

正面からの観測でも高精度な姿勢推定が可能な AR マーカ

田中 秀幸^{1,a)} 角 保志¹ 松本 吉央¹

概要: AR マーカは手軽に使える AR ツールとして有用であるが、正面付近から観測したときの姿勢精度が悪いという問題がある。我々は新しい原理に基づく AR マーカを開発し、この問題を解決した。本マーカは、レンチキュラーレンズまたはマイクロレンズアレイを用い、視線角度に応じて変化するモアレパターンを生成する。これを画像解析することで高精度（画像上で 50 ピクセル程度あれば誤差 1deg 未満）かつ安定した姿勢推定が可能である。

キーワード: AR マーカ, 姿勢推定, レンチキュラーレンズ, マイクロレンズアレイ

AR Markers Enabling Accurate Pose Estimation even in Frontal Observation

TANAKA HIDEYUKI^{1,a)} SUMI YASUSHI¹ MATSUMOTO YOSHIO¹

Abstract: AR markers are useful tools for easy AR, but have a serious problem that the accuracy of pose estimation gets worse especially in frontal observation. We solved the problem by developing novel AR markers based on a new principle. The proposed markers generate moiré patterns by lenticular lenses or a microlens array, which seem to move according to the visual-line angles. We realized high-accuracy and stable pose estimation by image processing of the patterns.

Keywords: AR marker, pose estimation, lenticular lens, microlens array

1. はじめに

AR マーカは、安価なカメラと合わせて Augmented Reality を簡単に実現する有用なツールであり、ARToolKit[1]をはじめ複数種類のもが存在する。

従来の平面視覚マーカの多くは、射影変換の原理を用いた三次元幾何計算により位置・姿勢を算出する。ここでは位置関係が既知の四点（マーカの四隅等）を抽出し、画像上でのそれらの位置からカメラとマーカの相対的な位置・姿勢を一意に決定する。この方式では画像上での検出点のずれが姿勢推定精度に影響し、とくにマーカと正対したとき、つまりマーカ平面と視線が垂直に近い位置関係のとき、同じ検出誤差であっても、視線が傾いているときに比べて

マーカの見かけの角度変化が大きくなり、推定精度が悪化する[2]。この「正面付近から観測したときの姿勢推定精度の悪化」は従来の AR マーカに共通する性質であり、原理的に解決困難な問題である。フィルタ技術によって推定値の安定化はできても、推定値の「正しさ」を保証することは難しい。

我々は、新しい計測原理を導入することでこの問題を解決した。提案する AR マーカは、レンチキュラーレンズやマイクロレンズアレイによって生成されるモアレ（干渉縞）パターンをもつ。このパターンが見る角度に応じて変化するため、画像処理によってパターンを解析することで角度の情報を抽出できる。この新しい AR マーカを用いることで、正面付近から観測した場合でも従来の AR マーカでは不可能なレベルの高精度で安定した姿勢推定を実現した。

我々が開発した AR マーカは二種類ある。一つはレンチキュラーレンズを用いたもの、もう一つはマイクロレン

¹ 産業技術総合研究所
AIST, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan
^{a)} hideyuki-tanaka@aist.go.jp

ズアレイを用いたものである．本稿ではおもに後者の AR マーカについて，構造，姿勢推定のアルゴリズム，および性能検証の結果を述べる．

2. レンチキュラーレンズを用いた高精度 AR マーカ

レンチキュラーレンズを用いた高精度 AR マーカ LentiMark[3] を図 1 に示す．LentiMark は，既存の AR マーカ（ここでは ARToolKitPlus を使用）と，二つの次元モアレパターン（観測の視線角度に応じて黒い部分が動いて見える（図 2））から構成される．モアレパターンはレンチキュラーレンズと縞模様から成る（図 1）．レンズと縞の幅に少し差をつけることで視線角度に応じて移動するモアレ縞を発生させている（図 3）．

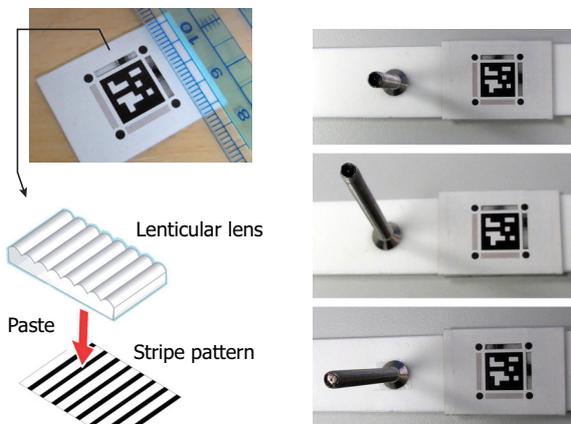


図 1 LentiMark and the structure of variable moiré pattern.

図 2 Pattern variation of LentiMark

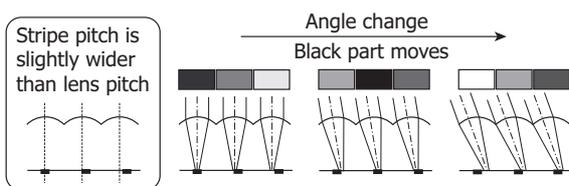


図 3 Principle of moiré movement (Reprint from [3])

LentiMark の姿勢推定は二段階で行われる．まず AR-ToolKitPlus の姿勢を推定し，次にモアレパターンから得られる二軸の視線角度の情報を用いてその姿勢を修正する．LentiMark は，正面付近から観測したときでも画像上で数十ピクセルのサイズがあれば姿勢推定誤差は 1deg 未満であり，高精度かつ安定した姿勢推定が可能である．

3. マイクロレンズアレイを用いた高精度 AR マーカ

3.1 マーカのデザイン

LentiMark の考えを拡張し，マイクロレンズアレイを用いて我々が開発した AR マーカを ArrayMark と呼ぶ．図 4

に ArrayMark のプロトタイプを示す．ArrayMark は，姿勢推定や画像変換に用いる四つの参照点をもつ．一つの参照点はマーカを方向を判別するために他の三つの参照点より小さくしてある．（図 5）．中央の円はレンズエリアであり，二次元のモアレパターンが表示される．マーカの ID 番号はまだ実装されていないが，ArrayMark の脇にバーコードのようなパターンを付与することで技術的には容易に実現可能と考える．

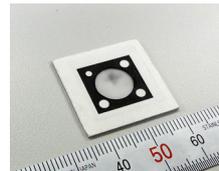


図 4 ArrayMark prototype

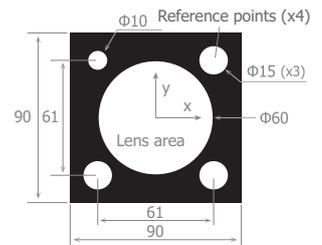


図 5 Design of ArrayMark.

3.2 レンズエリアの構造

図 6 にレンズエリアの構造を示す．多数の小さい十字形がマイクロレンズアレイの裏面に印刷されている．図 7 にレンズと十字形の位置関係を示す．十字形の配置はマイクロレンズの配置と相似であるが，少し小さくしてある．

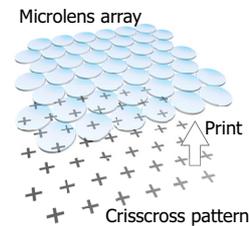


図 6 Structure of lens-area of ArrayMark.

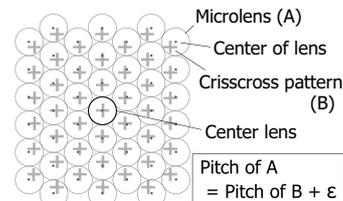


図 7 Relation between lenses and crisscrosses.

十字形が真下にあるレンズをセンターレンズと呼ぶ（図 7）．センターレンズからの距離が遠くなるほど，レンズと十字形の位相差は大きくなる．

3.3 ArrayMark の挙動とその原理

視線角度に応じた十字形の見目の動きを図 8 に示す。図 9 はパターン変化の原理の説明図である。各レンズは小さい十字形のそれぞれ異なった部分を拡大する。レンズエリアに見える十字形は、多数の十字形の部分拡大像が統合されてできたものである。これは三次元像を生成する技術の一つであるインテグラルイメージング [4] と同様の技術であるが、我々はこれを二軸の視線角度を検知するために活用する。



図 8 Movement of crisscross according to seeing angle

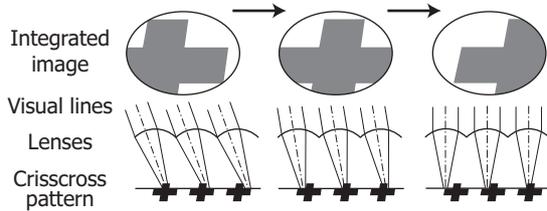


図 9 Principle of movement of image according to visual-line angle.

4. 姿勢推定アルゴリズム

ArrayMark の姿勢推定は下記の手順 (4.1-4.4, 図 10) によって行われる。

4.1 従来手法による六自由度の位置姿勢推定

この段階では、従来の AR マーカの位置姿勢推定と同様の手法により位置姿勢を計算する。ArrayMark の四つの参照点の画像上での位置を用いて同次変換行列 H_{CM} を求める。

4.2 十字形の位置の検出

図 10 にその手順を示す。マスク処理後の画像を、十字形状のサンプリング点群によりスキャンし、最も暗い十字形領域を特定する。

4.3 視線角度の計算

ここでは、視線とは十字形の中心と視点を結ぶ直線と定義する。そして視線角度 θ_{vc} と φ_{vc} を図 11 のように定義する。レンズエリアに見える十字形的位置は、視線角度の組 $(\theta_{vc}, \varphi_{vc})$ と一対一に対応している。具体的には、 θ_{vc} と φ_{vc} の組と十字形位置の関係は図 12 の通りである

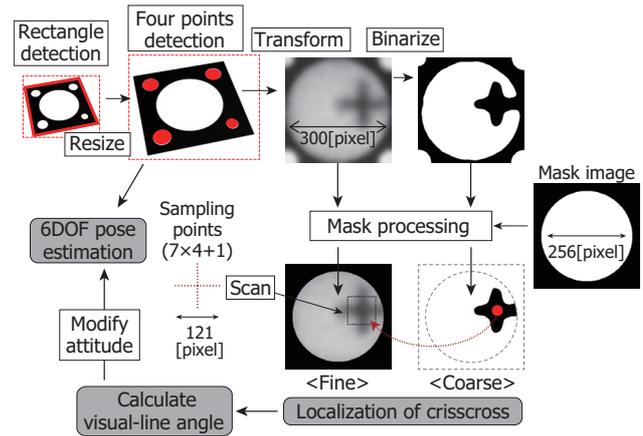


図 10 Pose estimation procedure

((x_{c0}, y_{c0}) はセンターレンズの位置, k はマーカを実測して得られた定数). θ_{vc} と $|\mathbf{v}_c|$ の線形性は、マーカ実測の結果により確認済みである。

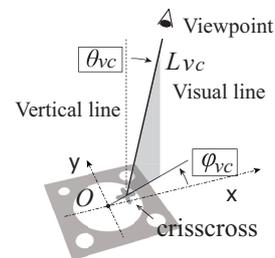


図 11 Definition of two-dimensional visual-line angles

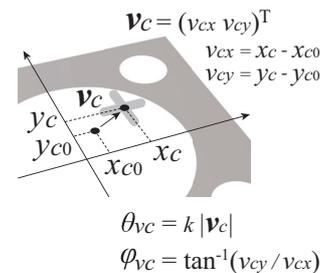


図 12 Calculation of visual-line angles from crisscross position.

4.4 視線角度を用いた姿勢の修正

従来手法によって計算された六自由度の位置姿勢のうち、下式によって三自由度の姿勢成分を修正する。

$$H_{AM} = H_{CM} R_{mod} \quad (1)$$

ここで、 H_{AM} は ArrayMark の六自由度の位置姿勢を表す同次変換行列であり、 H_{CM} は従来手法で推定した同次変換行列である。 R_{mod} は H_{CM} の回転成分を修正する同次変換行列である。次に R_{mod} の計算について述べる。

姿勢修正のコンセプトは、「間違っで計算された視点 P_{Vr} を正しい視点 P_{Vc} に引き戻す」というものである (図 13,14). ここで、正しい視点とは、十字形的位置から推定されたものを指す.

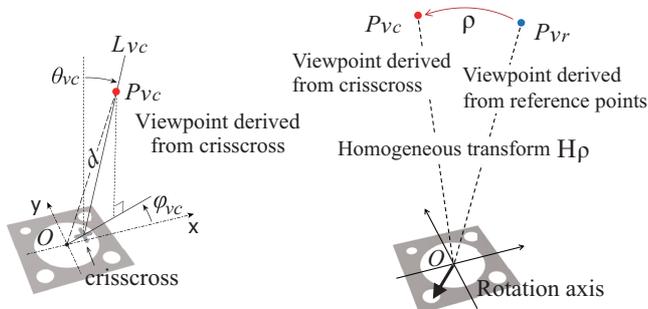


図 13 Calculation of viewpoint
図 14 Pose modification

4.4.1 十字形位置を用いた視点位置の推定

下記の手順により、正しい視点 P_{Vc} の位置を求める.

- (1) θ_{vc} と φ_{vc} から視線 L_{Vc} を求める.
- (2) L_{Vc} 上においてマーカー原点からの距離が d である視点 P_{Vc} を求める.

ここで、 d は H_{CM} から求まるマーカー原点と観測視点との距離である.

4.4.2 姿勢修正量の計算

P_{Vr} から P_{Vc} への姿勢修正は、ある軸周りの角度 ρ の回転として表現できる. この回転を表す同次変換行列を H_ρ とする. R_{mod} は $R_{mod} = H_\rho^{-1}$ によって計算される. このようにして ArrayMark の高精度な六自由度位置姿勢を式 (1) により求める.

しかしながら、式 (1) は十字形が検出されたときのみ有効である. それ以外のときは H_{AM} の代わりに H_{CM} を ArrayMark の位置姿勢とする.

5. ArrayMark の性能検証

従来手法と比較しつつ、ArrayMark の性能を検証した.

5.1 測定環境

ArrayMark の試験片を回転テーブルに乗せた. 回転軸の方向はマーカー座標で $(-1 \ 1 \ 0)^T$ である. ビジョンセンサは USB2.0 CMOS カメラの ARTCAM-036SS-BW (ARTRAY CO.,LTD.) である. 画像解像度は 752×480 [pixel] であり、すべての計算処理はラップトップコンピュータ (CPU 64bit, 2.8GHz, RAM 8GB) によって行った. 処理プログラムは C/C++ 言語で記述した. 画像処理には OpenCV2.3 ライブラリを用いた. 測定は通常のオフィス照明環境下で行った.

5.2 測定結果

5.2.1 計算速度

一つの ArrayMark の位置姿勢推定は、5.1 に記載したラップトップコンピュータで 28[Hz] 程度の速度で実行できた.

5.2.2 画像上での最小サイズ

通常照明下で安定したマーカー認識を行うためには、画像上で約 20[pixel] 以上のマーカーのサイズが必要であった.

5.2.3 姿勢推定誤差

ArrayMark を ± 1 [deg] ずつ回転させながら姿勢推定を行った. 姿勢誤差は、マーカー座標の各軸ベクトルの真値と推定値の角度差の絶対値によって評価した. その標準偏差も測定し、誤差バーで表示した. 比較のため、従来手法による姿勢推定も同時に行った. ArrayMark の画像上でのサイズは 92[pixel] であった (図 15).

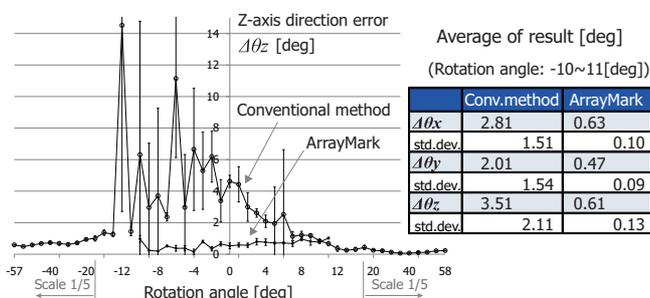


図 15 Comparison of axis direction error between ArrayMark and conventional method

この結果により、正面付近から観測したとき従来手法による姿勢推定は誤差が大きく不安定である一方、ArrayMark は高精度で安定した姿勢推定が可能なが示された.

5.2.4 測定可能な角度範囲

視線角度がある値以上に大きくなると、十字形はレンズエリアの外に出てしまう. 十字形を検知可能な視線角度 θ_{vc} の最大値は約 10[deg] であった. 従来手法による姿勢推定では、視線角度が 10[deg] 以上のときは比較的推定精度が良い. そのため、十字形の検出できる範囲では ArrayMark の方式で、それ以外では従来方式で、というように姿勢推定の手法を視線角度に応じて切り替えるというアプローチが有効といえる.

5.2.5 距離に対するロバスト性

観測距離に対する姿勢推定精度の変化を調べた. 姿勢誤差はマーカーの垂線ベクトルの真値と推定値の角度誤差で評価した. 結果を図 16 に示す. これより、ArrayMark の姿勢推定精度は観測距離が長くなってもそれほど悪化しないことが分かる.

5.2.6 照明条件に対するロバスト性

照明強度に対する姿勢推定精度の変化を調べた. 誤差評価の仕方は前節と同様である. 結果を図 17 に示す. これ

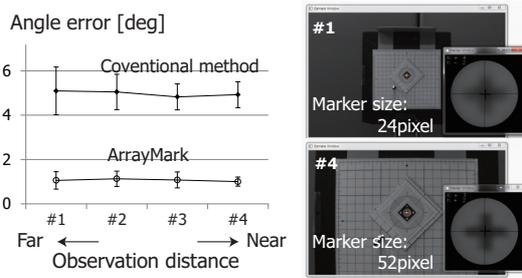


図 16 Angle error of perpendicular line of marker according to observation distance

より, ArrayMark の姿勢推定誤差は照明が暗くなくてもそれほど悪化しないことが分かる。

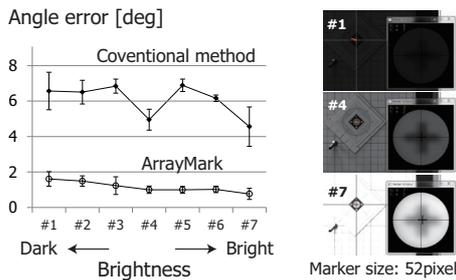


図 17 Variation of angle error of perpendicular line of marker according to illumination

6. Conclusion

我々は全く新しい原理により, 正面付近から観測したときでも高精度かつ安定な姿勢推定が可能な AR マーカを開発した (LentiMark と ArrayMark). マーカのプロトタイプ開発と合わせ, 姿勢推定のための画像処理アルゴリズムを開発し, 従来型 AR マーカの姿勢推定手法に対する優位性を計測実験により実証した. 本 AR マーカは, 従来よりも精度の高い CG の重畳表示が必要なアプリケーション等で非常に有用と考える。

参考文献

- [1] ARToolKit Homepage: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [2] Y.Uematsu, H.Saito: *Improvement of Accuracy for 2D Marker-Based Tracking Using Particle Filter*, in Proc. 17th Intl. Conf. Artificial Reality and Telexistence 2007, pp.183-189, 2007.
- [3] H. Tanaka, Y. Sumi, Y. Matsumoto: *A Visual Marker for Precise Pose Estimation based on Lenticular Lenses*, Proc. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012), pp.5222-5227, 2012.5.14-18, St. Paul, MN, USA.
- [4] M. G. Lippmann: *Epreuves reversibles donnant la sensation du relief*, J. Phys. (Paris) 7, 821-825 (1908).