

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11482

研究課題名（和文）卓球戦術要素のリアルタイム3次元計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of a real-time 3D measurement system for table tennis tactical elements

研究代表者

伊藤 建一（ITO, Kenichi）

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：10288251

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、卓球の戦術要素の定量化について包括的に技術的課題を解決し、デプスカメラを用いた卓球戦術要素のリアルタイム測定・分析システムの実用化技術を構築することである。研究期間内で、卓球ボールの運動パラメータ（運動初期の並進速度及び回転方向・回転速度）の推定手法、選手の3次元位置・移動の推定手法、3次元軌跡の自動計測手法を開発した。さらに、数値流体解析（CFD）を用いて運動パラメータの推定に必要な卓球ボールの空力係数を算出した。本研究では、リアルタイム測定・分析システムの開発に至らなかったものの、上記のように、各種実用化技術を構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

卓球競技においては、打球コースやボールの速度・回転数、そして自分自身や相手選手の位置や動きは重要な戦術要素としてあげられ、これらの要素を定量的に計測し分析することが試合を勝利するために重要となってきた。本研究では、これら卓球の戦術要素をリアルタイム測定・分析するための各種実用化技術を構築した。リアルタイム測定・分析システムが出来上がれば、試合中の戦術分析・立案だけでなく、分析結果をトレーニング内容に反映させ、選手の能力向上に資することができるようになる、また、卓球競技の魅力伝える情報をテレビ中継などに取り入れ、卓球競技の普及発展につなげることが大いに期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to comprehensively solve technical problems in the quantification of table tennis tactical elements and to develop a practical technology for a real-time measurement and analysis system of table tennis tactical elements using a depth camera. During the research period, we developed a method for estimating the kinematic parameters of a table tennis ball (translational velocity and rotational direction and velocity in the initial phase of motion), a method for estimating the 3D position and movement of a player, and a method for automatically measuring the 3D trajectory of the ball. Furthermore, the aerodynamic coefficients of the table tennis ball necessary for estimating the kinematic parameters were calculated using Computational Fluid Dynamics (CFD). Although this research did not result in the development of a real-time measurement and analysis system, we were able to establish various practical technologies as described above.

研究分野：情報通信工学

キーワード：卓球 3次元計測 戦術 デプスカメラ

1. 研究開始当初の背景

卓球ボールは半径 **2cm** と小さく、質量 **2.7g** と軽量である。従って、重力の影響が小さく、ボールに働く空気力（抗力と揚力）の影響によって飛翔軌道が大きく変化するという特徴がある。また、ボールとラケットラバーとの摩擦が大きいため、ボールに回転を掛けやすく、上手な選手ほど多彩な飛翔軌道を生成でき、大きく勝敗に影響する。卓球競技においては、ボールの軌道と回転数は重要な測定項目となる。また、卓球の戦術として、相手が返球しづらいコースや相手から攻撃されにくいコースに打球する必要があり、そのためには自分自身や相手選手の位置や動きが重要な決定要素となる。このように、卓球の戦術の要素はボールの回転、スピード、選手位置を考慮したコースなどが重要項目としてあげられ、これらの要素を試合の中で定量的に把握することが試合を勝利するために重要となる。本研究では、これら卓球の戦術要素をリアルタイム測定・分析できるシステムを開発したいと考えている。この手法が出来上がれば、戦術分析結果をトレーニング内容に反映させ、選手の能力向上に資することができるだけでなく、卓球競技の魅力伝える情報をテレビ中継などに取り入れ、卓球競技の普及発展につなげることが大いに期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、卓球の戦術要素（ボールの回転、スピード、選手位置等）の定量化について包括的に技術的課題を解決し、デプスカメラを用いた卓球戦術要素のリアルタイム測定・分析システムの実用化技術を構築することである。実施する研究項目は、卓球ボールの運動パラメータ（運動初期の並進速度及び回転方向・回転速度）の推定手法の開発、選手の **3** 次元位置・移動の推定手法の開発、**3** 次元軌跡の自動計測手法の開発、そして、運動パラメータの推定に必要な数値流体解析（**CFD**）を用いた卓球ボールの空力係数の算出である。

3. 研究の方法

(1) 卓球ボールの運動パラメータの推定

デプスカメラで計測した卓球ボールの **3** 次元軌跡から運動パラメータ（運動初期の並進速度及び回転方向・回転速度）を推定する。運動パラメータの推定値は、計測された **3** 次元軌跡と運動モデルから生成した **3** 次元軌跡の平均二乗誤差を目的関数とし、これを最小化する運動モデルの初期並進速度と初期回転方向・速度とした。探索にはメタヒューリスティックな最適化法を用いた。

(2) 選手の **3** 次元位置・移動の推定

本研究では、ボールの軌跡に加えて、デプスカメラを用いて選手の移動軌跡を定量化できるか検証した。選手の **3** 次元位置・移動の推定では、まず、デプスカメラで撮影した選手同士の卓球ストロークラリー中の動画から、深層学習技術を用いた姿勢推定手法を用いて、**2** 次元の選手位置・移動を推定した。次に、画像データとデプスデータの対応関係を用いて、上記で推定した選手の位置・姿勢に対応する画素のデプスデータを求め、選手の **3** 次元の位置・移動を推定した。

(3) **3** 次元軌跡の自動計測

デプスカメラで撮影した選手ストロークのデプス画像データから、物体検出技術を用いて卓球ボールを自動で抽出し、**3** 次元軌跡を自動計測した。

(4) 数値流体解析（**CFD**）を用いた空力係数の算出

CFD 解析を用いて運動パラメータの推定に必要な空力係数を算出した。**CFD** 解析では風洞実験を模した条件でシミュレーションを行った。風洞内に卓球ボールを固定し、一定の回転速度でスピンさせ、風洞の流入口からある一定の並進速度の空気を流入させた。卓球競技の実際のボール並進速度・回転数を考慮した並進速度と回転速度の各組み合わせの空力係数（抗力係数、揚力係数（**Magnus** 係数）、流体トルク係数）を算出した。

4. 研究成果

(1) 卓球ボールの運動パラメータの推定

卓球ボールは射出機から打ち出した。撮影にはデプスカメラ（**RealSense Depth Camera D455: Intel** 社製）を用いた。解像度は 840×480 pixel、フレームレートは **60fps** とした。打球パターンは、上回転、右回転、右上回転とした。図 **1** 左側にデプスカメラで計測した上回転パターンの計測軌跡を示す。この軌跡データは、各フレームのデプスデータからボール領域を差分処理で半自動で抽出し、その重心位置を連続的に算出することによって求めたものである。軌跡データの運動パラメータは、粒子群最適化法を用いて推定した。推定は **5** 回行った。表 **1** に上回転パターンの運動パラメータ探索結果を示す。上回転の運動パラメータの推定では、**5** 回とも同じような推定値に収束し、メインの運動パラメータである z 軸方向の並進速度と x 軸周りの回転角速度の平均値は、それぞれ真値相当値の 108 [%] と 96 [%] と比較的高い推定精度を示した。右

回転と右上回転の運動パラメータも同様に高い精度で推定されていた。図 1 右側に運動パラメータを用いて生成された推定生成軌跡を示す。図 1 右側に示すように、生成軌跡は計測軌跡をなめらかに再現できていることが確認できる。

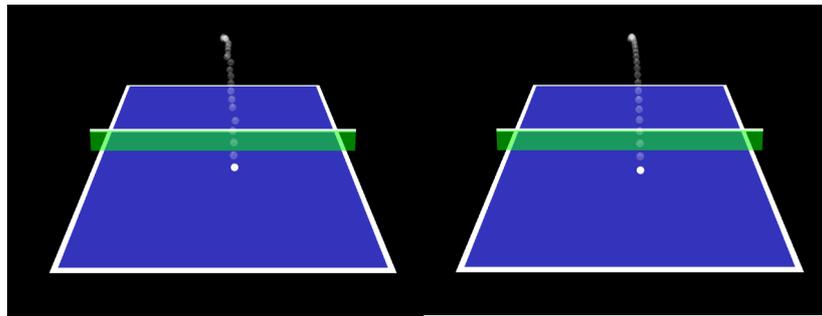


図 1 計測軌跡（左）と推定生成軌跡（右）

表1 上回転の運動パラメータの評価関数値，推定値，探索時間

	評価関数値	x軸方向	y軸方向	z軸方向	x軸周り	y軸周り	z軸周り	探索時間
1	5.5×10^{-5}	0.28	2.54	6.80	373.9	-55.7	-62.6	16.1
2	5.6×10^{-5}	0.28	2.55	6.80	380.0	-44.1	1.1	19.0
3	5.5×10^{-5}	0.28	2.54	6.80	374.9	-50.7	-50.7	21.0
4	5.3×10^{-5}	0.30	2.54	6.80	375.7	-46.7	-46.7	17.4
5	5.5×10^{-5}	0.26	2.54	6.80	374.7	-40.3	-40.3	17.3
平均	5.5×10^{-5}	0.28	2.54	6.80	375.8	-47.5	-39.8	18.2

評価関数値単位：m² 並進速度単位：m/s 回転速度単位：rad/s 探索時間単位：s

(2) 選手の3次元位置・移動の推定

卓球台の左右に選手を配置し、動きを交えながらラリーをしてもらった。配球パターン例を図 2 に示す。デプスカメラは卓球ボール撮影用カメラ 1 台 (D455) と右側の選手撮影用カメラ 1 台 (D455) とした。デプスカメラの解像度は 848×480pixel，フレームレートは 60fps とした。卓球ボールの軌跡は研究項目(1)と同じ手法で求めた。選手の軌跡推定には OpenPose を用いた。実行例を図 3 左側に示す。OpenPose では入力された動画像に対し、人の各関節点の 2次元画像座標を推定する。この 2次元画像座標に対応するデプス画像 (図 3 右側) を用いて 3次元座標に変換した。選手の移動軌跡は中腰部分の座標を用いてグラフ化を行った。図 4 に各配球パターンにおける卓球ボールと選手の移動軌跡を示す。図中の番号は打った順番を示し、赤や青で丸を塗り潰しているほうを打球している側である。図 4 に示すように、卓球ボールと選手の移動軌跡はおおよそ復元できていた。

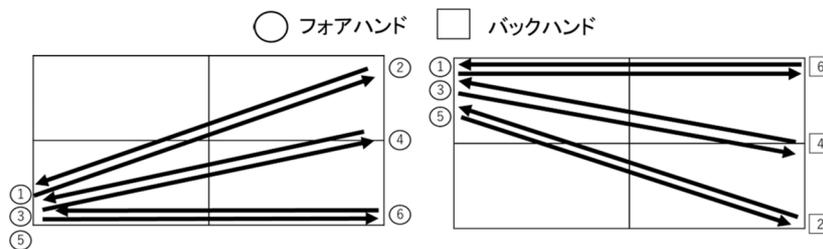


図 2 配球パターン

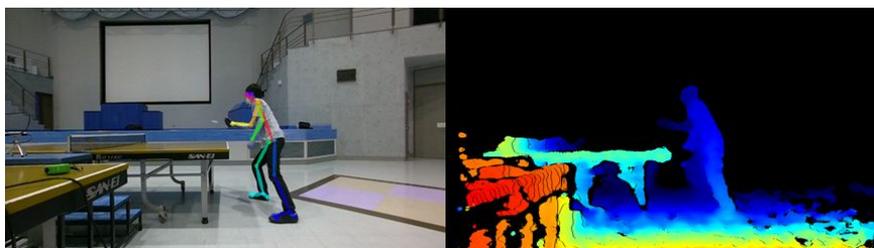


図 3 OpenPose の実行例とデプス画像

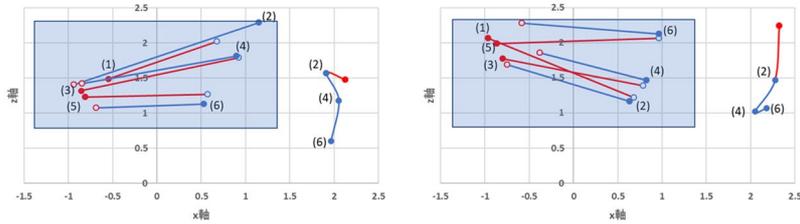


図4 各配球パターンにおける卓球ボールと選手の移動軌跡

(3) 3次元軌跡の自動計測

卓球台の左側に配置された射出機から卓球ボールを打ち出し、反対側の選手に返球してもらった。撮影にはデブスカメラ1台(D455)を用いた。解像度は840×480pixel、フレームレートは60fpsとした。卓球ボールの検出にはYOLOXを用いた。本研究では、選手と卓球ボールの2種類のクラスをアノテーションし、データセットを作成した。データセットの画像の枚数は、学習用100枚と検証用50枚の合計150枚である。作成した物体検出モデルで卓球ボールを自動で検出し軌跡を復元した。図5に選手と卓球ボールの検出例を示す。図6にYOLOXを用いて自動的に復元したボールの軌跡例を示す。赤いグラフは左側の射出機から射出されたボール軌跡であり、青いグラフは右側の選手が返球したボール軌跡である。図6に示すように、選手と卓球ボールが近い位置にあってもボールの誤検出が殆ど起こらず、卓球ボールの軌跡が自動で復元可能であった。

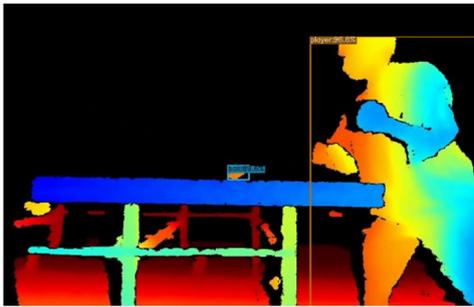


図5 選手と卓球ボールの検出例

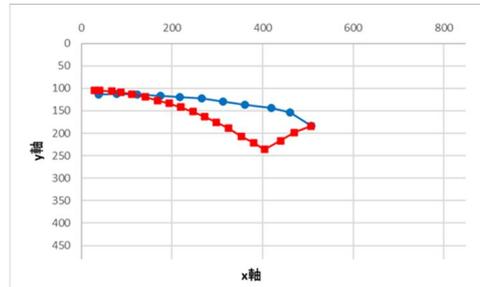


図6 YOLOXで復元したボール軌跡例

(4) 数値流体解析(CFD)を用いた空力係数の算出

図7にCFD解析モデルを示す。風洞の流入口からx軸方向に並進速度 V_x [m/s]の空気を流入させる。風洞の大きさは $L_{x1} = -0.15$ m, $L_{x2} = 0.5$ m, $r_{yz} = 0.2$ m, ボールの固定位置は $x_b = 0$ m, $y_b = 0$ m, $z_b = 0$ m, ボールの半径は $a = 0.02$ mとした。乱流モデルはDynamic Smagorinsky-Lilly LESモデルを用いた。卓球ボール周りの境界層は、壁面第1層の高さ0.01 mm, ストレッチ1.1, 層数40, 面に沿った方向の代表長さ0.25 mmの条件でメッシュ化した。時間刻みは5 μ sとした。質量-圧力カップリングにはSIMPLE法を用いた。本研究のシミュレーションでは、卓球ボールの並進速度 $V_x = 2.5 \sim 20$ m/s, 回転速度 $\omega_y = 94.2 \sim 565.5$ rad/s (15~90 rps)の範囲を対象とした。図8に抗力係数 C_D と揚力係数 C_L レイノルズ数とスピンパラメータ依存性を示す。両係数に関する定性的な傾向(スピンパラメータの増加に伴った変動傾向(増加→減少→増加))は風洞実験結果や飛翔実験結果と一致していた。

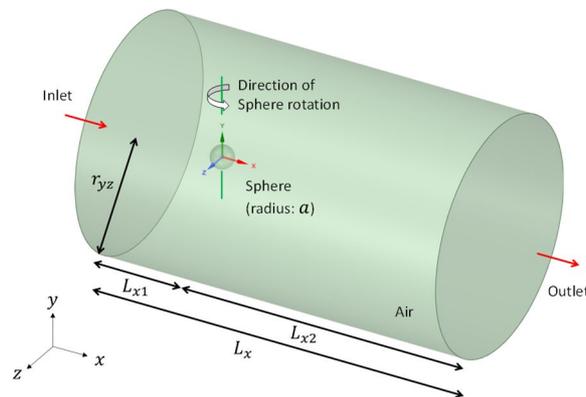


図7 CFD解析モデル

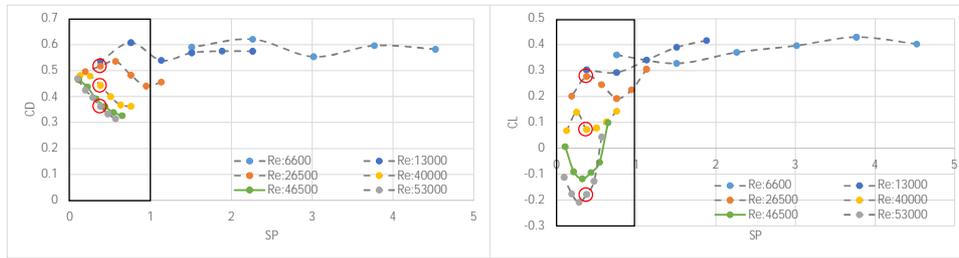


図 8 抗力係数 C_D と揚力係数 C_L のレイノルズ数とスピンパラメータ依存性

以上のように、デプスカメラを用いた卓球戦術要素のリアルタイム測定・分析システムの実用化技術に関する各種成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 伊藤 建一、上島 慶	4. 巻 15
2. 論文標題 デブスカメラを用いた卓球ボールの3次元飛翔軌跡計測と並進速度・回転角速度の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 64～75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11308/tjsst.15.64	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 伊藤 建一、上島 慶	4. 巻 28
2. 論文標題 回転する卓球ボールの空力特性の数値流体解析：負のマグナス効果の検証	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 新潟工科大学研究紀要	6. 最初と最後の頁 1～4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 伊藤建一, 上島慶	4. 巻 14(1)
2. 論文標題 CFD解析で算出した空力係数による卓球ボールの3次元飛翔軌道シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 36-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11308/tjsst.14.36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩目地博, 川久保峻, 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 YOLOXによる卓球試合映像の物体検出とボールの軌道復元
3. 学会等名 2023年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小原優駿, 川久保峻, 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 デブスカメラを用いた卓球ボールと選手の軌跡推定
3. 学会等名 2023年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀田優樹, 横田棕飛, 川久保峻, 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 デブスカメラを用いた卓球ボールの軌道の推定
3. 学会等名 2022年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 卓球ボールの3次元飛翔運動の並進速度・回転角速度の推定
3. 学会等名 日本シミュレーション学会令和4年度第1回多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 デブスカメラを用いた卓球ボールの3次元飛翔軌跡計測と並進速度・回転角速度の推定
3. 学会等名 日本シミュレーション学会令和4年度第2回多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤建一, 上島慶
2. 発表標題 CFD解析で算出した空力係数による卓球ボールの3次元飛翔軌道シミュレーション
3. 学会等名 日本シミュレーション学会令和3年度第2 回多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	上島 慶 (KAMIJIMA Kei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------