

視点移動自由度の大きい拡張現実感のための入れ子型マーカ

立野 圭祐[†] 北原 格[†] 大田 友一[†]

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†] {tateno, kitahara, ohta}@image.iit.tsukuba.ac.jp

あらまし 拡張現実感における視点移動の自由度を向上させる入れ子型マーカを提案する。ビジュアルマーカを用いたカメラキャリブレーション手法は、拡張現実感システムを実現するための基盤技術の一つである。しかし、マーカが画面一杯に写りこむようなクローズアップ視点や、逆に、はるか遠くからマーカを観測するような視点では、カメラの位置姿勢の正確な推定が困難になるという問題があった。本稿では、マーカ内部に大きさの異なるマーカを入れ子状に配置した入れ子型マーカにより、従来の単一マーカと比べて、マーカとカメラ間の距離の大きな変化に対応可能で、ロバストな位置姿勢推定を可能にした。単一マーカや複数マーカを用いた従来手法との推定精度を比較評価する実験により、提案手法の有効性を示した。

キーワード 拡張現実感、カメラキャリブレーション、ビジュアルマーカ、ズームイン・アウト、入れ子配置

A Nested Marker for Augmented Reality

Keisuke TATENO[†] Itaru KITAHARA[†] and Yuichi OHTA[†]

[†] Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,

1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

E-mail: [†] {tateno, kitahara, ohta}@image.iit.tsukuba.ac.jp

Abstract A Nested Marker is a novel visual marker for HMD calibration in Augmented Reality. It enables to keeping accurate calibration even when the observer is moving very close to and far away from the marker. Our proposed Nested Marker has a recursive layered structure. One marker at an upper layer contains four smaller markers at the lower layer. The smaller markers can also have lower-layer markers nesting inside them. Each marker can be identified by its inside pattern, so the system can select a proper calibration parameter set for the marker. When the observer views the marker close-up, the lowest-layer marker will work. When the observer views the marker from a distance, the top-layer marker will work. It is also possible to utilize all visible markers in different layers simultaneously for more stable calibration. It should be noted that the Nested Marker can be used in the standard ARToolkit framework. We have developed an AR system by using a Nested Marker to demonstrate the ability of the Nested Marker.

Keyword Augmented Reality, Camera Calibration, Visual Marker, Zoom-in/out View, Nested Marker

1. はじめに

拡張現実感 (AR: Augmented Reality) とは、現実空間に画像や3次元物体などの仮想情報を重畳することで現実と仮想とが融合した感覚をユーザに与える技術である。現実空間と仮想空間の位置合わせの正確さは、拡張現実感システムにおいてユーザが感じるリアリティに直接的に影響する。そのため、現実と仮想の間の位置合わせは、拡張現実感における最重要課題のひとつである。従来、現実と仮想の位置合わせには、磁気・赤外線・電磁波などを利用した特殊なセンサを用いたセンサベースの位置合わせ手法が主に用いられてきた。センサベースの位置合わせ手法は、低い計算コストで高精度の位置合わせが可能という利点があるため、計算機の処理能力が低かった初期のARシステム事例に

おいて多く用いられてきた。しかし、これらのセンサには、高価である、計測範囲の制限が大きい、などの問題も存在する。一方、近年の計算機の処理能力の向上に伴い、ARToolkit[1]を代表とするようなビジュアルマーカを用いたビジョンベースの位置合わせ手法が盛んに利用されるようになってきた。ビジョンベースの手法では、仮想物体を重畳する現実空間を撮影した映像中に写り込んでいる人工的なマーカを位置合わせの指標に利用するため、高精度な位置合わせが可能である。また、カメラ以外の特殊なセンサを必要としない。しかし、映像中のマーカの見え方に、位置姿勢の推定精度は大きく左右されるため、ユーザの視点を移動できる範囲は、マーカが適切な大きさで観測できる範囲に限られ、視点移動の自由度が小さいという問題があ

る。

本稿では、マーカの内部に階層的にサイズの異なるマーカを配置することにより、ユーザの視点移動が可能な範囲を拡大する入れ子型マーカを提案する。観察距離に対応して適切な大きさのマーカを選択的に利用することにより、遠距離からクローズアップしていくように大きく視点が移動する観察行動にも対応した位置合わせを実現することができる。

以降、2節では、ビジュアルマーカによる位置合わせ手法の関連研究を紹介し、本研究の位置づけについて述べる。3節では、提案手法である入れ子型マーカの説明を行い、そのデザインコンセプトとマーカの生成アルゴリズムについて述べる。4節では位置姿勢推定精度についての実験結果を記述する。5節では、入れ子型マーカを用いた応用例を紹介し、最後に6節でまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

ビジュアルマーカを用いたビジョンベースの位置姿勢推定手法は、磁気センサや光学センサを用いたセンサベースの手法[2][3]に対して、以下に示すような長所を有する。

- ・ 低コスト：現実環境を撮影するカメラ以外の特殊なデバイスを使用しないため、低コストに拡張現実感システムを構築できる。
- ・ 高精度：最終的に仮想物体を重畳する映像上での位置あわせを行うため、見た目上のずれの少ない仮想物体の重畳が可能である。
- ・ 広範囲：磁気センサや光学センサと異なり、ビジュアルマーカが配置できれば、視点の移動範囲を容易に広範囲に拡大できる。

しかし、ビジュアルマーカを用いた位置合わせ手法において、自由に視点を移動できる範囲は、画像中からマーカが検出できる場合に限られ、カメラ映像中に占めるマーカの大きさやその見え方によって、位置合わせの精度が大きく左右されることが知られている。また、マーカ領域上に他の物体が写りこむなどの隠れが生じたときには、位置姿勢推定が困難になる。

このようなマーカ検出における不安定性に対処するため、隠れにロバストなマーカ検出手法が提案されてきた[4][5][6]。Malikら[4]は、位置が既知な特徴点を内部に配置した正方形マーカを提案し、その特徴点追跡によりカメラキャリブレーションを行うことで、隠れや距離の変化に対応可能な位置姿勢推定手法を提案した。しかし、Malikらの手法は、正方形マーカ内部の特徴点が、フレーム間では微小にしか変化しないという前提で追跡を行っているため、一度、追跡に失敗すると、復帰が困難となる問題がある。また、Fialaら[5]は、正方形マーカのIDに2次元バーコードを用い、



図 1:ARToolkit で用いるビジュアルマーカの例

CRC コードによるエラー修正を行うことで、小規模の隠れに対応できる手法を提案した。しかし、Fialaらの手法は、クローズアップ撮影時のように画面一杯にマーカが写りこむ場合には、位置姿勢推定を行うことが困難である。視点移動自由度の大きい拡張現実感を実現するためには、マーカとカメラの距離の変化に対してもロバストにマーカ検出できる手法が望ましい。

正方形マーカによる位置合わせ手法として、広く用いられている拡張現実感システム構築ライブラリにARToolkitがある。ARToolkitでは、図1に示すような黒枠のフレーム内部に識別用のID領域が配置された正方形マーカを現実空間に配置し、カメラで撮影されたマーカの見え方から、位置姿勢推定を行う。ARToolkitを用いた拡張現実感システムにおいて、マーカの隠れへの対処や広範囲の空間を扱う場合には、複数のマーカを組み合わせたマルチマーカの利用が一般的である。マルチマーカによって、隠れへの対応や視点移動範囲の広域化が可能になるが、複数のマーカを広い空間に分散配置する必要があり、ARシーンの景観を損ねたり物体配置に制限を課してしまう欠点がある。また、この場合にも、一つのマーカに大きくクローズアップするカメラワークに対応することは困難である。小さいマーカの組み合わせによるマルチマーカを用いた場合、クローズアップに対応することはできるが、比較的遠くから観察を行うような場合には撮影されるマーカの解像度が著しく低下する。このように、複数のマーカを組み合わせて利用したとしても、ユーザとマーカとの距離が大きく変化するような場合に柔軟に対応することは、困難であるといえよう。

本稿で提案する入れ子型マーカは、ARToolkitで用いられるマーカを拡張し、遠景からの観察からクローズアップまでを含めた距離変化の大きい見え方に対応可能なビジュアルマーカとしたものであり、標準的なARToolkitの枠組みでそのまま利用可能である。

3. 提案手法

3.1. 入れ子型マーカ

図2に、提案する入れ子型マーカのコンセプトを示す。入れ子型マーカは、マーカ内部にマーカを再帰的に配置することにより、多様な大きさを持つマーカを混在させた構成を実現する。これにより、マーカの最

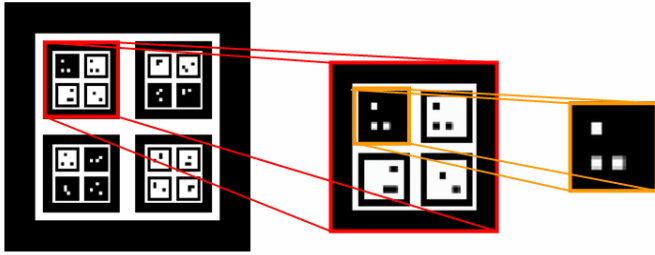


図 2：入れ子型マーカ

も外側の輪郭だけでなく、マーカ内部に存在する小さなマーカの輪郭を利用した位置姿勢推定が可能となる。大きさの異なるマーカを内部に含むことにより、図 3 に示すように、マーカからカメラまでの距離に応じて適切な大きさのマーカを選択して位置姿勢の推定を行うことが可能となるため、観測距離の変化に対し柔軟に対応可能という特長を有する。また、画面中で観測されるマーカ数が増加すると、位置姿勢推定に用いることが出来る輪郭情報も増加するため、従来の正方形マーカに比べ高精度な位置姿勢推定が可能である。さらに、一部のマーカに隠れが生じた場合にも、隠れないマーカを選択して位置姿勢推定を行うことにより、隠れに対してもロバストである。



図 3：距離に応じたマーカ選択

3.2. 入れ子型マーカのデザイン方針

入れ子型マーカは、内部に配置された下位マーカの輪郭情報を観測距離に応じて選択的に用いることで、広範囲の距離変化に対応した位置姿勢推定を実現する。そのため、下位マーカの面積は、入れ子型マーカによる位置合わせの精度に大きな影響を与える。下位マーカの面積が外側のマーカに比べて極端に小さいと、位置合わせ精度が低下するだけでなく、距離変化に応じてマーカ選択を切り替える際に、位置姿勢情報の連続性が損なわれ、マーカとカメラ間の距離の変化にロバストであるという利点が薄れてしまう。そのため、我々は、下位マーカの大きさは可能な限り大きくとることをデザインの基本方針とした。

入れ子型マーカをデザインする際に考慮すべきパラメータは、下位マーカの回転角度、マーカの分割数、マーカフレームの太さの 3 つである。以下、各々のパラメータの設定について説明する。

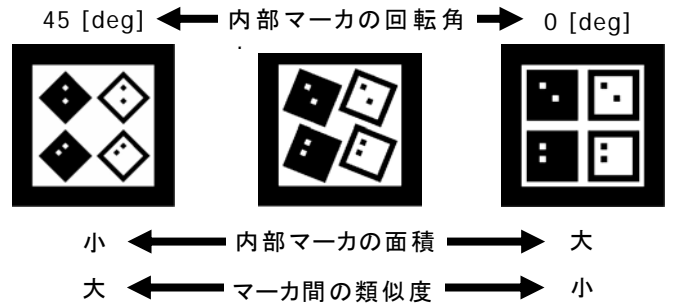


図 4：内部マーカの回転角度

3.2.1. マーカ間の回転角度

図 4 に、上位マーカに対する下位マーカの回転角度の変化に応じた、マーカ面積とマーカ間類似度の関係を示す。回転角度を 0 度とした場合、下位マーカの面積は最大となる。しかしこの場合、下位マーカと上位マーカの回転角が同じであるため、マーカ間の類似度は最大となる。一方、下位マーカの角度を変化させると、マーカ間類似度は低下するが、回転させたマーカを隣接配置するのに必要なマーカ間のマージンが必要となり、下位マーカの面積が小さくなる。我々は、前述のように、下位マーカの大きさを最大とするデザイン方針を選択し、内部マーカの回転角度は 0 度に設定した。

3.2.2. 内部マーカの分割数

入れ子型マーカを構成する個々のマーカは、その内部パターンによって識別可能でなければならない。構成マーカの総数は、マーカの階層を一段下げる際の分割数と、階層の深さによって決まる。図 5 に、マーカの分割数が、1、4、9 の例を示す。分割数が多い程、部分的な隠れに強くなる。また、観察距離の大きな変化に対応するためには、階層数を大きくとることが望ましい。一方、構成マーカの総数が増加すると、個々のマーカの識別が困難になる。図 6 に、マーカの分割数と階層数をパラメータとしたマーカ間の類似度の変化を示す。マーカの分割数と階層数が増加するにつれマーカ間の類似度が 1.0 に漸近することが分かる。類似度が高いと、マーカ識別に誤りが生じる可能性が高くなるため、類似度が一定値以下となるように分割数と階層数を設定する。マーカ識別に誤りが起こりにくい経験的な値として類似度 0.7 を設定すると、マーカの分割数 4、階層数 3 が得られる。

3.2.3. マーカフレームの太さ

図 7 にマーカフレームの太さに対する、下位マーカの面積とマーカ検出の安定性の関係性を示す。マーカフレームの太さは、マーカ検出の安定性に重要な影響を与える。ユーザの頭部にカメラを装着することが多い拡張現実感では、頭部の回転・並進運動によるモー

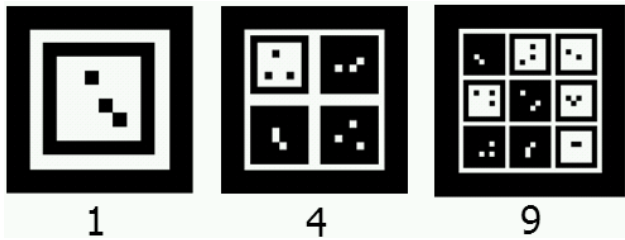


図 5：マーカの分割数

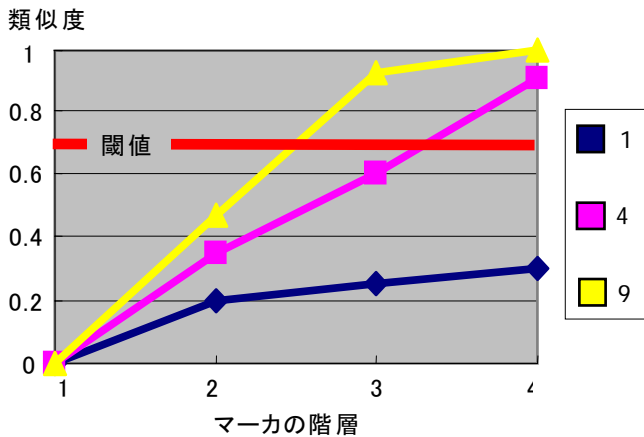


図 6：マーカの分割数と類似度の関連性

ションブラーが発生しやすい。マーカフレームが太い場合、このモーションブラーによるマーカフレームのボケの影響を受けにくく、カメラが急激に動いた場合にも、安定したマーカ検出が可能となる。しかし、図 7 に示すように、マーカフレームを太くするほど、下位マーカの面積は小さくなる。必要最小限のマーカフレームの太さを、以下に述べるように決定する。

簡単のため、モーションブラーを単純な平行移動と近似し、マーカ検出に必要な十分なマーカフレームの太さを求める。なお、焦点ずれによるボケはないものとして考える。カメラの移動に伴う画面上での像の移動速度を V 、カメラのシャッタースピードを t とすると、モーションブラーによるボケ幅 D は式(1)で表せる。

$$Vt = D < F \quad (1)$$

ボケ幅 D がマーカフレームの太さ F 以下であるとき、マーカ検出が安定して可能であると考え、マーカフレームの太さを、式(1)を満たす範囲で可能な限り細く設定する。

3.3. 入れ子型マーカの自動構成手法

入れ子型マーカは、マーカ識別のための ID パターンとして本来は使われる領域に下位マーカを配置するため、下位マーカが上位マーカの ID パターンを兼ねる必要がある。また、入れ子型マーカを構成する全てのマーカは、その内部パターンによって識別可能であ

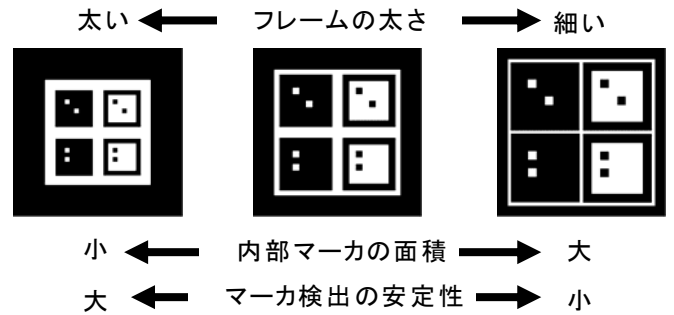


図 7：マーカフレームの太さ

ることが必要である。このような条件を満たす入れ子型マーカを自動的に構成するため、本研究では、逐次的に類似度を計算しながら、ボトムアップに入れ子型マーカを構成していくアルゴリズムを開発した。

本手法で用いる最下層のマーカは、図 8 に示すような、白地に黒コードと黒地に白コードの 2 次元ドットパターンである。地色とコード色の面積比率の逆転を防ぐため、コードとしては $4 \times 4 = 16$ ドットの中から 3 ドットのみを用いる。この場合、 $560 \times 2 = 1120$ 通りのパターンが利用できる。最下層のマーカの地色の分布を偏らせることにより、上位マーカの ID パターンとしての役割をもたせることが可能となる。



図 8：最下位マーカの例

入れ子型マーカの自動生成アルゴリズムは以下の通りである。

1. 最下層のマーカをランダムに生成する
2. 新しく生成したマーカと、これまでに生成した全てのマーカとの類似度を計算する
3. 3-1. 類似度が閾値を超えた場合、新しく生成したマーカを消去し、1.に戻る、
3-2. 閾値以下の場合、次のマーカを生成するために 1.に移る

最下層のマーカが 4 つ生成されると、それらの組み合わせとして上位の階層のマーカが一つ構成される。これ以降は、2.の類似度比較の対象として、同じ階層のマーカだけでなく、階層の異なるマーカも加え、同様の操作を繰り返す。

このアルゴリズムで生成した入れ子型マーカの例を図 9 に示す。図 9 左は、類似度の閾値を 0.7 に設定して生成した 3 階層の入れ子型マーカの例、図 9 右は、閾値を 0.85 に設定して生成した 4 階層の入れ子型マーカの例である。

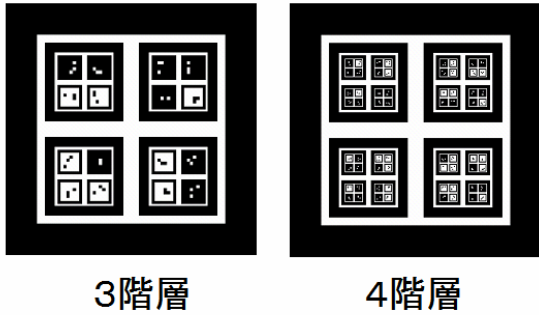


図 9：入れ子型マーカの自動構成結果

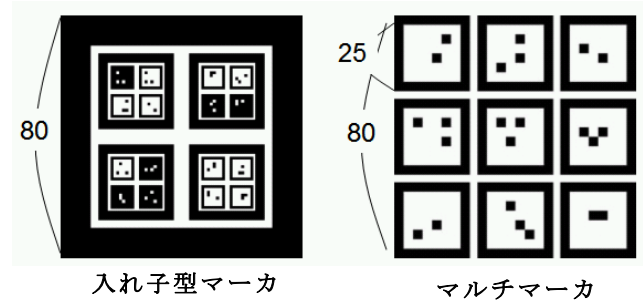


図 10:実験対象

4. キャリブレーション精度の評価実験

入れ子型マーカを用いた位置姿勢推定精度の評価実験を行った。

実空間における実験では、照明条件やレンズ歪みなどの多様なノイズ要因が混入するため、理想的な環境下での入れ子型マーカの位置姿勢推定精度として、CGで生成したマーカの映像を用いたシミュレーション実験を行った。レンダリングするマーカ映像は、2値画像であり、照明の効果などは含んでいない。また、レンズ歪みもない。実験には、一辺 80mm の3階層入れ子型マーカを使用した。図 10 左に使用したマーカを示す。比較対象として、図 10 右に示す一辺 25mm マーカ 9 個から構成されるマルチマーカを用意し、入れ子マーカと同様の実験を行った。マーカと仮想カメラの空間的關係を図 11 に示す。マーカは斜め 30 度の見込み角で撮影し、30~800mm まで、10mm 刻みに Z 軸方向に平行移動させた。位置姿勢の推定精度の評価値には、位置(X, Y, Z)と姿勢(オイラー角： α , β , γ)についての真値と推定値の誤差を用いる。

図 12 に、位置誤差と姿勢誤差の中でそれぞれ誤差がもっとも顕著であった X 軸と α 角の計測結果を示す。横軸はマーカ-カメラ間の距離、縦軸は誤差を示している。図 12 左の位置誤差の結果において、マーカ-カメラ間の距離が 480mm 以上で、マルチマーカの場合に位置推定が不安定になっているのに対して、入れ子型マーカでは安定して位置を推定できていることが確認で

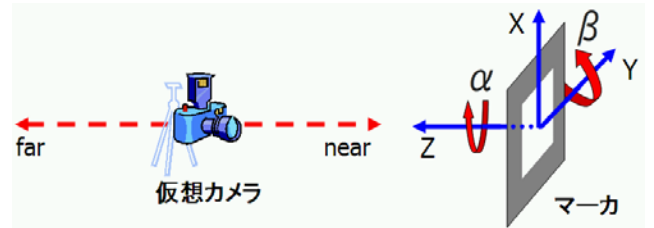
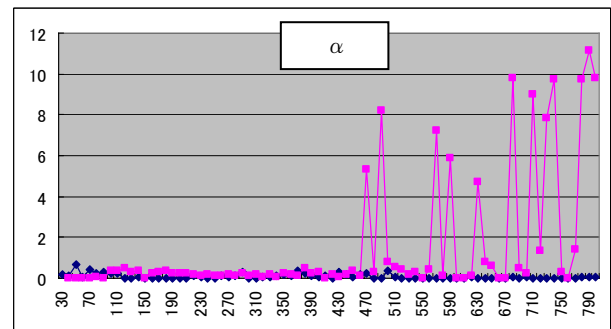
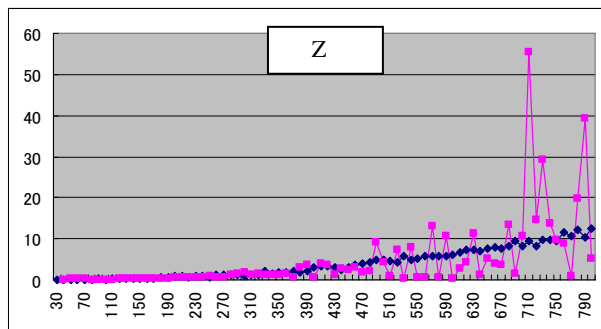


図 11:実験設定

きる。また、図 12 右の姿勢誤差の結果において、マーカ-カメラ間の距離が 400mm 以上で、マルチマーカでは 10 度ほどの振れ幅で姿勢推定値にブレが発生しているのに対し、入れ子型マーカでは安定に姿勢推定できていることが確認できる。以上の結果より、入れ子型マーカによる位置姿勢推定は、近距離から遠距離まで、安定に動作することが確認できた。

5. 入れ子型マーカを用いた AR システムの構築

入れ子型マーカを利用した位置姿勢推定は、従来のビジュアルマーカに比べて、マーカに極端に接近するクローズアップを可能とするような視点移動自由度の高さと、マーカの部分的な隠れに対するロバストさという特徴を有している。そのため、入れ子型マーカを用いることで、従来の AR アプリケーションでは困難であった、仮想物体にクローズアップして細部を観察するという動作を実現することが可能である。そこで、入れ子型マーカの特性を生かす AR アプリケーションの例として、Level of Detail に対応した 3D モデルビュ



◆ 入れ子型マーカ ■ マルチマーカ

図 12:カメラ位置姿勢精度計測の結果



図 13：入れ子型マーカによる AR シーン

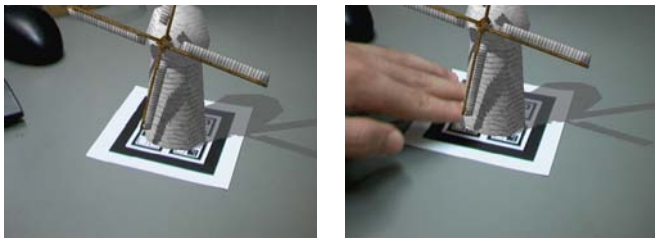


図 14：マーカに隠れが生じた場合の AR シーン

アを構築した。

実験には、ノート PC(CPU：Pentium M 1.6GHz、メモリ：1.0GByte、グラフィックスカード：オンボード インテル製グラフィックスメディアアクセラレータ 900)と歪み補正を施した USB 接続の小型カメラ(Logicool 社製 Qcam for Notebooks Pro、解像度：640x480pixel、フレームレート：15fps)を用いた。本システムでは、3 階層の入れ子型マーカを用いた。1 階層目(最外辺)の大きさは、80mm、2 階層目は、25mm、3 階層目は 8mm である。

5.1. 視点移動自由度の高さ

入れ子型マーカの視点移動自由度の高さを示す例として、800mm から 40mm の範囲で視点を移動させた場合の AR シーンの結果を図 13 に示す。マーカとカメラ間の距離はそれぞれ、左上 800mm、右上 480mm、左下 21mm、右下 40mm である。AR シーンの近景から遠景に渡って安定に位置姿勢推定が行われていることがわかる。入れ子型マーカを位置合わせに用いることで、仮想物体モデルの概形から細部まで、距離の変化を問わず安定して観察することが可能であることが示された。

5.2. 隠れに対するロバストさ

入れ子型マーカの部分的な隠れに対するロバストさを示す例として、マーカに隠れが生じた場合の AR シーンの結果を図 14 に示す。図 14 右に示すように、

手によってマーカに部分的な隠れが生じた場合にも、隠れのないマーカを自動的に選択して位置姿勢推定を行うことにより、問題なく位置合わせが行われていることがわかる。入れ子型マーカを用いることで、マーカの部分的な隠れに阻害されることなく、安定して仮想物体を観察することが可能であることが示された。

6. まとめ

本稿では、マーカ内に異なる大きさのマーカを入れ子状に配置することで、従来のビジュアルマーカよりも、マーカ-カメラ間の距離の変化に柔軟に対応可能で、かつ、安定な位置合わせを可能とするビジュアルマーカを提案した。この入れ子型マーカは、標準的な ARToolkit の枠組みで利用可能である。

CG で生成した映像を用いた位置姿勢推定精度の計測実験により、従来のビジュアルマーカよりも、広範囲かつ安定なキャリブレーションが可能であることを示した。また、入れ子型マーカの特長を活かした AR システムとして、Level of Detail に対応した 3D モデルビューアを構築し、入れ子型マーカの有効性を確認した。今後の課題としては、実環境下におけるレンズのボケやノイズを含んだ場合のマーカ識別精度の計測実験などが挙げられる。

文 献

- [1] 加藤, Billinghamurst, 浅野, 橘, “マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”, TVRSJ, Vol.4, No.4, pp.606-616, 1999.
- [2] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Deligmann, “knowledge-based augmented reality”, Comm, CM, vol.36, no.7, pp.53-63, 1993.
- [3] M. bajura, H Fuchs, and R. Ohbuchi, “Merging virtual reality with the real world: seeing ultrasound imagery within the patient”, Computer Graphics, vcol.26, no.2, (Proc. SIGGRAPH '92), pp.203-210, 1992.
- [4] Shahzad Malik, Gerhard Roth, Chris McDonald, “Robust 2D Tracking for Real-Time Augmented Reality”, Proceedings of Vision Interface (VI) 2002, Calgary, Alberta, Canada. pp.399-406, 2002.
- [5] Fiala, M. “ARTag Revision 1, A Fiducial Marker System Using Digital Techniques”, NRC/ERB-1117. November 24, 2004.
- [6] 村田, 加藤, 山本, “拡張現実感のためのロバストなマーカ姿勢検出手法の提案”, 電子情報通信学会 2003 年総合大会, D-12-120, pp.281, 2003.