550.064	595.056	-61.108
	終点	692.453	-418.127	-133.55
誤差	始点	13.918%	7.022%	#
	終点	8.365%	14.668%	4.607%

図 4.2 より座標がネット付近で左右に大きく変化し

ていることがわかる。これは本研究で用いた手法が2台のカメラと特徴点による三角測量をもとに座標を導出しているため、三角形の形成が困難なネット付近でこのような誤差が生じてしまったと考えられる。また、ネットを越える前後のそれぞれの座標群で形成した直線の切片が異なることがわかる。Theta Sは前後の魚眼レンズから取得した2枚の画像の繋ぎ画像処理において一定以上のエリアが重複した状態で1枚の全天球画像を構成している。そのため、重複しているエリアが座標のずれとして影響し、ネットを越える前後で座標群を結んだ直線の切片が異なってしまうと考えられる。

5. まとめ

本研究では全天球カメラによるテニス軌道推定方式を提案した。終点における平均の推定誤差は9%程度であり、簡易的な軌道推定に利用できると考えられる。今後はネット付近の座標の修正など精度向上を図る。また実用性を向上させるためにキャリブレーションを施すことでカメラの初期位置を自由に設定できるようにする。

参考文献

- [1] Time & Space (平成 31 年(2019 年)1 月現在), <https://time-space.kddi.com/digicolumn/world/20150526/>
- [2] 全天球カメラ(平成 31 年(2019 年)1 月現在), https://jp.ricoh.com/technology/tech/065_theta.html/
- [3] 青木貴大:“全天球カメラを用いたステレオ距離測定”, 早稲田大学基幹理工学部情報通信学科卒業論文, Feb.2018

2018 年度 卒業論文

全天球カメラを用いたテニスボールの
3次元軌道推定

3D Trajectory Estimation of Tennis Ball Using
Omnidirectional Camera

指導教員 渡辺 裕 教授

早稲田大学 基幹理工学部

情報通信学科

1w143138-8

望月 諒

目次

第1章	序論.....	1
1.1	研究の背景.....	1
1.2	研究の目的.....	1
1.3	論文の構成.....	2
第2章	全天球カメラについて.....	3
2.1	はじめに.....	3
2.2	全天球画像.....	3
2.2.1	Sphere 形式.....	4
2.2.2	Equirectangular 形式.....	4
2.3	むすび.....	5
第3章	全天球カメラを用いたステレオ距離測定.....	6
3.1	はじめに.....	6
3.2	全天球カメラ2台を用いたステレオ距離測定.....	6
3.3	むすび.....	11
第4章	実験結果と考察.....	12
4.1	はじめに.....	12
4.2	実験の概要.....	12
4.3	実験1の概要.....	13
4.3.1	実験1の結果.....	13
4.3.2	実験1の考察.....	17
4.4	実験2の概要.....	19
4.4.1	実験2の結果.....	19
4.4.2	実験2の考察.....	22
4.5	実験3の概要.....	24
4.5.1	実験3の結果.....	24
4.5.2	実験3の考察.....	28
4.6	むすび.....	29
第5章	結論.....	30
5.1	まとめ.....	30
5.2	今後の課題.....	30
	謝辞.....	31
	参考文献.....	32
	図一覧.....	33

表一覽.....34

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在、硬式テニスのプロフェッショナルが出場するほとんどの大会ではホークアイシステムと呼ばれる電子審判技術が採用されている。ホークアイシステム^[1]とはコート脇に設置された複数の高性能レーザーカメラを用いることで、テニスボールの座標を瞬時に追跡できる技術である。ホークアイシステムを通して取得されたデータは3D映像に変換され、判定困難なボールがインかアウトかをリアルタイムで見ることができる仕組みになっている。選手は試合中に主審や副審が下した判定に不服な場合、1セットに3回までその判定にチャレンジを宣言し、再度判定を要求することができる。

また、ホークアイシステムはテニスボールの3次元軌道推定のほかに、試合中に選手がコートの中の場所に何割の確率で打ったかがわかる3Dグラフィック画像も生成できる。そのため、かつて女子プロテニス選手として世界ランキング1位まで上りつめたベルギー出身のキム・クライシュテルスは自身が設立したテニスアカデミーでホークアイシステムを導入し、高性能レーザーカメラから取得したデータを自身のトレーニングや練習メニューに活かしている^[2]。

プロフェッショナルのみならず、アマチュアのレベルでもデータを活用し自身の動きやコースごとの確率を定量的に分析することができれば自身を客観的に把握することができ、コーチから修正すべき点を指摘してもらいやすくなる。また、試合前に相手選手のデータを分析し、その選手の特徴を封じ込めるようなプレーや戦術などの対策が可能となる。しかし、ホークアイシステムなどのようなデータ分析ツールはコート脇に設置された高性能レーザーカメラの管理費や維持費などが高コストであるため、アマチュアの大会では利用されておらず、現状としてプロフェッショナルの大会でのみ利用されているという問題点が発生している。よって本研究ではより多くのアマチュアレベルの選手がデータを活用し自身の上達に活かせるように、低コストで簡易的なデータ分析ツールの提供を目指す。

1.2 研究の目的

テニスコートは横幅が12.798m、縦幅が23.770mであるため通常の簡易カメラで撮影をした場合テニスコート全体を撮影することはできない。したがって本研究では、RICOH社が開発したコンシューマ向け全天球カメラであるTheta Sを用いて撮影する。Theta Sを用いることで通常のカメラより視野を広くとることが可能になる。評価実験ではTheta Sを2台用意し、それぞれネットの両脇に設置する。2台のTheta Sから撮影した動画におけるテニスボールの位置を特徴点とし、その特徴点をステレオ法を用いた距離測定により分析

し座標を導出する。導いたテニスボールの座標を3次元空間上にプロットすることで、テニスボールの軌道を求める。

全天球画像を用いたテニスボールの3次元軌道を推定することで、選手が打ち分けるコースから強みや弱みの把握や、ボールのインパクトの瞬間を追いかけることで選手の移動距離などが解析可能となり、アマチュアレベルの選手の育成に大きく貢献ができるようになる。

1.3 論文の構成

以下に本章以降の構成を示す。

第1章は本章であり、本論文の研究の背景及び目的について述べている。

第2章では、本研究で用いる全天球カメラ、全天球画像について述べる。

第3章では、本研究で提案する手法について述べる。

第4章では、実験概要、結果及び考察について述べる。

第5章では、本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章 全天球カメラについて

2.1 はじめに

本章では、本研究で用いる RICOH 社が開発したコンシューマー向け全天球カメラである Theta S について述べる。

2.2 全天球画像

Theta S で撮影ができる全天球画像について述べる。Theta S で行われる画像処理の流れを下の図 2.1 に示す。

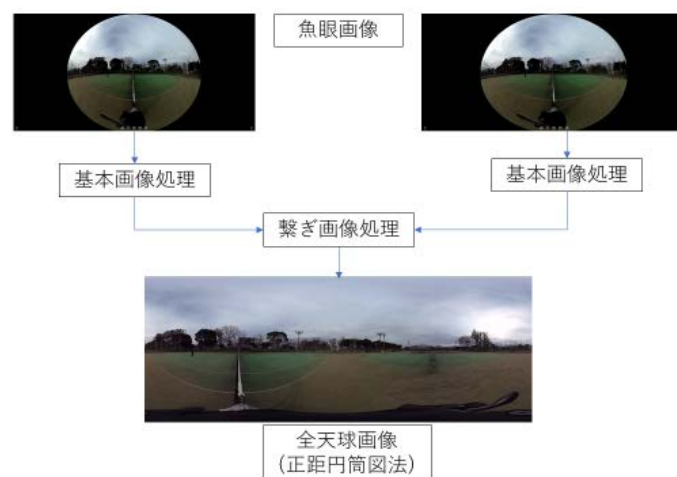


図 2.1 全天球画像における画像処理の流れ

画像はまず全天球カメラの前後についている魚眼レンズから得られる画像データを用いて、基本画像処理を行う。ここでは、通常のデジタルカメラでも行われている基本的な画像処理に加え、それぞれの魚眼レンズから明るさや色味があった画像が得られるような処理を行っている。次に、2枚の画像の繋ぎ画像処理を行う。まず、2枚の画像それぞれにおいて、パターンマッチング処理によりエリア毎に基準画像と比較画像のずれ量を算出し、繋ぎ位置を検出する。そして検出した繋ぎ位置と各光学系のレンズ特性を考慮して、2枚の画像をそれぞれ全天球イメージに変換する。この2枚の全天球イメージ形式の画像を組み合わせることで1枚の全天球イメージが生成されている^[3]。

全天球画像の形式にはいくつか存在するが、本研究では Theta S で用いられている Sphere

形式と Equirectangular 形式について述べる。

2.2.1 Sphere 形式

Sphere 形式の全天球画像は RICOH THETA という専用のアプリケーションのみで閲覧できる。カーソルを移動させることで視野を変更させることができる特徴を持つ。RICOH THETA のアプリケーションで閲覧した全天球画像を下の図 2.1 に示す。

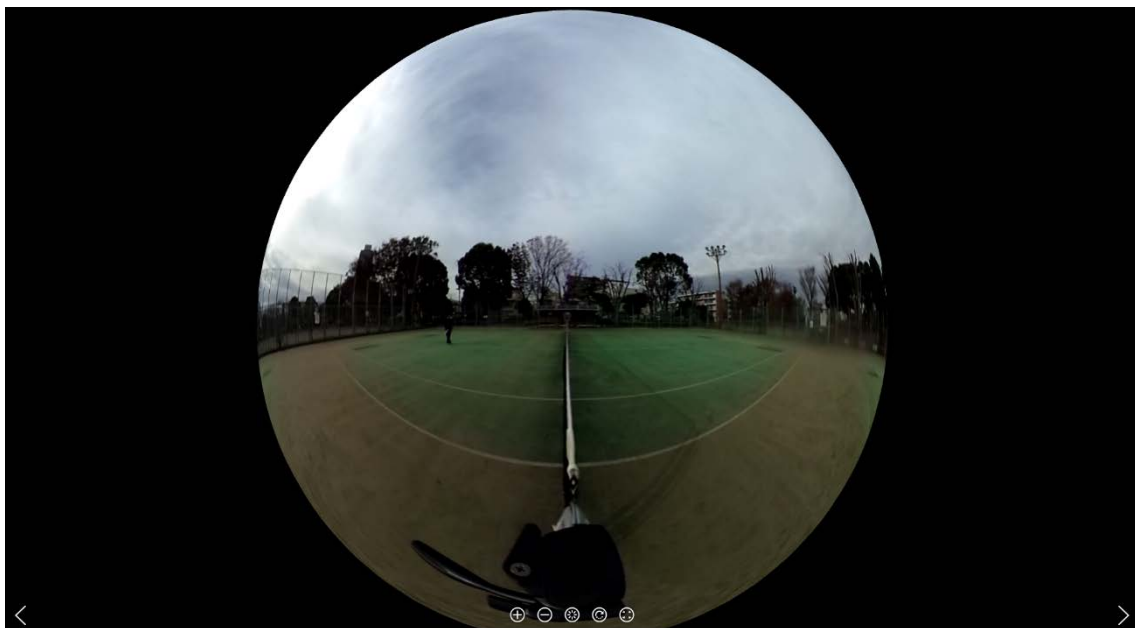


図 2.2 Theta S で撮影した Sphere 形式の全天球画像

2.2.2 Equirectangular 形式

Theta S で撮影した画像は PC に Equirectangular 形式として保存される。Equirectangular 形式とは図 2.1 の Sphere 形式の全天球画像を経度と緯度が直交する地図投影法の一つである正距円筒図法で展開した画像である。その画像を下の図 2.2 に示す。



図 2.3 Theta S で撮影した Equirectangular 形式の全天球画像

2.3 むすび

本章では，本研究で用いる全天球カメラの特性について述べた。

第3章では，本章で述べた全天球カメラを用いたステレオ距離測定について述べる。

第3章 全天球カメラを用いたステレオ距離測定

3.1 はじめに

本章では全天球カメラ2台を用いたステレオ距離測定の手法について述べる．距離測定は三角測量の原理を用いたステレオ法を用いる^[4]．

3.2 全天球カメラ2台を用いたステレオ距離測定

三角測量の原理を用いたステレオ法では通常の画像と魚眼画像を用いる場合で射影される点在实际の位置と異なる．この問題点を考慮するために，まず対象点と対象点が魚眼レンズで射影される画像平面との座標関係について述べる．

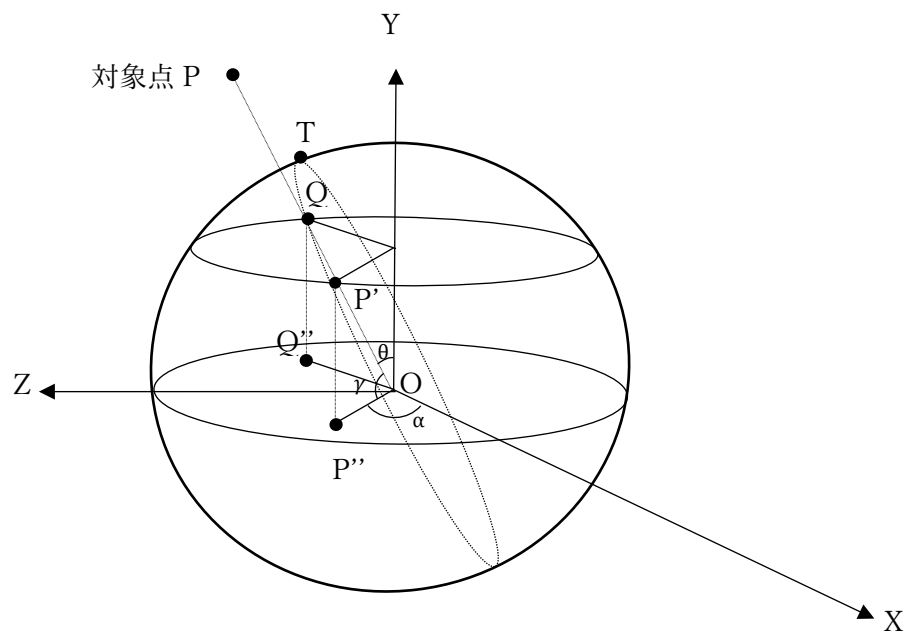


図 3.1 魚眼レンズと対象点の座標関係^[3]

魚眼レンズと対象点の座標関係を図 3.1 に示す．座標の原点はカメラの中心を O ，対象点を P ，魚眼レンズの対象点の光線が入射する点を P' ， P' が魚眼画像に射影される点を P'' とする．また zy 平面から対象な点を Q' ，カメラ中心 O と P' ， Q' を通る平面と魚眼レンズの球面の接点を T とする．そして対象点の光線と Z 軸とのなす角度を θ ，対象点が画像平面へ射影された点と X 軸とのなす角度を α とする． P' と P'' の座標は

$$P' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$P'' = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

で表せる。
よって α は

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{y}{x} \quad (3.3)$$

となる。 θ は対象点が魚眼レンズからどの角度で入射しているかを表している。魚眼レンズは等距離射影方式であるので画像平面最大 pixel を L とすると θ は

$$\theta = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (3.4)$$

で求められる。

次に2つの魚眼レンズを用いた距離測定の手法について述べる。平行に並べた2つの魚眼レンズと対象物の関係を図3.2に示す。

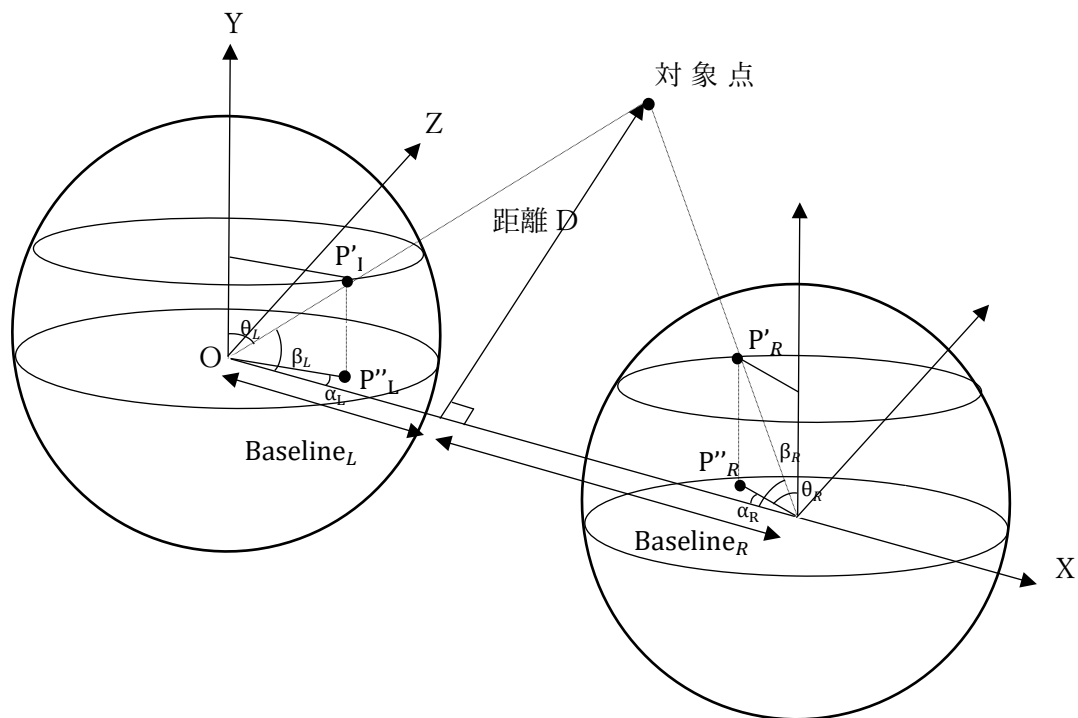


図 3.2 2台の魚眼レンズと対象点の関係^[3]

カメラ間の距離である基線長と視差から三角形の相似関係で基線長から対象物までの距離を測定するために基線長と対象点 P でなす三角形を考える必要がある。基線長は図 3.1 で X 軸としている。対象点 P の 3次元座標を導くためには、基線長からの距離 D を求める必要がある。まず距離 D を求めるために必要な光線がなす角 β_L , β_R を計算する。 $\cos \beta_L$, $\cos \beta_R$ はそれぞれ P'_L と P'_R の x 座標を表しているため β_L , β_R は、

$$\beta_L = \cos^{-1}(\cos \alpha_L \sin \theta_L) \quad (3.5)$$

$$\beta_R = \cos^{-1}(\cos \alpha_R \sin \theta_R) \quad (3.6)$$

で求めることができる。

また β_L と β_R を用いれば Baseline_L と Baseline_R はそれぞれ

$$\text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (3.7)$$

$$\text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (3.8)$$

と計算することができる。

$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R$ は基線長を表しているので、

$$\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R = \frac{D}{\tan \beta_L} + \frac{D}{\tan \beta_R} \quad (3.9)$$

$$D = \frac{\text{Baseline}_L + \text{Baseline}_R}{\left(\frac{1}{\tan \beta_L} + \frac{1}{\tan \beta_R}\right)} \quad (3.10)$$

となり、距離 D を求めることができる。

次に対象点 P の 3次元座標 (x, y, z) を求める。座標を求めるうえで、原点を左のカメラの中心としている。そのため P の x 座標は Baseline_L になる。

したがって

$$x = \text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (3.11)$$

と表せる。

次に奥行 z を求める。 z を求めるためにはカメラから対象点を見上げる角度 γ を導く必要がある。 γ が求まれば z 座標は

$$z = D \cos(\gamma) \quad (3.12)$$

で導くことができる。

図 3.1 より T は Z 軸上にある点であり Z 軸から点 T を見上げる角度は γ に等しくなる。

図 3.1 に示されている魚眼レンズの球の半径を r とすると魚眼レンズの中心から点 T までの距離は r なので、点 T の Z 座標は

$$z_T = r \cos(\gamma) \quad (3.13)$$

となる。

よって z_T が求まれば γ は

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{z_T}{r} \quad (3.14)$$

と算出することができる。

したがってまず点 T の座標を求める。 Q' は P' と zy 平面で対象であるので

$$Q' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

である。中心 O と P' , Q' を通る平面と魚眼レンズの球面の方程式を

$$ax + by + cz = 0 \quad (3.16)$$

とおくと定数 a , b , c , は点 P' と点 Q' の外積で求まる。
よって

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} &= P' \times Q' = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \alpha \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \alpha \cos \theta - \sin \alpha \cos \theta \cos \theta \\ -\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \theta \sin \alpha \cos \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \cos \theta + \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ -2\sin \alpha \cos \theta \cos \alpha \sin \theta \\ 2\cos \alpha \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

と算出することができる。

$a = 0$ であるので中心 O と P' , Q' を通る平面は zy 平面上のあることがわかる。
魚眼レンズの球面は中心 O 半径 r の球なので

$$x + y + z = r^2 \quad (3.18)$$

である。よって両者の交点の座標 $T(x_T, y_T, z_T)$ はまず zy 平面上の点なので $x_T = 0$ 。
式(3.16)と式(3.18)から

$$z_T = r \frac{|b|}{\sqrt{b^2 + c^2}} \quad (3.19)$$

$$y_T = \pm \sqrt{r^2 - z_T^2} \quad (3.20)$$

式(3.19)で z_T が算出されるので式()により γ が決まる。よって対象点 P の z 座標が式
(3.12)から算出される。これで対象点 P の x 座標と z 座標が既知となったので y 座標は

$$y = \pm \sqrt{z^2 - x^2} \quad (3.21)$$

で導くことができる。

以上より、対象点 P の (x, y, z) 座標は

$$x = \text{Baseline}_L = \frac{D}{\tan \beta_L} \quad (3.22)$$

$$y = \pm\sqrt{z^2 - x^2} \quad (3.23)$$

$$z = D\cos(\cos^{-1}(\frac{|b|}{\sqrt{b^2 + c^2}})) \quad (3.24)$$

で導くことができる.

3.3 むすび

本章では, 本研究で用いる全天球カメラ2台を利用し導出したテニスボールの3次元座標を推定する手法について述べた. 第4章では, その手法をもとにテニスボールの軌道を導出し, その結果に対しての考察を述べる.

第4章 実験結果と考察

4.1 はじめに

本章では第3章で説明した手法をもとに行った実験の結果と考察について述べる。

4.2 実験の概要

撮影は浮間公園の人工芝テニスコートを利用して行った。全天球カメラをネットに直接取り付けることはできないので三脚に全天球カメラを設置し撮影した。カメラの設置は手作業で行ったが、各カメラが可能な限り同一方向を向くように配置した。各実験におけるボールの始点と終点の位置をまとめたのを図4.1に示す。図4.1において点Aがテニスボールを打った位置を示し、点B1、点B2、点B3がテニスボールがネットを超え相手コートにバウンドした位置を示す。また黄色の直線がテニスボールの軌道を示す。

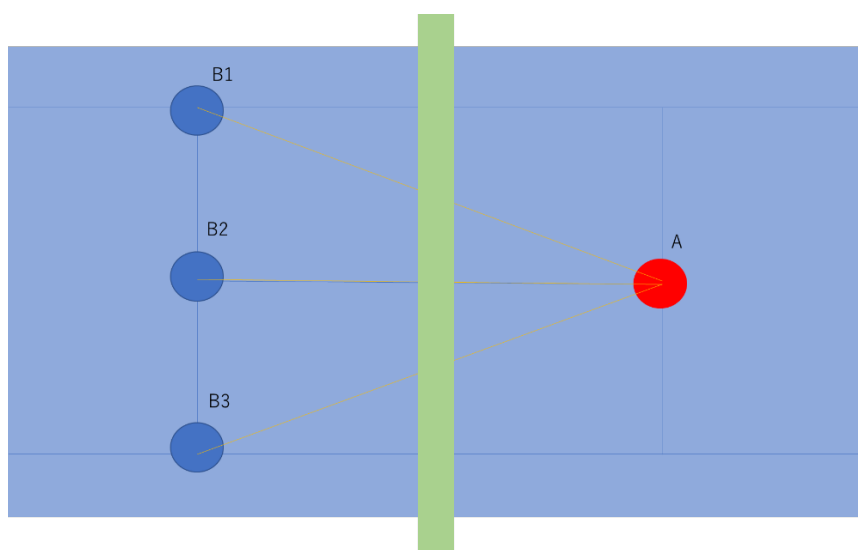


図 4.1 各実験におけるテニスボールの始点と終点の関係

各実験において2つの全天球カメラが取得した動画をそれぞれ静止面に分割する。静止面に表示されるテニスボールの座標を特徴点とする。2枚の静止面における特徴点を選択する。選択した特徴点と2つの全天球カメラを結び、形成される三角形をもとにテニスボールの3次元座標を導出する。導いた3次元座標を3次元空間上にプロットすることにより、テニスボールの軌道を得ることが可能になる。

4.3 実験1の概要

実験1では、被験者がサービスラインの中央となる点 A から相手コートのサービスラインとダブルスアレーが交わる点 B1 に向けてテニスボールを打ちその軌道を導いた。

4.3.1 実験1の結果

表 4.1 に始点からネットまでのテニスボールの 3 次元座標, 表 4.2 にネットから終点までのテニスボールの 3 次元座標, 表 4.3 に始点と終点の実測値と実行値を示す。実測値は実際に打球を打ち他方のコートにバウンドした瞬間のテニスボールの座標を実際に測った値, 実行値が本研究において提案している手法を用いて求めた値である。また図 4.2 にテニスボールの軌道を俯瞰した図, 図 4.3 にテニスボールの軌道を真横から見た図を示す。

表 4.1 始点からネットまでのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
1	746.525	679.174	-63.016	672.567
2	769.362	660.179	-23.513	679.586
3	773.135	647.301	-13.2	647.435
4	781.295	607.674	-9.718	607.751
5	795.949	574.32	22.488	574.76
6	793.747	519.167	43.484	520.984
7	795.867	484.133	57.996	487.594
8	817.261	433.402	69.759	438.98
9	825.745	390.548	80.92	398.843
10	806.406	346.46	89.345	357.794
11	831.818	350.946	91.904	362.78
12	836.08	311.558	93.779	325.366
13	840.852	267.138	98.572	284.743
14	836.221	244.726	117.61	271.52
15	867.696	193.357	119.997	227.565
16	884.198	154.914	118.18	194.845
17	876.293	156.486	126.094	200.966
18	889.016	120.002	124.081	172.617
19	935.702	76.723	129.858	150.829
20	994.584	42.338	137.692	144.054
21	1212.705	3.969	167.738	167.785

表 4.2 ネットから終点までのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
22	1216.078	-3.98	164.151	164.199
23	497.7	-17.924	67.225	69.573
24	754.907	-56.927	94.631	110.434
25	798.592	-89.224	97.775	132.366
26	824.945	-125.129	95.988	157.705
27	851.98	-157.905	91.072	182.285
28	855.541	-190.648	86.33	209.283
29	869.237	-187.737	87.586	207.163
30	871.562	-218.315	76.633	231.374
31	877.79	-253.776	65.898	262.192
32	894.285	-284.114	58.418	290.057
33	905.118	-313.867	47.063	317.376
34	913.079	-343.659	35.135	345.45
35	914.793	-344.304	35.201	346.098
36	921.955	-374.836	19.544	375.345
37	926.816	-405.398	-3.31	405.411
38	937.124	-432.02	-20.264	432.495
39	948.523	-456.239	-27.562	457.07
40	955.151	-482.743	-35.035	484.012
41	954.9	-486.546	-38.595	488.074
42	964.315	-511.387	-57.204	514.576
43	972.656	-536.381	-76.454	541.802
44	981.696	-562.507	-92.772	570.106
45	981.696	-592.507	-122.772	570.106

表 4.3 実測値及び実行値

実測値		x	y	z
	始点	639.9	640	#
	ネット	#	0	#
	終点	1188.4	-630	-140
実行値		x	y	z
	始点	746.525	679.179	-63.016
	ネット	1216.078	-3.98	164.151
	終点	991.696	-592.507	-122.772
誤差		x	y	z
	始点	16.663%	6.122%	#VALUE!
	ネット	#VALUE!	#DIV/0!	#VALUE!
	終点	16.552%	5.951%	12.306%

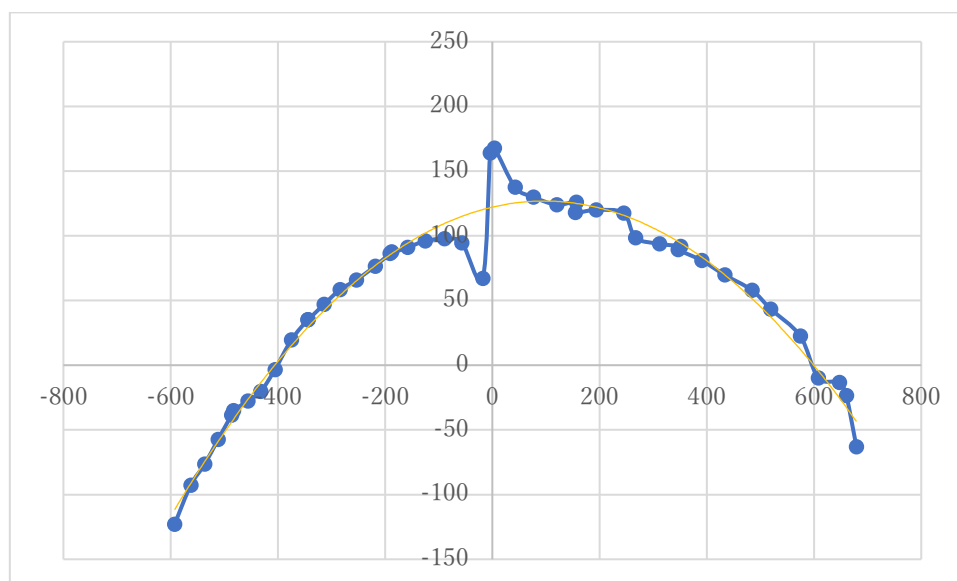


図 4.2 テニスボールの軌道を真横から見た図

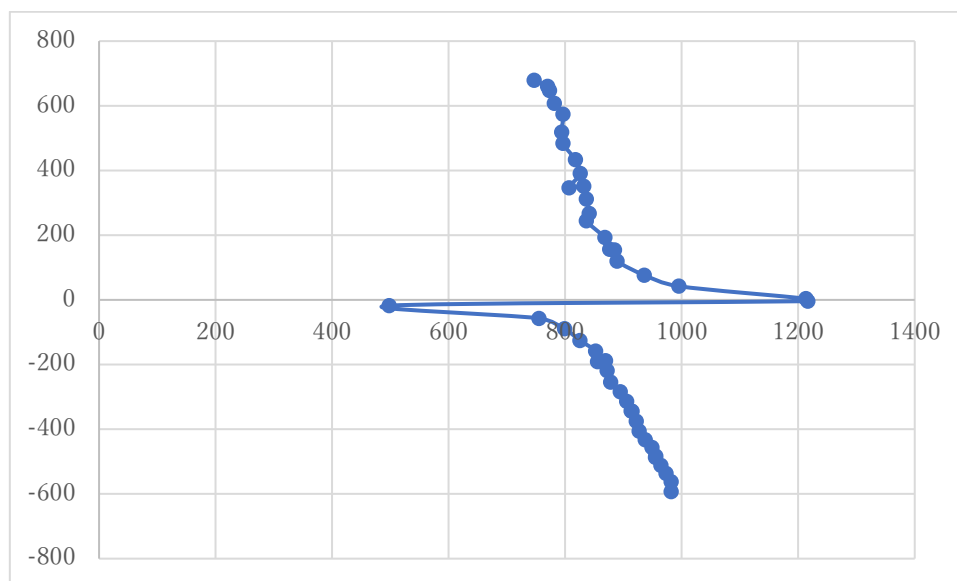


図 4.3 テニスボールの軌道を俯瞰した図

4.3.2 実験1の考察

実験1では始点である点Aをサービスラインの中央とし、相手コートのサービスラインとダブルスアレーが交わる点をB1とし、2点間の軌道を推定した。

表4.3は始点Aと終点B1におけるテニスボールの3次元座標の実測値、実行値、およびその誤差を示している。表4.3より始点における座標の水平距離の誤差が6%、奥行距離の誤差が14%程度という結果が得られた。垂直距離の誤差はラケットがテニスボールに当たったインパクトの瞬間としているため高さが導出できず測定不能であった。また終点における座標の水平距離の誤差が6%、奥行距離の誤差が16%、垂直距離の誤差が12%という結果が得られた。終点における平均誤差は11%程度であり、簡易的な軌道推定方式として利用できると考えられる。

図4.2はテニスボールの軌道を真横から見た図を示している。図4.2より始点から終点までテニスボールの軌道が描けていることがわかる。しかし、ネット付近においてテニスボールのz座標が上下に大きく乱れていることがわかる。この原因として、本研究で用いた手法は二つのカメラと対象点を繋ぎ、三角測量により3次元座標を導出しているため、三角形の形成が困難なネット付近で値が上下に大きく乱れてしまうと考えられる。

図4.3はテニスボールの軌道を俯瞰した図を示している。図4.3より、ネット付近においてテニスボールの座標が左右に変化していることが確認できる。この理由も同様に本研究で用いた手法が原因により値が乱れてしまうと考えられる。またテニスボールがネットを超える前と超えた後のそれぞれの座標群を結んだ直線の切片が異なる理由として、本研究で用いたTheta Sの構造的問題が挙げられる。第2章で述べたように、Theta Sは前後の魚眼レンズから取得した2枚の画像をつなぎ合わせる繋ぎ画像処理において^[2]、パターマッ

グ処理によりエリア毎に基準画像と比較画像のずれ量を算出し、繋ぎ位置を検出している。そして繋ぎ位置と各光学系のレンズ特性を考慮して、2枚の画像を全天球イメージ形式に変換し、ブレンドさせることで最終的に1枚の全天球画像が生成している。ただし、生成された2枚の全天球画像はブレンドさせる際に一定以上のエリアが重複した状態で繋ぎ合わせられ1枚の全天球画像が形成されている。したがって、重複しているエリアが座標のずれとして影響し、ネットを超える前と超えた後で座標群を結んだ直線の切片の傾きが異なってしまうと考えられる。

4.4 実験2の概要

実験2では、被験者がサービスラインの中央となる点 A から相手コートのサービスラインの中央となる点 B2 に向けてテニスボールを打ちその軌道を導いた。

4.4.1 実験2の結果

表 4.4 に始点からネットまでのテニスボールの3次元座標, 表 4.5 にネットから終点までのテニスボールの3次元座標, 表 4.6 に始点と終点の実測値及び実行値を示す。また図 4.4 にテニスボールの軌道を真横から見た図, 図 4.5 にテニスボールの軌道を俯瞰した図を示す。

表 4.4 始点からネットまでのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
1	550.064	595.056	-61.108	598.185
2	549.502	556.742	-38.429	558.067
3	540.095	519.291	-24.528	519.869
4	538.754	488.298	-14.279	488.506
5	534.271	450.296	-4.573	450.319
6	535.829	416.756	6.665	416.809
7	536.584	381.859	19.403	382.351
8	534.512	349.609	27.188	350.664
9	533.411	314.988	38.567	317.339
10	530.706	279.218	41.276	282.252
11	521.25	246.533	47.279	251.025
12	510.701	211.539	48.97	217.133
13	513.98	183.905	48.359	190.157
14	503.573	149.165	51.728	157.879
15	470.712	114.638	55.734	127.468
16	448.501	84.644	47.972	97.292
17	476.388	65.892	48.956	82.088
18	443.319	46.595	48.327	67.13
19	693.388	24.971	66.045	70.608

表 4.5 ネットから終点までのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
20	1224.44	-4.007	96.366	96.449
21	869.692	-51.288	59.966	78.907
22	782.106	-82.203	43.795	93.141
23	722.302	-107.143	33.478	112.251
24	727.518	-142.239	21.839	143.905
25	710.772	-170.641	11.962	171.059
26	701.946	-200.452	-2.389	200.465
27	689.305	-228.967	-16.641	229.571
28	691.171	-257.559	-28.98	259.184
29	691.001	-280.938	-43.99	284.361
30	682.434	-311.902	-63.996	318.4
31	680.643	-335.656	-79.764	345.003
32	681.17	-366.964	-96.716	379.494
33	682.429	-388.067	-113.827	404.416
34	692.453	-418.127	-133.55	438.936

表 4.6 実測値及び実行値

実測値		x	y	z
	始点	639	640	#
	ネット	639	0	#
	終点	639	-490	-140
実行値		x	y	z
	始点	550.064	595.056	-61.108
	ネット	1224.44	-4.007	96.366
	終点	692.453	-418.127	-133.55
誤差		x	y	z
	始点	13.918%	7.022%	#VALUE!
	ネット	91.618%	#DIV/0!	#VALUE!
	終点	8.365%	14.668%	4.607%

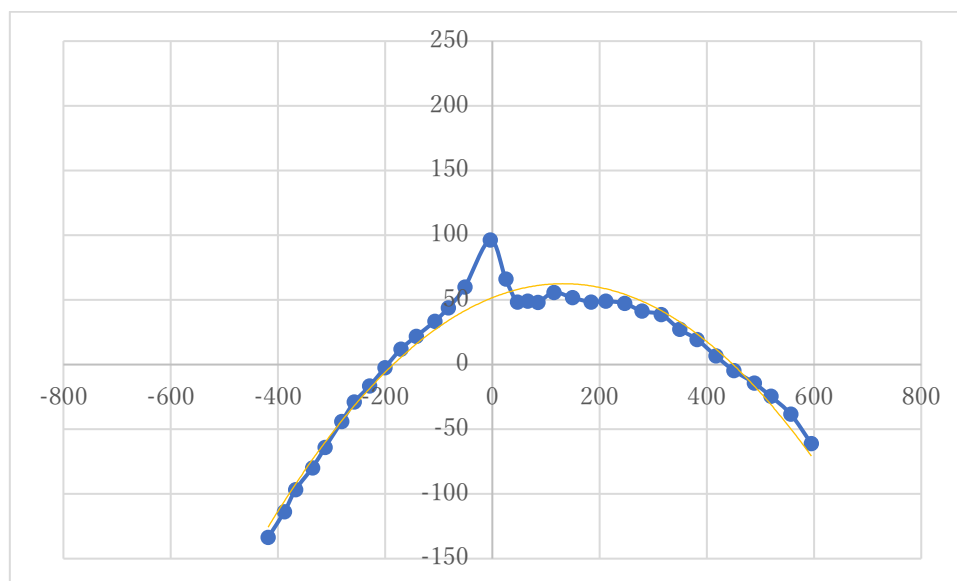


図 4.4 テニスボールの軌道を真横から見た図

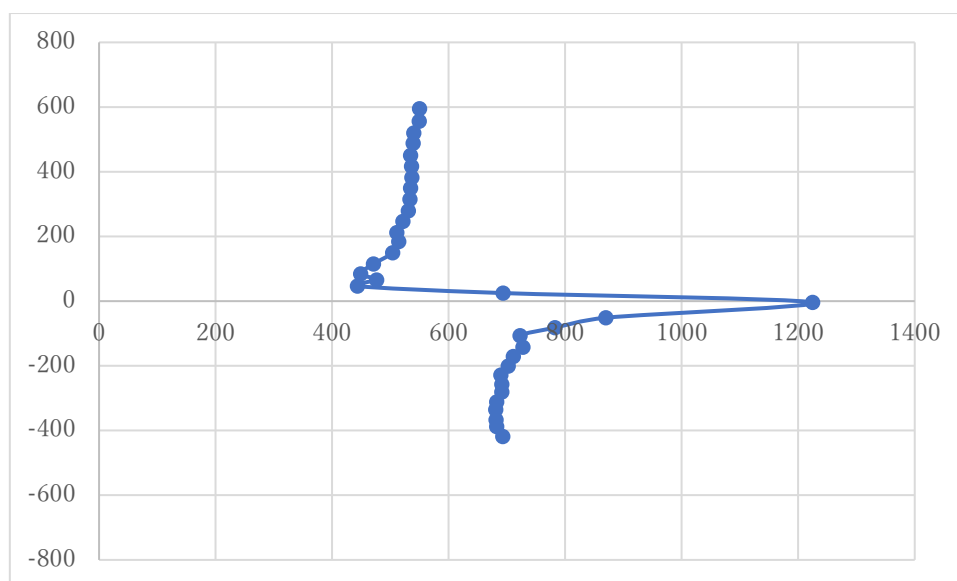


図 4.5 テニスボールの軌道を俯瞰した図

4.4.2 実験2の考察

実験2では、被験者がサービスラインの中央となる点 A から相手コートのサービスラインの中央となる点 B2 に向けてテニスボールを打ち 2 点間の軌道を推定した。

表 4.6 は始点 A と終点 B2 におけるテニスボールの 3 次元座標の実測値、実行値、およびその誤差を示している。表 4.6 より始点における座標の水平距離の誤差が 7%、奥行距離の誤差が 14%程度という結果が得られた。垂直距離の誤差はラケットがテニスボールに当たったインパクトの瞬間としているため高さが導出できず測定不能であった。また終点にお

ける座標の水平距離の誤差が 15%，奥行距離の誤差が 8%，垂直距離の誤差が 5%程度という結果が得られた。終点における平均誤差は 9%程度であり，簡易的な軌道推定方式として利用できると思われる。

図 4.4 はテニスボールの軌道を真横から見た図を示している。図 4.2 と同様にネットの付近で z 座標が上下に大きく乱れていることがわかる。この誤差が生じた理由は実験 1 と同様に本研究で提案した手法によるものだと考えられる。

図 4.5 はテニスボールの軌道を俯瞰した図を示している。図 4.5 より，ネット付近においてテニスボールの座標が左右に大きく変化していることが確認できる。この誤差が生じた原因として実験 1 と同様に本研究で用いた手法によるものだと考えられる。またネットを超える前と超えた後のそれぞれの座標群で形成した直線の切片が異なる理由は実験 1 と同様に本研究で使用した Theta S の構造的問題であると考えられる。

4.5 実験3の概要

実験3では、被験者がサービスラインの中央となる点Aから相手コートのサービスラインの中央となる点B3に向けてテニスボールを打ちその軌道を導いた。

4.5.1 実験3の結果

表4.7に始点からネットまでのテニスボールの3次元座標、表4.8にネットから終点までのテニスボールの3次元座標、表4.9に始点と終点の実測値及び実行値を示す。また図4.6にテニスボールの軌道を真横から見た図、図4.7にテニスボールの軌道を俯瞰した図を示す。

表 4.7 始点からネットまでのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
1	591.438	557.587	-63.972	561.244
2	609.902	507.251	-36.369	508.553
3	562.671	452.601	-18.909	452.996
4	560.199	447.601	-18.777	447.995
5	579.431	435.642	-9.49	435.745
6	529.017	376.474	2.125	376.48
7	526.076	371.794	4.216	371.818
8	503.679	336.548	15.863	336.921
9	528.061	325.978	24.382	326.888
10	455.446	258.992	32.619	261.038
11	428.911	222.089	38.013	225.318
12	422.81	220.687	37.536	223.857
13	366.747	147.71	44.174	154.174
14	355.762	143.286	41.58	149.197
15	302.427	105.983	40.057	113.3
16	359.961	102.792	51.779	115.097
17	342.957	101.589	49.474	112.995
18	204.399	31.688	33.455	46.08
19	328.623	28.028	55.562	62.231
20	1097.633	17.962	184.937	185.807
21	1138.233	14.9	199.438	199.994

表 4.8 ネットから終点までのテニスボールの3次元座標

#	x	y	z	l
22	899.65	-58.966	161.002	171.46
23	675.688	-95.714	117.264	151.367
24	661.414	-95.9	112.59	147.896
25	640	-142.617	108.256	179.05
26	584.493	-181.49	96.935	205.755
27	577.23	-183.385	93.897	206.026
28	500.382	-203.439	76.515	217.352
29	512.64	-254.895	77.28	266.352
30	504.266	-254.861	76.267	266.028
31	479.338	-289.441	60.706	295.738
32	427.237	-308.275	44.935	311.533
33	431.181	-306.849	45.138	310.151
34	439.835	-360.963	33.555	362.52
35	421.627	-392.315	22.628	392.967
36	421.627	-392.315	20.74	392.862
37	387.778	-411.32	7.4	411.387
38	384.545	-456.257	-9.764	456.362
39	374.907	-495.267	-24.406	495.868
40	349.822	-508.994	-40.481	510.601
41	353.16	-563.805	-56.742	566.653
42	339.883	-593.169	-76.381	598.067
43	337.989	-594.365	-78.658	599.547
44	318.838	-610.855	-97.607	618.604
45	312.345	-660.399	-120.612	671.322

表 4.9 実測値及び実行値

実測値		x	y	z
	始点	639	640	#
	ネット	#	0	#
	終点	91.4	-630	-140
実行値		x	y	z
	始点	591.438	557.587	-63.972
	ネット	1138.233	14.9	199.438
	終点	312.345	-660.399	-120.612
誤差		x	y	z
	始点	7.443%	12.877%	#VALUE!
	ネット	#VALUE!	#DIV/0!	#VALUE!
	終点	241.734%	4.825%	13.849%

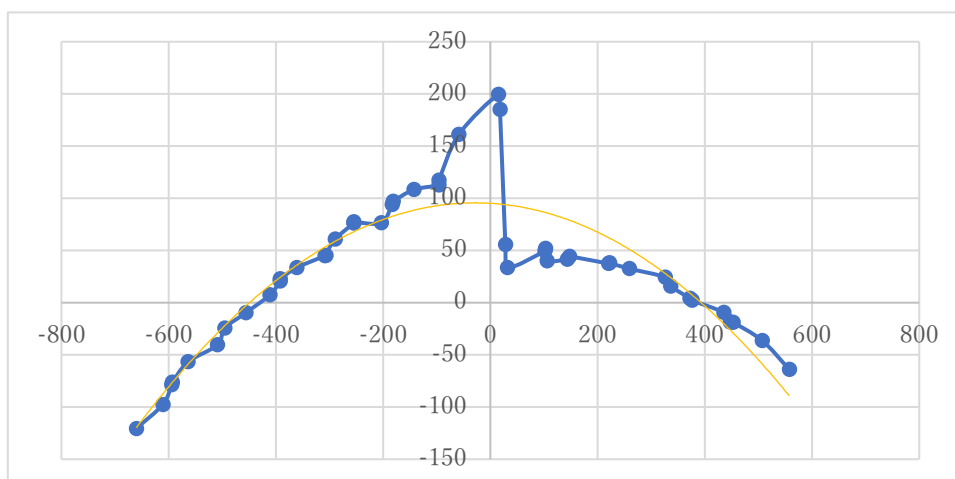


図 4.6 テニスボールの軌道を真横から見た図

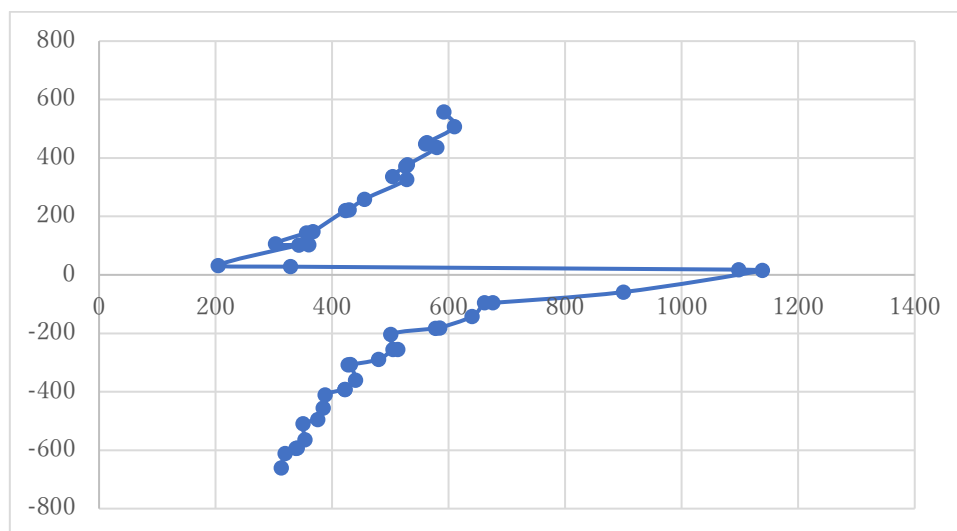


図 4.7 テニスボールの軌道を俯瞰した図

4.5.2 実験3の考察

実験3では、被験者がサーブラインの中央となる点 A から相手コートのサーブラインの中央となる点 B3 に向けてテニスボールを打ち、2点間の軌道を導いた。

表 4.9 は始点 A と終点 B3 におけるテニスボールの 3次元座標の実測値、実行値、およびその誤差を示している。表 4.9 より始点における座標の水平距離の誤差が 13%、奥行距離の誤差が 7%程度という結果が得られた。垂直距離の誤差はラケットがテニスボールに当たったインパクトの瞬間としているため高さが導出できず測定不能であった。また終点における座標の水平距離の誤差が 5%、奥行距離の誤差が 240%、垂直距離の誤差が 14%程度という結果が得られた。終点における奥行距離が大きくなった原因として、Theta S の向きが考えられる。本研究において、Theta S は手動で設置しているため同一方向を向かず、カメラの視線方向のずれが終点における奥行距離に大きく影響してしまったと考えられる。

図 4.6 はテニスボールの軌道を真横から見た図を示している。図 4.2、図 4.4 と同様にネットの付近で z 座標が上下に大きく乱れていることがわかる。この誤差が生じた理由は実験 1、実験 2 と同様に本研究で提案した手法によるものだと考えられる。

図 4.7 はテニスボールの軌道を俯瞰した図を示している。図 4.7 より、ネット付近においてテニスボールの座標が左右に大きく変化していることが確認できる。この誤差が生じた原因として実験 1、実験 2 と同様に本研究で用いた手法によるものだと考えられる。またネットを超える前と超えた後のそれぞれの座標群で形成した直線の切片が異なる理由は実験 1、実験 2 と同様に本研究で使用した Theta S の構造的問題であると考えられる。

4.6 むすび

本章では、テニスボールを打つコースを変え、3種類の実験を行いその結果と考察について述べた。第5章では本研究におけるまとめと今後の課題について述べる。

第5章 結論

5.1 まとめ

本研究では全天球カメラによるテニス軌道推定方式を提案した。ネットの両脇に設置した合計2台の Theta S カメラにより撮影した動画をもとに、三角測量の原理を用いたステレオ距離測定を用いることでテニスボールの3次元座標を導出することを可能とした。そして導いた3次元座標を3次元空間上にプロットすることでテニスボールの軌道推定を実現した。今回の手法により導かれた実験結果を踏まえて、テニスボールの簡易な軌道推定には利用できると考えられる。

5.2 今後の課題

本研究で用いた手法が三角測量の原理を用いたステレオ距離測定方式であるため、ネット付近で2台のカメラと対象物を結んだ三角形が形成困難になり座標の値に大きな誤差が生じてしまった。また、Theta S の構造的問題により前後の魚眼レンズで撮影したテニスボールの奥行距離において誤差が生じてしまった。

したがって、今後の課題としてネット付近また Theta S の構造的問題により生じる誤差の修正など精度向上を図る。また、実現性をより向上させるためにキャリブレーションを施すことでカメラの初期位置を自由に設定できるようにする。

謝辞

本研究の実験環境を与えてくださり、研究の方向性等の丁寧かつ熱心なご指導をして頂いた渡辺教授に心から感謝いたします。

本研究のきっかけを与えてくださり、様々なご提案を頂きました早稲田大学国際情報通信センターの石川孝明様に心から感謝いたします。

日頃からご意見やアドバイスをくださった研究室の皆様にお礼申し上げます。

最後にここまで私を育ててくださった家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] Time & Space (平成 31 年(2019 年)1 月現在),
<https://time-space.kddi.com/digicul-column/world/20150526/>
- [2] HAWK EYE TENNIS(平成 31 年(2019 年)1 月現在),
<https://www.hawkeyeinnovations.com/sports/tennis>
- [3] 全天球カメラ(平成 31 年(2019 年)1 月現在),
https://jp.ricoh.com/technology/tech/065_theta.html/
- [4] 青木貴大: “全天球カメラを用いたステレオ距離測定”, 早稲田大学基幹理工学部情報通信学科卒業論文, Feb.2018

図一覧

図 2.1 全天球画像における画像処理の流れ.....	3
図 2.2 Theta S で撮影した Sphere 形式の全天球画像.....	4
図 2.3 Theta S で撮影した Equirectangular 形式の全天球画像.....	5
図 3.1 魚眼レンズと対象点の座標関係 ^[3]	6
図 3.2 2台の魚眼レンズと対象点の関係 ^[3]	8
図 4.1 各実験におけるテニスボールの始点と終点の関係.....	12
図 4.2 テニスボールの軌道を真横から見た図.....	16
図 4.3 テニスボールの軌道を俯瞰した図.....	17
図 4.4 テニスボールの軌道を真横から見た図.....	22
図 4.5 テニスボールの軌道を俯瞰した図.....	22
図 4.6 テニスボールの軌道を真横から見た図.....	27
図 4.7 テニスボールの軌道を俯瞰した図.....	28

表一覧

表 4.1	始点からネットまでのテニスボールの 3 次元座標	14
表 4.2	ネットから終点までのテニスボールの 3 次元座標	15
表 4.3	実測値及び実行値	16
表 4.4	始点からネットまでのテニスボールの 3 次元座標	20
表 4.5	ネットから終点までのテニスボールの 3 次元座標	21
表 4.6	実測値及び実行値	21
表 4.7	始点からネットまでのテニスボールの 3 次元座標	25
表 4.8	ネットから終点までのテニスボールの 3 次元座標	26
表 4.9	実測値及び実行値	27