



平面鏡と二次元画像マーカを用いたアイトラッキング用カメラと裸眼 3D ディスプレイの相対位置推定手法の基礎検討

Preliminary Study on Relative Pose Estimation between an Eye Tracking Camera and an Autostereoscopic 3D Display Using a Planar Mirror and 2D Image Markers

柳田恭佑¹⁾, 小池崇文¹⁾

Kyosuke YANAGIDA and Takafumi KOIKE

1) 法政大学 大学院情報科学研究科 (〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, kyosuke.yanagida.8x@stu.hosei.ac.jp, takafumi@hosei.ac.jp)

概要: 裸眼 3D ディスプレイにおいて、ディスプレイとアイトラッキング用カメラの相対位置を正確に把握する必要がある。本研究では、平面鏡と二次元画像マーカを用いて、鏡像の幾何的特性から鏡像の三次元位置を推定しアイトラッキング用カメラとディスプレイの相対的な三次元位置を推定する手法を提案する。複数視点で取得した鏡像位置に対してバンドル調整を行い最適化した結果、深度方向には改善の余地があるものの、水平方向と鉛直方向では十分な精度を示した。

キーワード: 鏡像位置推定, 裸眼 3D ディスプレイ, カメラパラメータ推定

1. はじめに

2 眼式裸眼 3D ディスプレイは、平面ディスプレイの表面に光学素子を貼付することで、左右の目に視差のある映像を提示し、立体視を可能にする表示技術である。視差映像を空間的に分割することで、特殊なメガネを用いずに 3D 映像を表示できる。一方で、観察可能な視域が狭く、観察者の移動により立体視が破綻する課題がある。観察者の瞳孔位置をリアルタイムに推定し応用した裸眼 3D ディスプレイ [1][2] では、数 mm 程度の瞳孔位置の変化に応じて表示する映像を動的に切り替え、広い視域と安定した立体視を可能にしている。

これらの手法は、アイトラッキング用カメラで推定した瞳孔位置を裸眼 3D ディスプレイの座標系に変換しているため、ディスプレイとアイトラッキング用カメラの相対的な三次元位置を数 mm の精度で把握する必要がある。製造段階で両者の相対的な三次元位置を精密に保証することは可能であるが、長期的な運用や設置する環境の変化を考慮すると、運用現場で柔軟に位置調整可能なソフトウェアによる推定手法が望ましい。したがって、カメラで撮影した映像を用いて、数 mm の精度で両者の相対位置を推定する手法が求められる。

カメラと二次元画像マーカを用いた従来の手法 [3] は、カメラがディスプレイ周辺部に固定される構成では、二次元画像マーカとディスプレイ表示面を同時に視野内に収めることが困難である。また、相対位置推定用カメラを用いて、アイトラッキング用カメラとディスプレイを同時に相対位置推定用カメラの視野内に収められる。しかし、相対位置推定用カメラでアイトラッキング用カメラの位置を推定す

るには、アイトラッキング用カメラに最適化された三次元位置推定が必要となるため、汎用化は困難である。この制約に対して、Takahashi らは、平面鏡を用いてマーカの鏡像を観測し、カメラとディスプレイの相対位置を間接的に推定する手法を提案している [4]。しかしこの手法では、鏡面の法線ベクトルがディスプレイとカメラの光軸をまたぐような配置の場合、実像と鏡像が重なり、法線ベクトル推定が不安定になるという課題がある。

本研究では、平面鏡の四隅に二次元画像マーカを貼付した平面鏡ユニットを用いて、鏡像のチェッカーボードを撮影・解析することで、カメラとディスプレイの三次元位置を推定する手法を提案する。平面鏡ユニットを移動させ複数視点の画像を撮影し、バンドル調整によって推定値を最適化する。さらに、物理的に取得した真値との誤差を解析し、本手法の有効性を検証する。

2. 関連研究

二次元画像を用いたキャリブレーションは、既知の三次元位置と二次元の観測データにおける対応関係に基づいて剛体変換を推定する Perspective-n-Point を用いる。チェッカーボードやドットパターンなどの二次元画像マーカが一般的であり、なかでも ArUco マーカ [7] は、頑健な姿勢推定が可能である。参照画像や設置条件に応じた多様な手法が提案されている。任意の投影モデルに対応可能な線形キャリブレーション [3]、カメラと IMU のセンサフュージョンによる手法 [5]、人物の姿勢推定に基づくマーカ不要な手法 [6] などがある。しかし、アイトラッキング用カメラがディスプレイ周辺部に設置される場合、マーカと表示面を同時

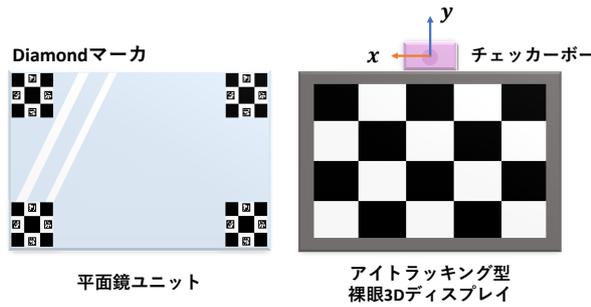


図 1: 平面鏡ユニットと裸眼 3D ディスプレイに表示するチェッカーボード画像の構成。

に撮影するのが困難となる。

平面鏡を用いてディスプレイに表示されたパターンをカメラから間接的に観測し、鏡像を通じてカメラとディスプレイの相対位置を推定する手法がある [4]。しかし、鏡面がディスプレイおよびカメラに対して対称的な配置となると、鏡像と実像が重なり、鏡面の法線ベクトルの推定が不安定となる課題がある。本研究では平面鏡と二次元画像マーカを組み合わせることで、限定的な撮影範囲であってもアイトラッキング用カメラとディスプレイの三次元位置を推定する手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 平面鏡ユニットと鏡像の撮影方法

本研究では、撮影範囲が限定されたアイトラッキング用カメラから裸眼 3D ディスプレイ全体を直接観測することが困難であるという制約を、平面鏡を利用した間接的な観測に基づく相対位置の推定によって解決する。平面鏡の四隅に二次元画像マーカを貼付したユニットを平面鏡ユニットと定義する。二次元画像マーカには、複数の ArUco マーカを一体化させた構造により、高精度なコーナー検出と比較的安定した姿勢推定を可能とする Diamond マーカ [8] を用いる。二次元画像マーカは平面鏡の姿勢を正確に推定するために配置されている。図 1 に平面鏡ユニットと裸眼 3D ディスプレイに表示するキャリブレーション用のチェッカーボードを示す。本手法を用いるためのカメラ座標系と世界座標系を定義する。アイトラッキング用カメラの光軸を原点として、鉛直上方向を y 軸、光軸方向を z 軸となる右手座標系をカメラ座標系とする。チェッカーボードの重心を原点とし、マーカの奥行方向を z 軸、鉛直上方向を y 軸となる右手座標系を世界座標系とする。

図 2 に平面鏡ユニットを用いた裸眼 3D ディスプレイの鏡像を撮影方法を示す。アイトラッキング用カメラの撮影可能範囲に、チェッカーボードと Diamond マーカが収まる姿勢にそれぞれを配置する。この環境で撮影することで、チェッカーボードと Diamond マーカの三次元位置を推定する。このとき、アイトラッキング用カメラはディスプレイそのものではなく、平面鏡ユニットに映ったチェッカーボー

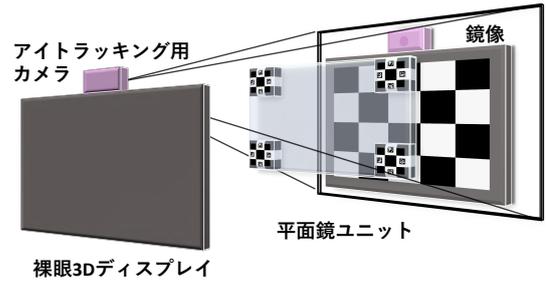


図 2: 平面鏡ユニットを用いた鏡像の撮影方法。

ドと Diamond マーカが観測されるため、鏡像の三次元位置を推定する。

3.2 鏡像の三次元位置推定方法

鏡像の幾何学的特性を用いた三次元位置推定は、鏡像のチェッカーボード位置からカメラ姿勢を推定し、平面鏡からアイトラッキング用カメラの鏡像位置を導出する。まず、世界座標系におけるカメラ位置を推定する。カメラの回転行列 \mathbf{R} と並進ベクトル \mathbf{t} は、世界座標系における i 個設置したチェッカーボードのコーナーの三次元座標 \mathbf{c}_i 、カメラで撮影した画像平面上の二次元座標 \mathbf{p}_i 、投影関数 Π を用いて、Levenberg-Marquardt 法による非線形最適化問題 PnP として式 (1) で求める。

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}} \sum_{i=0}^m \|\mathbf{p}_i - \Pi(\mathbf{R}\mathbf{c}_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (1)$$

次に \mathbf{R} と \mathbf{t} を用いて座標変換し、カメラ座標系におけるチェッカーボードの三次元座標 \mathbf{c}_c を求める。

鏡像となるアイトラッキング用カメラの三次元位置推定手法を説明する。まず、平面鏡ユニットにおける Diamond マーカの位置を推定する。平面鏡に j 個設置した Diamond マーカの三次元座標を

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_j & y_j & z_j & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

とする。 \mathbf{A} を左特異行列 \mathbf{U} 、特異値行列 Σ 、右特異行列 \mathbf{V} に式 (3) で特異値分解する、

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T. \quad (3)$$

平面鏡の法線ベクトル $\hat{\mathbf{n}}$ は、 \mathbf{V} の特異値が最小となる最後の列 \mathbf{V}_i となる。よって、カメラ座標系における鏡像のアイトラッキング用カメラの三次元座標 \mathbf{q} は、 $\hat{\mathbf{n}}$ と \mathbf{t} 、平面鏡までの距離 d を用いて式 (4) で求められる。ここで d は \mathbf{t} から平面鏡までの垂直距離とする。

$$\mathbf{q} = \mathbf{t} - 2d\hat{\mathbf{n}}. \quad (4)$$

式 (4) は、平面鏡によって鏡像点が鏡面に対して対称な位置に写るといった幾何学的特性を利用している。この処理によ

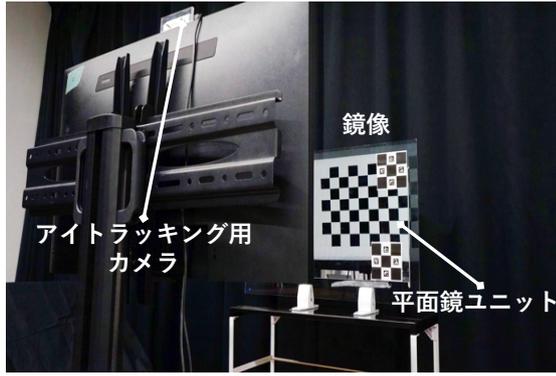


図 3: 実験システムの外観.

て、カメラ座標系における鏡像のチェッカーボードと鏡像のアイトラッキング用カメラの三次元位置が求まる。得られたチェッカーボード鏡像の三次元位置は、後続の複数視点によるバンドル調整において、ディスプレイとカメラの相対外部パラメータを最適化するための観測点として用いる。

3.3 複数視点入力による最適化

前節で求めた、カメラ座標系における鏡像のチェッカーボードと鏡像のアイトラッキング用カメラの三次元位置は、各視点における局所的な観測に基づくものであり、マーカー検出の誤差や画像ノイズの影響を受ける可能性がある。そこで、観測点を複数視点から幾何的な整合性を考慮して最適化するためにバンドル調整を取り入れる。

具体的には、 l 視点において観測された鏡像のチェッカーボード位置 \mathbf{c}_l とアイトラッキング用カメラの鏡像位置 \mathbf{q} を結合し、三次元点 \mathbf{x}_l として式 (5) に示すように定義する。

$$\mathbf{x}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_l \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

視点数 k におけるカメラの回転行列 \mathbf{R}_k 、並進ベクトル \mathbf{t}_k 、カメラ内部パラメータ \mathbf{K}_k を用いて、画像平面に射影したときの観測値 \mathbf{x}_i と一致するように非線形最適化する。ここで、 N は三次元点 \mathbf{X}_i の総数、 M は撮影した視点の数を表す。この処理は、Levenberg-Marquardt 法によるバンドル調整として式 (6) で求められる。

$$\min_{\mathbf{R}_k, \mathbf{t}_k, \mathbf{X}_i} \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^M \left\| \mathbf{x}_i - \mathbf{K}_k [\mathbf{R}_k | \mathbf{t}_k] \mathbf{X}_i \right\|^2. \quad (6)$$

\mathbf{K}_k は各視点におけるカメラ内部パラメータ行列であり、焦点距離と主点位置を含む。 $\mathbf{K}_k [\mathbf{R}_k | \mathbf{t}_k] \mathbf{X}_i$ は、三次元点 \mathbf{x}_i の視点 k の画像平面に対する射影関数を表す。本研究では、全視点において同一の内部パラメータと仮定する。バンドル調整により、すべての視点に整合した一貫性のある三次元位置とカメラ外部パラメータの推定する。

4. 三次元位置推定精度

4.1 実験システム

本手法の有効性を検証するため、裸眼 3D ディスプレイと平面鏡ユニットを用いて、三次元位置の推定精度を計測し

た。図 3 に実験システムの外観を示す。裸眼 3D ディスプレイには、RealImage 製の 3D-32 を用いる。ディスプレイ上部には Intel 製の Realsense D435i を固定し、RGB 画像を撮影する。Realsense D435i とディスプレイとの相対的な三次元位置を推定するために、本手法を適用する。Realsense D435i の光軸とディスプレイの法線方向は一致しているものとする。

各辺 30 mm の Diamond マーカを、縦 540 mm × 横 320 mm × 厚さ 1 mm のアクリル鏡の四隅に配置し、平面鏡ユニットを構成した。また、縦に 6 個、横に 9 個のコーナを各辺 45 mm で配置したチェッカーボード画像をディスプレイに表示し、鏡像を撮影した。平面鏡ユニットは手動で位置と向きを変えながら、複数の視点で静止画を撮影し、バンドル調整による最適化に必要な映像を撮影した。

同一の映像を用いて、複数の解像度と視点数を組み合わせることで、本手法の有効性を示す。Realsense D435i を用いて 1080p の映像を撮影し、撮影した映像を、720p、540p にリサイズした。また、1080p の映像は、計 800 視点分撮影し、各解像度ごとに 10, 50, 100, 150, 200, 250 視点にランダムサンプリングして使用した。

4.2 結果

図 4 に異なる解像度および視点数による各軸の誤差分布を示す。まず x 軸は、解像度の向上と視点数の増加に伴って誤差が減少しており、特に 1080p は、全ての視点数において、誤差が 5 mm 以内に収まった。視点数 250 においては、540p や 720p でも 5 mm 以下に収束しており、 x 軸は解像度に依らず、比較的安定した推定が可能であることがわかった。

次に y 軸は、全体的に x 軸よりも誤差が大きく、540p と 720p では視点数に依らず 10 mm から 20 mm 前後の誤差があった。一方、1080p では全ての視点数において、誤差が 10 mm 以内に収まった。このことから、 y 軸の推定精度は解像度の増加に伴って、改善する傾向があることがわかった。

z 軸は、全ての条件において誤差が他軸よりも大きく、最大で 80 mm の誤差があった。720p と 1080p では視点数の増加により、ある程度の改善を示したが、他軸と比較するとその効果は限定的であり、 z 成分は構造的制約により最も誤差の大きい成分となっている。以上より、 x 軸は比較的安定し、 y 軸は x 軸に比べて、高解像度にするにより精度が向上し、 z 軸は全条件で誤差が他軸と比べ増大することがわかった。

1080p で撮影した 250 視点の画像から推定したアイトラッキング用カメラとディスプレイの三次元位置を用いて、裸眼 3D ディスプレイで正しく立体視できることを確認した。よって、本手法は実環境下においても、必要な精度を満たすことが分かった。

4.3 考察

本実験で得られた三次元位置推定精度の傾向には、システム構成や幾何学的制約が大きく影響している。本手法は平面鏡に映る鏡像を間接的に観測しており、鏡面の姿勢推

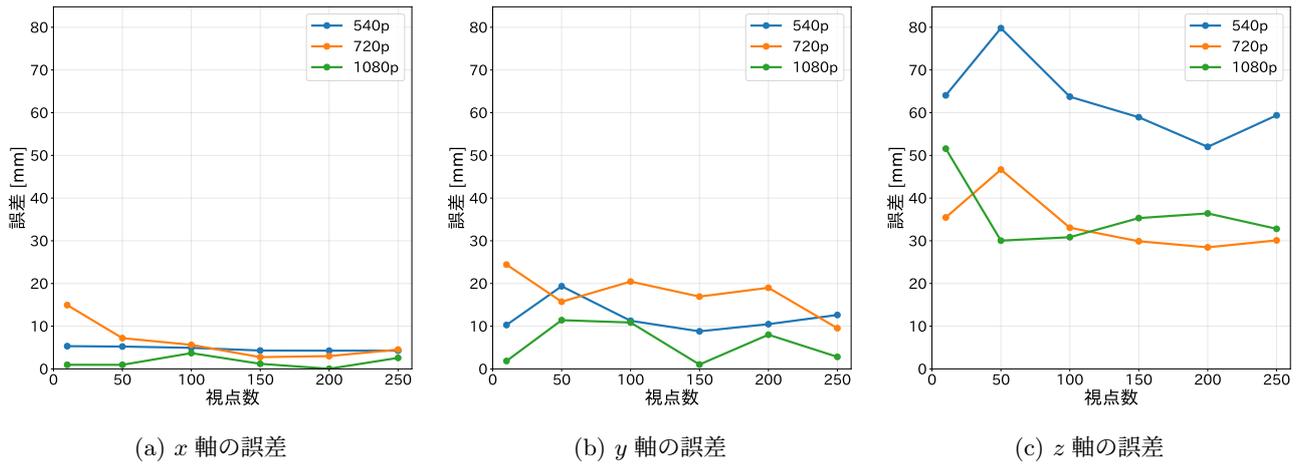


図 4: 解像度および視点数の違いによる三次元位置推定誤差の比較. (a) x 軸, (b) y 軸, (c) z 軸における誤差.

定精度が出力される三次元位置に直接影響を及ぼす. 鏡面法線の推定誤差や鏡面までの距離の誤差は, z 軸の対称点計算において二重に反映されるため, 他軸に比べて z 軸の誤差が増大しやすい構造となっている. また, z 軸は視差と奥行きの関係が非線形であるため, 小さな視差誤差が奥行きに大きな影響を与えると考える.

さらに, 図 3 に示す実験構成では, 平面鏡ユニットを主に水平に移動させて複数視点を取得しており, z 軸方向に十分な視点移動を実施していない. これは, 平面鏡ユニットの大きさが不十分で, z 軸の視差変化量を制限しバンドル調整における拘束条件に与える情報が減少する. 一方で, x および y 軸は移動による視差変化が十分に確保されており, 幾何的に強く拘束されるため, 比較的誤差が減少したと考える.

z 軸の誤差が他軸に比べ増大したことは, 平面鏡ユニットの幾何的制約, 鏡像の三次元位置推定における z 軸の誤差増加, および解像度に依存する検出精度が複合的に影響したと考える. 従来の裸眼 3D ディスプレイでは, ディスプレイとアイトラッキング用カメラの z 軸を揃えることが一般的であるため, 十分だと言える. しかし, 広範囲にアイトラッキングするために, 上記以外にアイトラッキング用カメラを配置する場合は z 軸の推定精度向上を検討する必要がある.

5. まとめ

本研究では, 平面鏡と二次元画像マーカを組み合わせた平面鏡ユニットを用いて, 鏡像の姿勢推定することによって, 裸眼 3D ディスプレイとアイトラッキング用カメラ間の相対的な三次元位置推定する手法を提案した. 有効性を示すために, 複数視点からの観測をもとに外部パラメータをバンドル調整し, その推定結果と物理的に計測した真値との比較による評価を実施した.

z 軸以外の推定値は, 真値に対して 10 mm 以内の精度であることを確認し, 本手法の有効性を示した. 今後はさらに, より頑健なマーカによる平面鏡ユニットの法線ベクト

ル推定の精度向上や, マーカの大きさや数, 配置方式について再検討する. また, 他の照明条件による推定精度を比較する必要がある.

参考文献

- [1] T. Nishimura *et al.*: “Autostereoscopic Display with Wide Viewing Zone Using Binocular Image Control Method in Divided Area Based on Viewing Position,” *Optical Engineering*, Vol. 60, No. 12, 123104, 2021.
- [2] T. Hori *et al.*: “Two-view Autostereoscopic Display Independent of Differences of Interocular Distance and Viewing Condition,” *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 32, No. 3, pp. 77–88, 2024.
- [3] D. Scaramuzza *et al.*: “A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion,” *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, 2006.
- [4] K. Takahashi *et al.*: “A New Mirror-based Extrinsic Camera Calibration using an Orthogonality Constraint,” *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1051-1058, 2012.
- [5] P. Furgale *et al.*: “Unified Temporal and Spatial Calibration for Multi-sensor Systems,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1280–1286, 2013.
- [6] J. Tang *et al.*: “CasCalib: Cascaded Calibration for Motion Capture from Sparse Unsynchronized Cameras,” *cs.CV*, 2405.06845, 2024.
- [7] S. Garrido-Jurado *et al.*: “Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers under Occlusion,” *Pattern Recognition*, Vol. 47, No. 6, pp. 2280–2292, 2014.
- [8] OpenCV Documentation: “Aruco markers, module functionality was moved to objdetect module,” <https://docs.opencv.org> (2025年6月28日参照).