

ボールのバウンド位置予測に基づく ダイナミックプロジェクションマッピングの開発

Development of Dynamic Projection Mapping based on Ball Bounce Position Prediction

栃岡 陽麻里¹⁾, 末石 智大¹⁾, 石川 正俊²⁾

Himari TOCHIOKA, Tomohiro SUEISHI, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, tochioka@ishikawa-vision.org)

2) 東京理科大学 (〒 125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, ishikawa@ishikawa-vision.org)

概要: Visual aids for ball trajectory are useful to facilitate motor learning in ball sports, but ordinary video equipment has a problem of latency from measurement to presentation. We propose a dynamic projection mapping system that uses high-speed vision and high-speed cameras to present predictive information in real-time based on motion prediction. In this study, the predicted bounce position of a ball was presented on the ground in real-time using motion prediction and evaluated at two frame rates.

キーワード: 高速カメラ, 高速プロジェクタ, ダイナミックプロジェクションマッピング

1. はじめに

近年, カメラや慣性センサの発展に伴い, マルチモーダルなど五感を用いたフィードバックシステムが運動学習を目的として多数研究されている [1]. テニスでは, 高速運動する球を扱う高精度な動作スキルが瞬時に求められるため, 球を打つ前の準備動作から打つまでの一連の動作を効率的に習得することができる視覚フィードバックシステムが運動学習に有効であると考えられる.

一方で, 視覚フィードバックにおける 10[ms] 以下のわずかな遅延でもタスクパフォーマンスに悪影響を与えることが報告されており [2], 遅延を極小化する方法が必要である. 視覚フィードバックシステムの呈示手法として HMD (Head Mounted Display) を用いたボールの軌道予測情報を可視化する Laplacian Vision [3] があるが, この手法では入力から出力までの間にリフレッシュレートの更新遅延が生じている.

そこで本研究では, 低遅延なダイナミックプロジェクションマッピングを用いた, 運動予測に基づく先読み情報提示を加えたシステムを提案する. コンセプトを図 1 に示す. この手法は, ダイナミックプロジェクションマッピングを用いることで, 低遅延にボールの先読み情報を呈示可能とするシステムである. 球の高速な運動をトラッキングするだけではなく, その運動先読み情報 (予測情報) を用いることで, 限りなく遅延のない視覚フィードバックをユーザに先出し提供することを可能とする. 低遅延かつ先読みの視覚フィードバックにより, 視覚情報と身体感覚の整合性の違和感を一層軽減し, 学習者が動作している最中に高精度な運動情報を逐次的に学習することで, 効率的なパフォーマンスの向上が期待される.

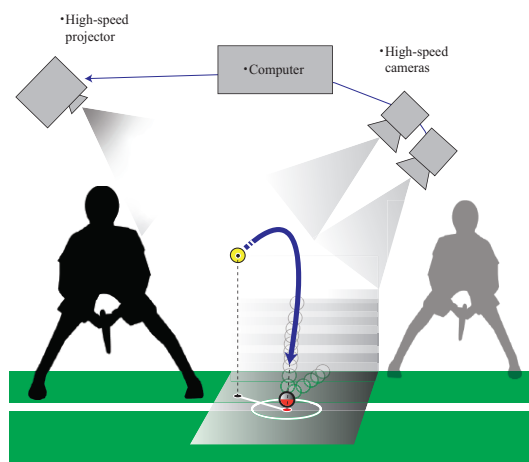


図 1: 提案コンセプト図.

2. 関連研究

テニスの公式試合ではボール軌道の三次元計測に基づくマルチカメラを使用した Hawk-Eye の導入が進んでいる [4]. これは実際にボールが地面に着地した後に, ボールの軌道からボールの落下位置を推定した後出し呈示である.

Laplacian Vision [3] や LumoSpheres [5] は, 動的ボールに対し, 線形カルマンフィルタを基に運動を予測し, プロジェクタや HMD などの映像機器と連携動作を実現している. これらのシステムではプロジェクタのフレームレートが高速でないことが挙げられる.

佐藤らの [6] は高速ビジョンを組み合わせ, カルマンフィルタを基に二次元のターゲットの軌道予測情報を即時呈示するシステムである. この研究は運動予測の対象がホッケーをプレイする平面上の盤とパックのみに限定されており, 三次元の空間に対する軌道予測情報呈示ではない.

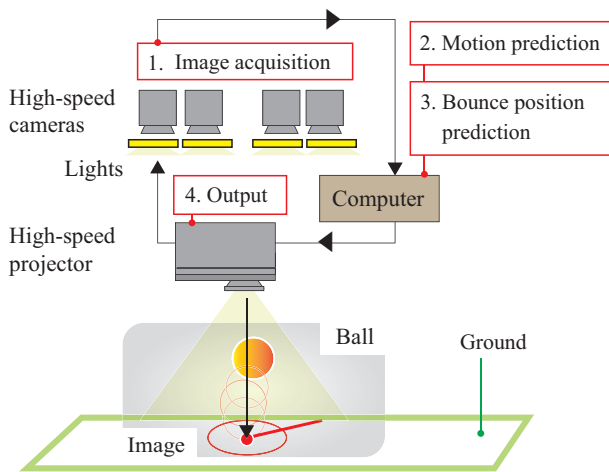


図 2: システム構成.

3. 提案手法

高速ビジョンを用いて、ボールの計測情報を基にカルマンフィルタによりバウンド位置予測情報を算出し [7], ダイナミックプロジェクションマッピングによる先読み情報提示を提案する. 図 2 にシステム構成を示す.

3.1 高速画像処理

ボールの三次元位置を計測するために, 4 台の高速カメラ (500[fps]) を用いる. 高速カメラで得られる高フレームレートのモノクロ画像に対し, 二値化および輪郭検出によってボール領域を抽出し, 重心を計算することで各カメラにおける 2 次元位置を算出する. 本稿では簡単のため, 計測対象であるボール全表面に再帰性反射シールを取り付け, 可視光カットフィルタを備えた高速カメラと近赤外照明を用いて, 明領域としてのボール領域の抽出を行う.

さらに, 大型のカメラ校正用パターン (ChArUco マーカ [8]) を用いて, 4 台の高速カメラのカメラ校正を事前に行う. 各カメラにおける回転・並進 6 自由度・レンズの焦点距離等のカメラ内のパラメータの特性について既知として扱う. 事前情報 (校正されたステレオカメラ情報) と同時検出したボールの 2 次元位置情報を用いて Perspective-n-Point (PnP) 問題を解くことにより, 三角測量を用いたボールの 3 次元位置の推定を行う [9].

3.2 線形カルマンフィルタを用いた運動予測

線形カルマンフィルタは, 対象の運動について内部状態も含め最新の計測情報から逐次推定することを可能とする手法である. 高フレームレートで得られるボールの三次元位置の時系列データに対して, 線形カルマンフィルタ [5] を用いて運動予測, すなわち位置 p_t , 速度 \dot{p}_t , 加速度 \ddot{p}_t の予測を行う.

本研究では位置・速度・加速度を含むボールの軌道を予測するアルゴリズムとして先行研究 [10] と同様のアルゴリズムを用いる. [10] の状態方程式と観測方程式にカルマンフィルタを適用することで, 画像計測によって得られるボール

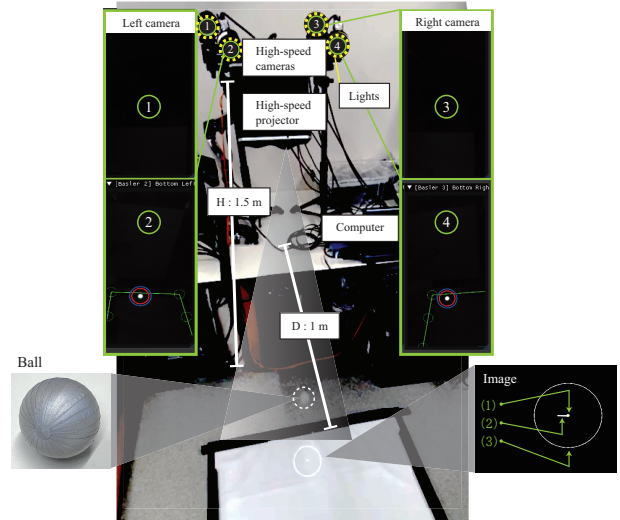


図 3: 実験の模式図.

の三次元の位置情報だけでなく, 速度情報・加速度情報を逐次的に推定し, 着地位置の予測に利用する.

3.3 予測運動を用いた着地位置予測

まず, カルマンフィルタを用いて推定した Y 座標 (地面に対する鉛直方向) の位置 y_t ・速度 \dot{y}_t ・加速度 \ddot{y}_t を用い, 着地までの予測時間 t_e を先行研究 [10] と同様に解くことで推定する. 次に, 求めた予測時間 t_e を用いて, X 座標および Z 座標における着地予測位置 x_e, z_e の推定を行う. ここで, X 座標および Z 座標の位置 x_t, z_t ・速度 \dot{x}_t, \dot{z}_t ・加速度 \ddot{x}_t, \ddot{z}_t は, Y 座標と同様にカルマンフィルタにより推定した値を用いる.

3.4 投影画像生成

最小遅延 3ms を投影可能とする高速プロジェクタ DynaFlash を用いて, 高速フレームレート 1000[fps] で画像生成したイメージを地面の対象エリアに出力する. 画像生成情報として, 下記 3 点の要素を描写する. (1) カルマンフィルタの推定情報を基に, 予測バウンド位置を点で描写. ボールの予測バウンド位置を意味する. (2) 現在のボールの計測位置情報を基に, 現在位置とバウンド予測位置の間を結ぶ線分を描写. ボールの現在位置情報を意味する. (3) 計測位置情報を基に, 地面からボールの高さを円に反映し描写. ボールが地面にバウンドするまでの高さを意味する.

4. 実験

算出した着地予測情報を用いてプロジェクタにより画像生成・出力を行い, 地面に投影されたイメージを別の高速カメラで捉え評価した. このとき, 計測カメラのフレームレートは 500[fps]・50[fps] の 2 条件とした. それぞれ 2 条件で撮像した画像を基に, ボールの現在位置と予測着地位置を結ぶ線分をエッジ検出し, ハフ変換で抽出・評価した.

4.1 実験環境

図 3 に実験環境を示す. 高速カメラには Basler ace acA1300-200 (400×800[px], 500[fps], モノクロ, レンズ焦点距離

3.5[mm]/F2.0) を 4 台支持体に設置し、マルチカメラとしてボールの跳躍運動を撮像した。高速カメラを撮像するコンピュータには、DELL PRECISION 7910 (Windows 10) を用いた。ボールの位置計測を簡単にするため、近赤外照明 IRDR-FA70 (850[nm]) を各高速カメラと光軸が一致するように 4 灯用いた。高速プロジェクタ DynaFlash (1,000[fps], モノクロ) は、地面に投影するように下向きに設置した。また、投影イメージを評価・確認するために、記録用の高速カメラ Photron INFINICAM UC-1 (1,000[fps]) も、対象のボールから約 100[cm] 離れた場所に 1 台設置した。ボールは卓球で使用される球、直径 4.0[cm] を用い、近赤外光による画像計測のため再帰性反射テープを巻き付けた。

4.2 実験結果

ボールの落下運動に対して投影したイメージを高速カメラで撮像した結果を図 4 に示す。高速計測条件 (500[fps]) では 1,330[ms] 付近で予測バウンド位置が収束している傾向を確認できたが、低速計測条件 (50[fps]) では、1,772[ms] 付近で実測値と予測バウンド位置のずれが生じていることが観察された。図 4 の拡大図を図 5 に示す。

図 6 はバウンド予測位置と現在時刻の関係である。高速計測条件ではボールが地面にバウンドする前、約 250[ms] 付近で予測が収束している傾向が確認されたが、低速計測条件では地面にボールがバウンドするまでに予測バウンド位置が安定して示されないことが観察された。ボールが地面にバウンドするまでの猶予時間は大きければ大きいほど、人間が運動予測を活用した準備動作をとることを可能とするため、50[fps] では準備動作の猶予時間を確保することが困難であると考えられる。

次に、より詳細に比較観察するためにボールのリアルタイム現在位置と予測バウンド位置を可視化したボールの線分を抽出し、それらの点と点をつなぐ線分の長さを高速計測条件と低速計測条件で比較した結果を図 7 に示す。低速計測条件 (50[fps]) では断続的であり、線分が断片的に傾斜している傾向があるが、高速計測条件 (500[fps]) では線分の長さの推移が比較的滑らかであることが確認された。これらの傾向は計測カメラ内の設定情報に紐づき、500[fps] は 2[ms] 毎推定、50[fps] は 20[ms] 毎推定で線分が出力されることに起因すると考えられる。

以上のことから、運動体の逐次推定の可視化には高いフレームレートが必要であることを確認した。これは線形カルマンフィルタの換算工程における処理時間に起因すると考えられ、カメラのサンプリングレートが高ければ高いほど、予測バウンド位置推定時間の収束が早く、ボールのバウンドまでに間に合うことが考えられる。本研究により、高速ビジョンを用いて落下するボールの先読みした予測バウンド位置情報を、リアルタイムに地面に予測表示できることを確認した。

5. おわりに

本研究では、ボールのバウンド予測に基づくダイナミックプロジェクションマッピングの開発を行った。1000[fps] の高速プロジェクタおよび 500[fps] の高速カメラとカルマンフィルタを用いた運動・落下位置予測において、運動体の逐次推定の可視化には高いフレームレートが必要であることを確認した。今後の展望としては、映像遅延や空間解像度について、細分化し定量的に調査を行う予定である。

参考文献

- [1] R. Sigrist, G. Rauter, R. Riener, and P. Wolf. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 20, No. 1, pp. 21–53, 2013.
- [2] A. Ng, J. Lepinski, D. Wigdor, S. Sanders, and P. Dietz. Designing for low-latency direct-touch input. *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 453–464. 2012.
- [3] Y. Itoh, J. Orlosky, K. Kiyokawa, and G. Klinker. Laplacian vision: Augmenting motion prediction via optical see-through head-mounted displays. *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference*, pp. 1-8, 2016.
- [4] N. Owens, C. Harris and C. Stennett. Hawk-eye tennis system. *International Conference on Visual Information Engineering*, pp. 182-185, 2003.
- [5] H. Koike and H. Yamaguchi. Lumospheres: real-time tracking of flying objects and image projection for a volumetric display. *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 93-96, 2015.
- [6] K. Sato, H. Terashima, S. Nishida, and Y. Watanabe. ESP: Extra-Sensory Puck in Air Hockey using the Projection-Based Illusion. *SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies*, pp. 1-2, 2022.
- [7] 末石智大, 石川正俊. 高速光学系制御と対称的ドットマーカによる卓球回転実時間計測, 第 40 回日本ロボット学会学術講演会, 2B1-08, 2022.
- [8] F. J. Romero-Ramirez, R. Munoz-Salinas, and R. Medina-Carnicer. Speeded up detection of squared fiducial markers, *Image and Vision Computing*, vol. 76, pp. 38-47, 2018.
- [9] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [10] 枘岡陽麻里, 末石智大, 石川正俊. 球技スポーツの着地痕跡判定に向けた高速ビジョンを用いた落下位置予測. 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.2089-2092, 2022.

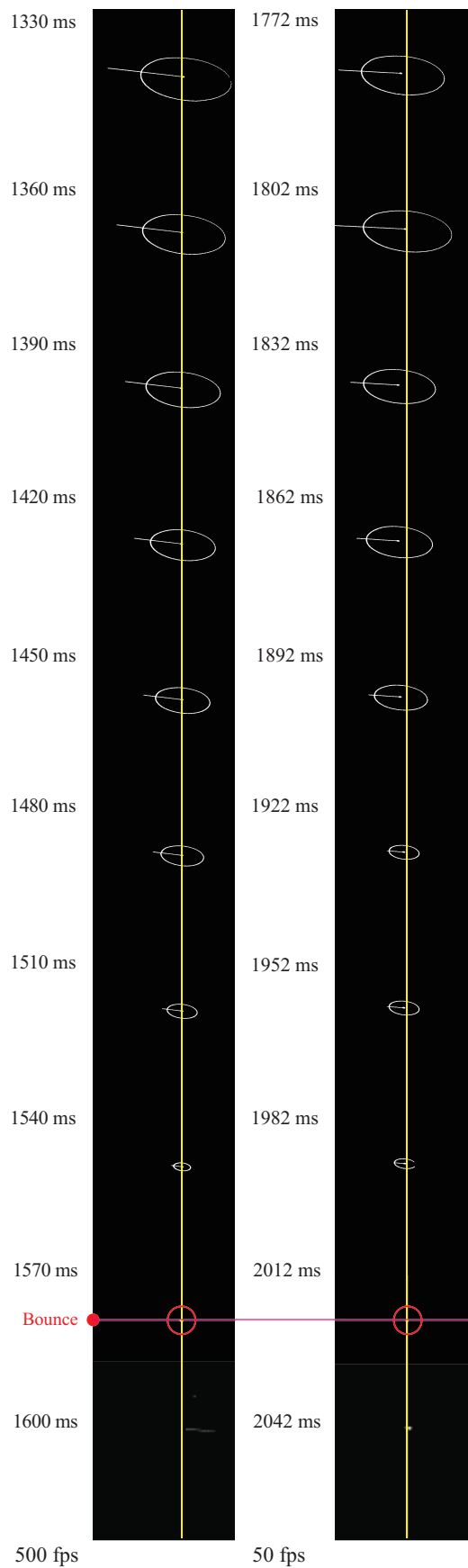


図 4: 着地直前の投影映像比較.

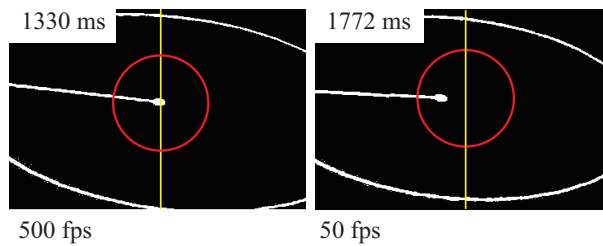


図 5: 図 4 の拡大図.

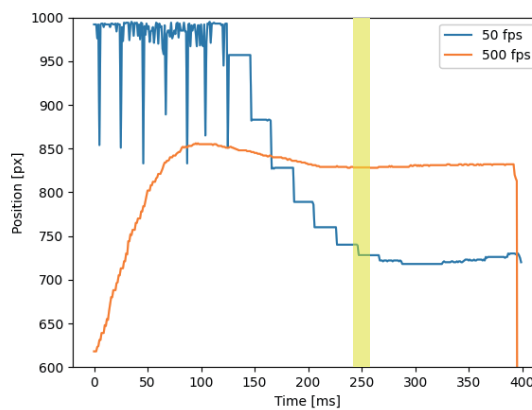


図 6: バウンド予測位置と時間の推移.

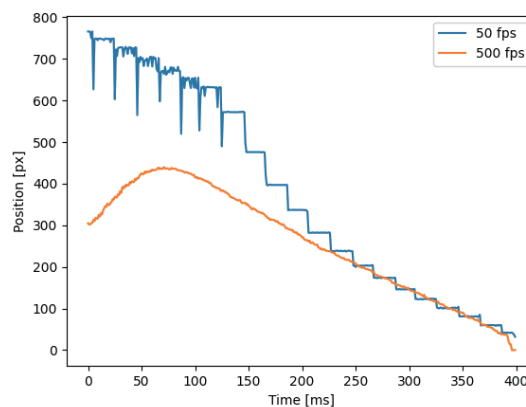


図 7: バウンド予測位置と現在位置を結ぶ線分の長さの推移.