

美観と頑健性を両立させた複合現実感用 半人為的幾何位置合わせマーカの研究 (第2報) ～ツートンカラー方式の機能拡張～

海川 真佑^{*1} 前田 紗希^{*2} 天目 隆平^{*3} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*3*4} 田村 秀行^{*1}

*1 立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

*2 立命館大学情報理工学部

*3 立命館大学総合理工学研究機構

*4 科学技術振興機構さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8 川口センタービル

E-mail: kaigawa@rm.is.ritsumei.ac.jp

あらまし 本稿では、第1報で報告した対象領域と同系色のマーカ群を用いる「ツートンカラー方式」における機能拡張について報告する。本手法におけるマーカ色決定のための指標を得るために、カメラ・プリンタの色再現特性の調査を行った。また、第1報でのマーカのID数が少ないという問題に対して、マーカの辺の長さの違いによって異なるマーカと認識させることで、マーカのID数の増加を試みた。

キーワード 複合現実感, 位置合わせ, 半人為的マーカ

Visually Elegant and Robust Semi-Fiducials for Geometric Registration in Mixed Reality (2) - Expansion of Two-Tone Colored Marker Method -

Shinsuke KAIGAWA^{*1} Saki MAEDA^{*2} Ryuhei TENMOKU^{*3}
Fumihisa SHIBATA^{*1} Asako KIMURA^{*3*4} Hideyuki TAMURA^{*1}

*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577, Japan

*2 College of Information Science and Engineering

*3 Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University

*4 PRESTO

Kawaguchi Center Building, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012, Japan

E-mail: kaigawa@rm.is.ritsumei.ac.jp

Abstract In this paper, we describe some expansions of "the two-tone colored marker method" that is a registration method for Mixed Reality using markers whose colors are similar to those of background object. In our previous paper, our proposed method could identify 60 kinds of markers by using shapes of markers. Firstly, this paper shows an experiment investigating color reproducibility of a printer and a camera in proposed method. Secondly, this paper describes the marker subdividing method based on the marker length.

Keyword Mixed Reality, Vision-based Registration, Semi-fiducials

1. はじめに

現実世界と仮想世界を継ぎ目なく融合・表示する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、新しい情報提示技術として注目を集めている[1-4]。MR においては「幾何学的」「光学的」「時間的」の3つの整合性の達成が

必要不可欠であるが、なかんずく仮想物体を実世界に正しく重畳させるためには幾何学的整合性が最重要であり、従来より様々な研究が行われてきた[5]。

幾何学的整合性を達成する手法は、位置姿勢を計測するセンサを用いたセンサベース方式[6]、カメラから

の入力画像を処理して位置姿勢を推定する画像ベース方式[7,8]、両手法を併用したハイブリッド方式[9]の3つに大別できる。利用目的や移動範囲等の制約に応じて適した方式が採用されているが、画像ベース方式では、安定性・簡便性・コスト面等の理由から、識別しやすい人工的なマーカを現実世界に配置する方法が主流となっている。しかし、ARToolKit[7,8]をはじめとする人工的なマーカは Fiducial と呼ばれ、不粋で非常に目立つため、美観を損ねると批判する声も少なくない。これを解消する方法として、実環境中の自然特徴を用いる試み[10]や、肉眼で視認しにくい再帰性反射材でマーカを作成し、赤外光を照射して赤外線カメラで撮影することでマーカを認識する手法[11]も提案されている。しかし、安定性や処理速度、赤外線カメラの使用が前提である等の問題があり、決定的な解決策は未だ確立されていない。

この問題に対して我々は、半人為的／準恣意的にデザインしたマーカを採用することで、赤外線カメラ等の特殊な機器を使用することなく美観と位置合わせ能力の頑健性を両立させる手法の研究を進めている。我々は、このようにデザインされたマーカ群を SFINCS (Semi-Fiducial INvisibly Coded Symbols) [半人為的で、目立たないよう符号化された記号群の意] と総称し、その第一弾として、実環境と調和のとれた色および形状のマーカを設置するツートンカラー方式 (Two-Tone colored marker 方式：TT 方式) を提案した [12]。

本稿では、TT 方式において、識別可能な色の数を調査して、マーカ色決定の指標を示すとともに、マーカの 패턴の細分化を行い、本方式で識別可能な ID 数を増加させたので報告する。

2. TT 方式

2.1. 概要

TT 方式のイメージ図を図 1 に示す。TT 方式では、対象領域の四隅の形状に合うように、L 字型、I 字型、直角三角形の 3 種類のマーカを設置して位置合わせを行う。同一平面上において四隅に配置したマーカの外側の頂点 4 つが長方形を構成する拘束条件を課す。これらのマーカは、対象領域と色相の値がほぼ同じで彩度および明度が少し異なる色とする。L 字型や I 字型

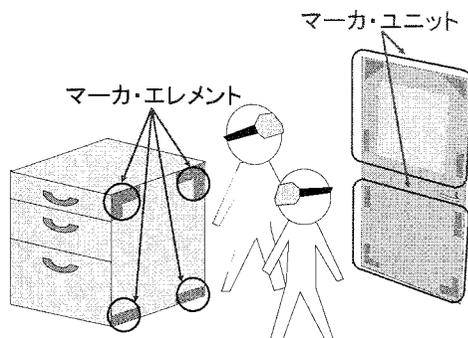


図 1：TT 方式のイメージ図

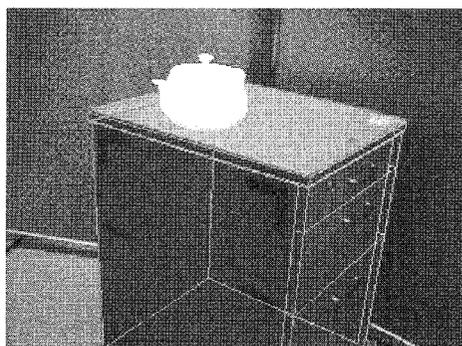


図 2：TT 方式の利用例

の各マーカをマーカ・エレメントと名付け、対象領域の四隅に設置された 4 つのマーカ・エレメントの組をマーカ・ユニットと呼ぶ。美観の観点から、同一のマーカ・ユニットを構成するマーカ・エレメントは同一色のものを利用する。位置合わせのための ID は、各マーカ・ユニットに 1 つずつ埋め込まれ、事前にデータベースに登録されたマーカ情報と合致するもののみを本手法の位置合わせマーカと判定する。利用例を図 2 に示す。

2.2. 位置合わせの手順

これまでに提案した TT 方式の各フレームにおける処理の流れを図 3 に示す。各フレームにおいて、(1) マーカ・エレメントの検出、(2) マーカ・ユニットの検出、(3) カメラ位置および姿勢の推定、3 つの処理を逐次的に行う。前フレームでカメラ位置・姿勢の推定ができたフレームでは、マーカ・エレメントの検出範囲を前フレームでマーカ・エレメントが検出された画像

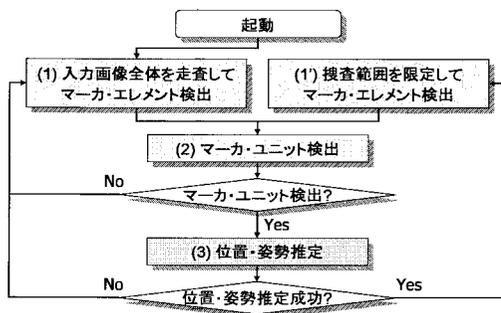


図 3：TT 方式の処理手順

上の領域付近に限定することで、処理の高速化を図る。以下に、各処理の内容を説明する。

(1) マーカ・エレメント検出

事前に登録されているマーカ設置領域の色を入力画像中から探索する。その中から、同系色で濃度のみが異なる隣り合う領域を、輪郭線追跡を利用してマーカ・エレメント候補領域として検出する。これらの領域は、輪郭の頂点数をもとに L 字型, I 字型, 直角三角形に分類される。候補領域がどの形状にも分類されない場合は、マーカ・エレメントでないと判断する。

(2) マーカ・ユニット検出

(1)で検出されたマーカ・エレメントから選択した全ての同色のマーカ・エレメント 4 つの組に対して、その組み合わせのマーカ・ユニットがデータベースに登録されているかどうかを調べる。

(3) 位置・姿勢推定

データベースに登録されている各マーカ・エレメントの世界座標と画像座標系での座標からカメラの位置・姿勢を推定する。

2.3. ID の埋め込み

TT 方式では、マーカ・ユニットを構成する各マーカ・エレメントの形状とマーカ・エレメントの色を利用してマーカ・ユニットを識別する。図 4 に示すように、マーカ・エレメントの形状の組み合わせで、別の ID を持ったマーカ・ユニットだと識別することができる。しかし、回転させて一致する 2 つのマーカ・ユニットの識別や、自身が回転対称となるマーカ・ユニットを利用することはできない。これまでの TT 方式の仕様では、L 字型, I 字型 (回転系によって 2 種類に分類),

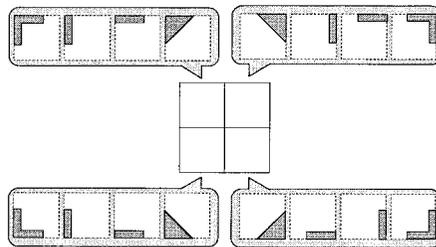


図 4：マーカ・エレメントの組み合わせ

直角三角形の 4 種類のマーカ・エレメントの利用が可能であった。TT 方式におけるマーカ ID 数は、利用可能なマーカ・エレメントの形状の数を n とすると、

$$\text{識別可能 ID 数} = \frac{n^4 - (n + n C_2 \times 2)}{4} \quad (1)$$

で表すことができる。式(1)より、これまでの TT 方式で識別可能なマーカ・ユニットの ID の総数は 60 となる。

3. マーカ色決定のための指標

3.1. カメラ・プリンタの色再現特性の考慮

TT 方式におけるマーカの貼付対象は、什器や壁等の現実空間に存在する実環境であり、本方式でマーカを探索すべき範囲として登録する色は、マーカを設置する実環境中の領域をカメラで撮影して得られる色である。したがって、カメラを通してプリンタで印刷されたマーカを視測した際、カメラおよびプリンタの色再現特性によって、理想とする色が再現されるとは限らない。そのため、本方式では、利用するプリンタとカメラの色再現特性をあらかじめ調査する必要がある。理論的には、計算機で設定した色 $C_S(H_S, S_S, V_S)$ をマーカとして印刷して、これをカメラで撮影した際の色を $C_T(H_T, S_T, V_T)$ とすると、 $f: C_S \rightarrow C_T$ である写像 f および逆写像 f^{-1} を求めることに相当する。しかし、プリンタやカメラの色再現特性は照明環境の影響を大きく受ける。そこで、TT 方式の利用を想定する照明環境(一般のオフィス環境における照明環境)のもと、プリンタ (Canon 社製 PIXUS 990i) を用いて印刷したカラーチャートをカメラ (Point Grey Research 社製 IEEE1394 FLEA2) を用いて撮影し、オフィス環境における照明環境下でのプリンタとカメラを介した際の色再現特性を求めた。図 5 に、このカラーチャートの対応のイメー

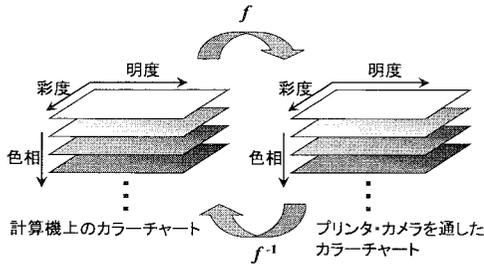


図5 カラーチャートの対応

ジ図を示す。

3.2. 色相変化の傾向の調査

次に、前節で述べた方法で得られたプリンタ・カメラを通した際のカラーチャートをどれだけ安定して色相方向に識別することが可能なかの調査を試みた。ここで目指す色相方向への識別は、カラーチャート内の色の彩度及び明度の値に依存せず、もとのカラーチャートの色相の値が同じ色は全て同色であると識別するというを意味する。調査の結果、彩度や明度の値が小さいときは、 f によって色相の値も大きく変化する傾向が見られた。そこで、256階調で彩度の値が128以上かつ明度の値が128以上の場合に限定して調査したところ、プリンタおよびカメラを介した際の色相変化の影響も小さく、TT方式の利用を想定する照明環境の下で、安定して色相方向に色を分割して、それぞれを別の色であると認識することができた。その際の色相環の分割結果を図6に示す。図6中の破線で区切られた領域を彩度や明度の値に依存せず安定して色相方向に13色に分割することができた。これをもとに現実環境中の彩度・明度ともに高い色を安定して13色に分割することができる。この分割結果はカメラ及びプリンタに依存するため、異なるデバイスを利用する際には、同様に傾向調査を必要とする。

3.3. マーカ色決定アルゴリズム

256階調で彩度の値が128以上かつ明度の値が128以上の場合におけるマーカの色を決定するアルゴリズムを示す。まず、マーカを設置したい領域をカメラで撮影し、その色に最も近い色をプリンタ・カメラを通したカラーチャートの中から探す。次に、そのカラーチャート内で色相の値が同じで彩度および明度が異なる色の中からユーザがマーカ色を選ぶ。マーカ色が決

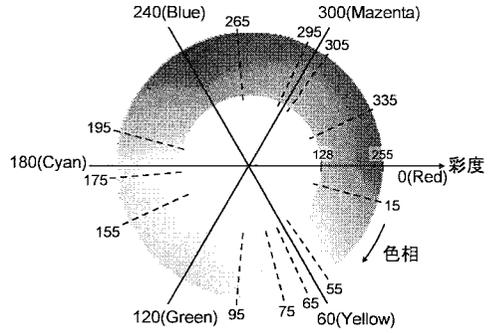


図6 色相環の分割

まったら、逆写像 f^{-1} で求められるその色に対応する計算機上のカラーチャートの色を印刷する。これにより、カメラ・プリンタの色再現特性を考慮した上で、背景色と色相がほぼ同じで明度および彩度が異なる若干色のマーカを設置することができる。

本方式では、図6に示す色相環の分割結果において、破線で区切られた部分を色相が異なると判断する。すなわち、破線で区切られた13の領域において、同じ領域の2色はロバストに異なる色であると識別することができないので、マーカ・エレメントの形状によって識別する必要がある。

4. マーカ・エレメントの細分化による認識可能ID数の増加

2.3節で述べたように、4種類のマーカ・エレメントを組み合わせた際の、識別可能なマーカ・ユニットのIDの総数は60であり、決して十分な数であるとは言えない。本節では、頂点数によりL字型、I字型、直角三角形に分類されたマーカ・エレメントを、さらに辺の長さをもとに細分化して、識別可能なマーカ・ユニットのIDの総数を増加させることを試みる。

4.1. マーカ・エレメント細分化の処理手順

マーカ・エレメントの細分化処理を含む処理の流れの詳細を図7に示す。細分化を行う場合、図3の処理手順の中の頂点数をもとにマーカ・エレメントの候補領域をL字型、I字型、直角三角形の3種類への分類を行った後、(2)マーカ・ユニット検出のステップで、データベースに登録されている。マーカ・ユニットであると確認された後、マーカ・ユニットに逆射影変換を行いカメラに正対させる。最後に、辺の長さを利用

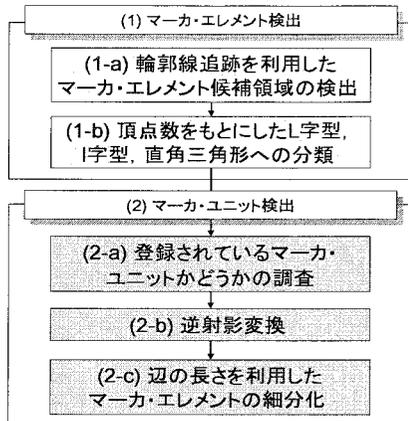


図7 マーカ・エレメント細分時の処理の流れ

したマーカ・エレメントの細分化を行う。これにより、辺の長さによって細分化されたマーカ・エレメントを識別できるので、識別可能なマーカ・ユニットの ID の総数の増加が実現する。

4.2. マーカ・エレメント細分化の識別精度の評価実験

前節で述べたマーカ・エレメントの細分化を実装したシステムにおいて、ひとつのマーカ・ユニットを構成する4つのマーカ・エレメントのうちの1つを、辺の長さの情報を変えて複数のマーカ登録を行い、これらを正しく識別できるかを調査した。

辺の長さの微小な違いを許すと誤認識が頻繁に発生すると考えられるため、辺の長さをマーカ・エレメントの幅の整数倍に限定して実験を行うことにした。計測には、キャビネットに設置した左上から時計回りにL字型、L字型、I字型、I字型の構成のマーカ・ユニットを用い、マーカ・ユニットの幅、高さはそれぞれ210mm、297mmのA4サイズである。実験は左上のL字型のマーカ・エレメントに縦40mm横40mm太さ20mmから縦80mm横80mm太さ20mmまで、辺の長さを変えた9パターンを用意し、マーカ・ユニットのうち左上のマーカ・エレメントのみを張り替えて行った。図8に実験に使用したマーカ・ユニットおよび実験風景を示す。また、実験に用いたマーカ・エレメントのパターンを図9に示す。9つの形状のパターンにはそれぞれ①～⑨と番号をつける。本実験の際のカメラとマーカ・ユニットの距離は1700mmで固定して、

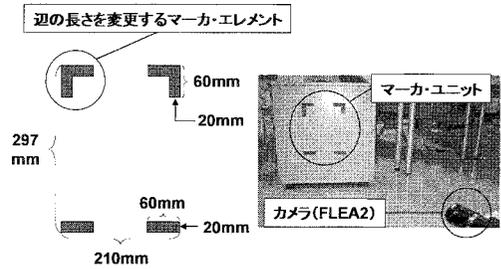


図8 使用したマーカ・ユニットと実験環境の様子

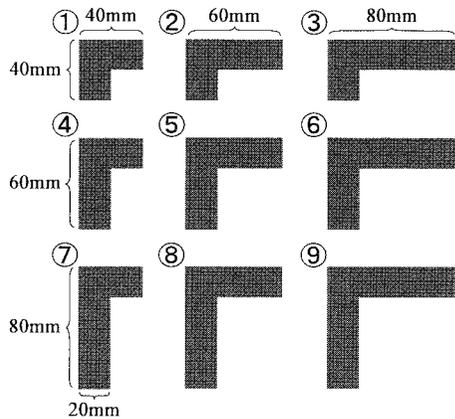


図9 実験に用いたL字型マーカ・エレメントの形状のパターン

カメラの光軸とマーカ設置面の法線がなす角を 0° から 70° まで 10° ずつ変化させ、認識率を測定した。認識率は、マーカ・ユニットの検出に成功した100フレームにおいて、マーカ・ユニットの四隅の点を用いて逆射影変換を行い、何フレームで現在貼ってあるマーカ・エレメントを含むマーカ・ユニットとして認識できたかを調べた。実験結果を表1に示す。本実験結果から分かるように、どの角度からの結果も、ほぼ確実に9種類のマーカ・エレメントを識別できていたことがわかる。マーカとカメラの距離を変化させて同様の実験を行ったが、マーカ・ユニットの検出に成功したフレームでは、ほぼ確実に9種類のL字型マーカ・エレメントの識別が行えたことがわかった。これより、本節で提案した辺の長さをもとにマーカ・エレメントを細分化する手法の有効性が示された。なお、マーカ・エレメントの細分化処理を行わないとき、すなわち図7の(2-b)、(2-c)の処理を行わないときの1フレーム

表 1 細分化した L 字型マーカ・エレメントの
識別率

		カメラの光軸とマーカ設置面の法線のなす角 [°]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
左上のマーカエレメントの形状	①	100	100	100	100	100	100	100	100
	②	100	100	100	100	100	100	100	100
	③	100	100	100	100	100	100	100	100
	④	95	100	100	100	100	100	100	100
	⑤	100	100	100	100	94	100	100	100
	⑥	100	100	100	100	100	100	100	100
	⑦	100	100	100	100	99	100	100	100
	⑧	100	100	100	100	100	100	100	100
	⑨	100	100	100	100	100	100	100	97

の平均の処理時間は 55msec であったのに対して、細分化処理を行ったときの平均の処理時間は 89msec であった。ここで、入力画像の解像度はどちらも VGA である。

5. むすび

本稿では、第 1 報で報告した「美観と頑健性を両立させた半人為的マーカ」の 1 つである「ツートンカラー方式」について、カメラ・プリンタの色再現特性の調査を行い、一般照明環境下で色相環を彩度や明度の値に依存せず 13 色に分割することができた。また、既存の形状パターンの細分化を行い、マーカの ID 数の増加を実現した。さらに、形状パターンの細分化に関して実験を行い、マーカ・ユニットを正しく検出できる範囲内において、辺の長さが整数比のマーカ・エレメント 9 個すべてを判別することができた。

今後は、影や照明条等に影響を受けにくい、よりロバストなマーカ検出を行えるアルゴリズムへの改良や、美観を考慮した配置則の検討、本システムの利用をより簡便なものにするマーカ作成支援ツールキットの開発等を行う予定である。

謝 辞

本研究にご協力頂いた井上貴博氏に感謝の意を表す。本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(B) No.17300039）及びハイテク・リサーチ・センター整備事業の支援によるものである。

文 献

[1] 田村秀行, 大田友一: “複合現実感”, 映像情報メ

ディア学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 266 - 272, 1998.

- [2] 「複合現実感」特集, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, 1999.
- [3] 「複合現実感 2」特集号, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, 2002.
- [4] 「複合現実感 3」特集号, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, 2005.
- [5] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: “複合現実感における位置合わせ手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 171 - 180, 2003.
- [6] 神原誠之, 横矢直和: “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム”, 画像の認識・理解シンポジウム 講演論文集, pp. 933 - 938, 2005.
- [7] “ARToolKit”:
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [8] 加藤博一, M. Billingham, 浅野浩一, 橋啓八郎: “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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607 - 616, 1999.
- [9] 石川高志, 全炳東: “画像処理を用いた屋外 AR システムのための高精度定位”, CVIM-148, pp. 181 - 188, 2005.
- [10] 大江統子, 佐藤智和, 横矢直和: “幾何学的位置合わせのための自然特徴点ランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 285 - 294, 2005.
- [11] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: “ウェアラブル拡張現実感のための不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 295 - 304, 2005.
- [12] 吉田友祐, 天目隆平, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “美観と頑健性を両立させた複合現実感用半人為的幾何位置合わせマーカの研究 (第 1 報)”, 電子情報通信学会 技術研究報告 Vol. 106, No. 470, PRMU2006-195, pp. 7 - 12, 2007.