

# 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)

吉田 友祐<sup>†</sup> 天目 隆平<sup>‡</sup> 柴田 史久<sup>†</sup> 木村 朝子<sup>†</sup> 田村 秀行<sup>†</sup>

<sup>†</sup>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

<sup>‡</sup>立命館大学総合理工学研究機構

E-mail: yoshida@mclab.ics.ritsumeai.ac.jp

**あらまし** 複合現実感システムで現実・仮想両空間の幾何学的整合のために用いるマーカは、これまで検出・同定しやすい人工的なパターンが用いられてきた。こうしたマーカの利用が美観を損ねているとの苦情・批判も少なくない。本研究では「美観と頑健性を両立させた半人為的マーカ」の利用を推奨し、そのようなマーカ・セットの場合に応じて使い分けることを提唱する。その第一歩として、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」を考案したので、そのデザインと幾何位置合わせを試みた結果を報告する。

**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 (1)

Yusuke YOSHIDA<sup>†</sup> Ryuhei TENMOKU<sup>‡</sup>

Fumihisa SHIBATA<sup>†</sup> Asako KIMURA<sup>†</sup> and Hideyuki TAMURA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

<sup>‡</sup> Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University

E-mail: yoshida@mclab.ics.ritsumeai.ac.jp

**Abstract** Artificial patterns which can be detected and identified easily have been used for geometric registration of real and virtual worlds in Mixed Reality. However, there are quite a lot of claims that these fiducial markers destroy the scenery. In this paper, we propose “visually elegant and robust semi-fiducial markers”. As the first step, this paper describes “two-tone marker system” which uses similar colored markers with that of background objects and some experiments.

**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、設計・製造・建設等の分野で実用され、新しい情報提示技術として注目を集めている[1-4]。MR システムでは「幾何学的」「光学的」「時間的」の3つの整合性の達成が望まれているが、なかんずく仮想物体を実世界に正しく重畳させるための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来た[5]。

MR における位置合わせ手法は、(a)物理的な位置姿勢センサを用いる手法、(b)マーカを配置し、画像認識する手法、(c)上記の両者を併用するセンサのハイブ

リッド手法、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法が採用されているが、(b)(c)では、安定性・簡便性・コスト面等の理由から、同心円や正方形の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。

とりわけ、ARToolKit[6,7]は完成度が高く、オープンソースで移植性が高いことから、広く世界中で用いられている。しかしながら、オフィスや屋外等、共用の広域環境では Fiducial と呼ばれる不粋な人為的マーカを至る所に貼り付けることは、美観を損ねるものと批判する声も少なくない。

これを解消する方法として人為的マーカを設置す

るのではなく、実環境中の自然特徴を用いる試みもなされている[8,9]。しかし、安定性や処理速度等の問題のため実利用は困難である。一方、再帰性反射材で作成した景観を損なわないマーカを使用する手法も提案されている[10]。赤外光を照射したマーカを赤外線カメラで撮影することで、肉眼では視認しにくい再帰性反射材も認識可能となる。自然特徴を用いた手法と比べ能力は高いが、赤外線カメラの使用が前提となる為、使用端末が限定され、普及の妨げとなっている。

また、位置情報を埋め込んだデザイン性に優れた模様をマーカとして部屋の内装に施す位置合わせ手法も提案されている [11]。この手法で提案されているマーカは、ユーザに位置姿勢計測システムを意識させないながらも、壁や床一面にマーカを設置するため元の環境からの変化が大きく、用途が限られる。

これらの手法に対して、我々は美観を損ねず、環境に溶け込んだマーカを手軽に利用する方法を提唱する。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、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ことを目的としている。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、目立たないよう符号化された記号群の意]と総称する。

本稿では、その研究の第一歩として、マーカ設置箇所と同系色のマーカ群を用いる「ツートンカラー方式」によって位置合わせを行った結果を報告する。

## 2. ツートンカラー方式の概要

ツートンカラー方式による位置姿勢検出のイメージ図を図 1 に示す。これは、什器や壁などの隅に、背景色と同系色で濃度が異なる複数のマーカを配置し、これを検出する方式である。個々のマーカの形状は環境中に設置しても視覚的に違和感を覚えない単純な形状が望ましい。

例えば、位置合わせ対象となる領域中に存在する棚やファイルキャビネット等を利用する場合は、その

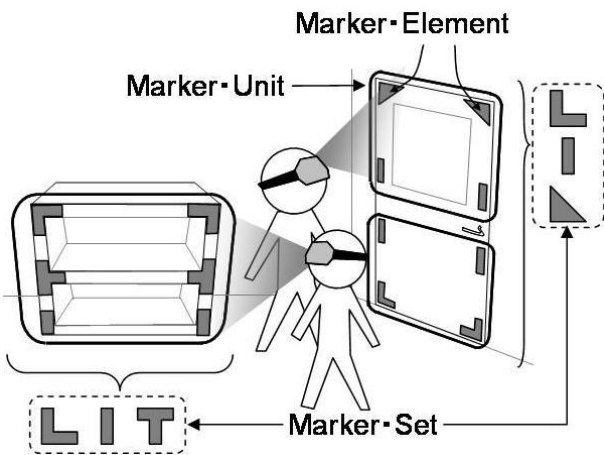


図 1: 「ツートンカラー方式」のイメージ図

隅にさりげなく設置できるような L 型や I 型, T 型等のマーカが考えられる。設置箇所によっては L, I, T に加えて▲型等も利用できると思われる。このように、設置箇所や利用用途に応じて望ましいマーカ形状は変化する。状況に応じて利用できる形状を次々と挙げていくと際限がないので、いくつかの形状に限定して議論を進める。

ここで、本方式におけるマーカに関する用語を以下のように定義する。

- ・マーカ・エレメント  
回転系, 鏡像系を含めた L, I, T, ▲等の印. 個々のマーカのことであり, 位置姿勢検出を行う為の要素となる。
- ・マーカ・ユニット  
複数のマーカ・エレメントの配置によって構成される位置姿勢決定の単位. 構成要素の形状及び色系統の組み合わせによって ID を識別する。
- ・マーカ・セット  
アプリケーションや環境毎に定義されるマーカ・エレメントとして利用可能な形状の集合。

## 3. 構築システム

本手法による位置合わせの第一歩として、環境中に多く存在する扉や棚の側面等の平面上の長方形における位置合わせ手法を構築した。

### 3.1. マーカ形状とマーカ配置則

四角形平面にマーカを設置するので、その 4 隅にマーカを設置するのが望ましい。よって、マーカ・ユニットは 4 つのマーカ・エレメントで同一平面上に長方形を形成するよう配置する。そして、どの角度から見ても一意にマーカ・ユニットの回転系を識別できる構成にする必要がある。つまり、同じ形状の 4 つのマーカ・エレメントでは、マーカ・ユニットは構成されない。マーカ・セットは長方形に沿って配置可能な L 型・I 型・▲型 (直角三角形) で構成される。ただし、マーカ・ユニットを構成する際に I 型は回転系に応じて 2 種類に分類可能な為、4 つの要素の組み合わせでマーカ・ユニットが構成される。マーカ・ユニットの構成法を図 2 に示す。

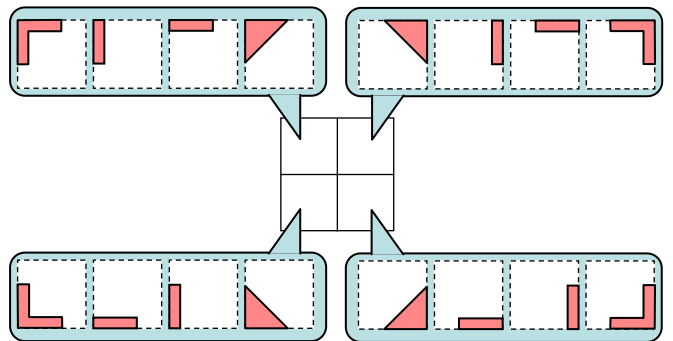


図 2: マーカ・ユニットの構成法

### 3.2. マーカ検出に用いる色情報

本方式のマーカの識別には、設置箇所とマーカとの同系色判定及び濃度の識別が必要である。コンピュータでよく用いられる色空間は RGB 色空間であるが、マンセル表色系などの顕色系で使われる色相 (H:Hue), 彩度 (S:Saturation), 明度 (I:Intensity) の方が、色系統や濃度を調べやすく直感的である。色系統は色相と彩度から決定され、濃度は明度から決定される。色相は有彩色の色系統を分類するのに適しており、彩度は有彩色と無彩色を識別するのに適している。これにより、赤・緑・青といった有彩色や灰色など全ての色系統を分類できる。そこで、原画像の RGB 値を HSI 値に変換して扱う。

RGB と HSI の関係は非線形であるが、近似して線形に対応付けるモデルがいくつか考案されている [12]。代表的なものは六角錐モデル及び双六角錐モデルであり、それぞれ一般的には HSV や HSL と呼ばれている。どちらのモデルを採用するかの指針として予備実験を行った。照度を変更しながら複数色の色紙の RGB 値を計測して両モデルにおける HSI 値に変換した。色の補正等を行わず、用いたカメラ、物体までの距離等の条件は全て同一である。両モデルにおいて色相は同一であり、彩度に関してはどちらも良好な結果が得られた。ただし、明度に関してはどちらのモデルにおいても明るくなるにつれ高くなるが、六角錐モデルは多くの色が通常照明下でも最大階調に達してしまっただけでなく、多くの照明環境で利用できる。そこで本手法では、HSI 双六角錐カラーモデルによる変換を採用する。

色系統の分類に関しては、あらかじめ用いる色ごとに様々な照明環境下でその色を表す色相・彩度の範囲を登録しておき、各ピクセルの色相・彩度がその中に含まれるかどうかで分類する。HSI 色空間では明度が最大階調もしくは最小階調に近い色 (白, 黒) は全ての色系統 (色相, 彩度) に分類されるが、RGB→HSI の変換式によって求まる値に従うものとする。

### 3.3. 処理内容

本システムの処理の流れを図 3 に示す。まず、マーカ・エレメントの検出処理を行い、検出されたマーカ・エレメント群からマーカ・ユニットの検出を行う。そして、登録されているマーカ・ユニットの情報を元に位置姿勢検出を行う。図 3 におけるそれぞれの処理についての詳細を以下に示す。

#### ・画像全体を走査してマーカ・エレメント検出

入力された画像に対してラスタ走査を行い、同系色と判断された隣接ピクセルにおいて、濃度差が一定の閾値を超えていた場合そのピクセルを開始点

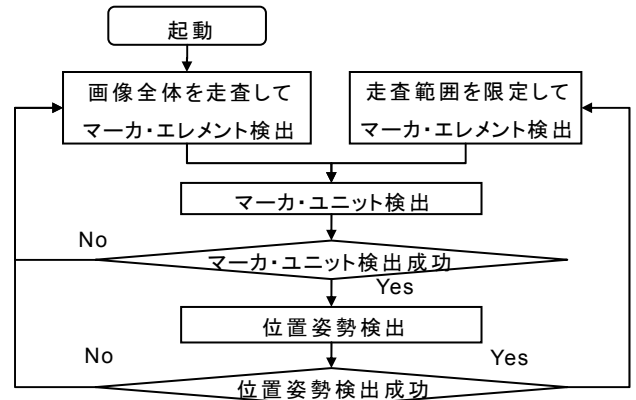


図 3 : 処理の流れ

として輪郭線追跡を行う。事前に色系統毎に、対象領域のマーカに対する濃度の高低を登録しておき、それに基づいて、隣接ピクセルのどちらを開始点とするかを決定する。また、開始点となる隣接ピクセルの平均濃度が、輪郭線追跡をする際の輪郭条件の境界となる。濃度及び色系統の両条件を満たすピクセルに対して輪郭線追跡を行う。輪郭線追跡中に、画像境界及び他の輪郭線、現在追跡中の輪郭線に接した場合、輪郭線追跡を終了する。輪郭線追跡が、開始点に戻ってきた輪郭のみをマーカ・エレメントの候補として形状を調べる。マーカ形状は、取得された輪郭線の頂点を検出して、その頂点数及び各頂点における輪郭線の形から識別する。

#### ・走査範囲を限定してマーカ・エレメント検出

前フレームで位置姿勢検出に成功した時は、走査範囲を限定して処理速度の向上を図る。前フレームで検出されたマーカ・エレメントは、その外接長方形領域のみを走査する。一方で、複数のマーカ・ユニットを設置している時は、前フレームでは検出されなかったマーカ・エレメントが写りこむこともありえるので、位置姿勢情報より透視投影変換を行い、その周辺領域を走査する。マーカ・エレメントの検出処理は、画像全体を走査する時と同様の処理である。輪郭線追跡によりマーカ検出を行っている為、走査領域の一部でもマーカ領域と重なっていたら検出が可能となる。

#### ・マーカ・ユニット検出

検出されたマーカ・エレメントからマーカ・ユニットを形成しうる組み合わせを選ぶ。まず、本手法で用いているマーカ配置則に従って同一平面上に長方形を形成するように配置されているかの判定を行う。イメージ図を図 4 に示す。まず最初に 4 つのマーカ・エレメントが長方形を形成していると仮定して、その頂点を求める。各マーカ・エレメントの重心  $E_{ci}$  を求め、それらの中心を長方形の擬似重心  $C$  とする。そして、各マーカ・エレメントにお

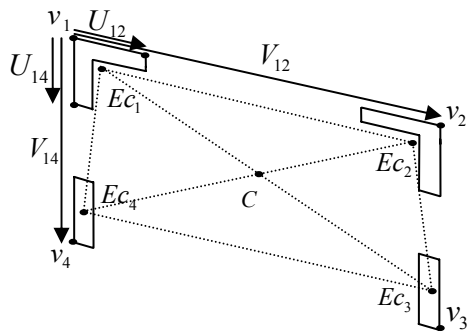


図 4：4つのマーカ・エレメントの長方形判定

いて、 $C$ より最も距離のある頂点を求め、それぞれをマーカ・ユニットの頂点  $v_i$  と仮定する。マーカ・ユニットの頂点と仮定された点から、マーカ・ユニット内で隣接する頂点  $v_j$  への方向ベクトルを  $V_{ij}$  とし、マーカ・エレメント内で隣接する頂点への方向ベクトルを  $U_{ij}$  とする。マーカ・ユニットの各頂点において、 $V_{ik}$  及び  $U_{ik}$  の方向成分がほぼ一致する時、これら4つのマーカ・エレメントの組み合わせはマーカ・ユニットを形成するための配置則を満たしているとする。4つのマーカ・エレメントの組み合わせが配置則を満たしている場合、それぞれのマーカ・エレメントの位置関係が登録されているマーカ・ユニットと一致するかを判定する。

・位置姿勢検出

本手法では、世界座標系、マーカ・ユニット毎に存在するマーカ座標系、カメラの焦点位置を原点として画像平面に垂直な方向をZ軸とするカメラ座標系、撮影画像中での位置関係を表すスクリーン座標系を用いる。世界座標系とマーカ座標系の変換行列は事前に登録しておき、カメラ座標系とスクリーン座標系の変換行列であるカメラの内部パラメータは求めておくものとする。

これまでの処理により、マーカ座標系とスクリーン座標系におけるマーカ・ユニットを形成する4頂点の座標は既知である。これらの対応関係より、マーカ座標系とカメラ座標系における変換行列を求める[7]。スクリーン座標系における4頂点の座標から向かい合う2辺の直線が2組得られる。この2組の平行な直線よりカメラの姿勢推定を行う。姿勢が求まると、マーカ座標系とスクリーン座標系における4頂点の対応関係よりカメラ位置が求まる。その後、山登り法により回転成分を修正して、位置成分を更新する。最後にあらかじめ登録されている世界座標系とマーカ座標系による変換行列を元に、世界座標系におけるカメラの位置姿勢を求める。

4. マーカ設置

4.1. マーカの濃度

マーカとその設置箇所間にどれぐらいの濃度差が

あれば本方式で安定した検出が行えるかを調べるため、予備実験を行った。

4.1.1. 濃度差調査のための予備実験

本実験では、マーカ及びカメラを固定して、背景領域に対するマーカの濃度差を変更しながらマーカ・エレメントの認識率を計測した。複数の色系統において、背景領域の濃度を3段階で変更しながら、それぞれの背景色に対して安定したマーカ検出を行う為のマーカの濃度を調べた。背景領域・マーカ共にインクジェットプリンタで印刷したものを使用した。計測方法は、一辺60mm太さ20mmのL型マーカに対して垂直方向に900mmの位置にカメラを設置して、まっすぐ焦点を合わせた状態でマーカが画像中心になるよう撮影して、100フレーム中で何フレーム正しくマーカを認識できたかを調べた。照明条件は、全ての計測において同一である。濃度は撮影画像より計測しており、カメラはELECOM社製のUCAM-N1D30MBKを用いた。

計測を行った全ての色系統、背景領域の濃度においてほぼ同一の結果が得られ、その結果、背景領域とマーカに256階調中24階調以上の濃度差があれば安定した認識が行えることが分かった。実際の実什器にマーカを設置する時は、光の強弱によって設置箇所とマーカの濃度差は変化する為、照明環境による濃度変化を考慮してマーカ色を決定する必要がある。

4.1.2. 実環境における結果検証

予備実験の結果を元に、図5のような金属製の棚に利用環境下で常に濃度差24階調以上のマーカを設置して、マーカの外枠にワイヤーフレームを重畳した。結果として、影などがほとんどない様な照明環境では安定した検出が行えた。しかし、カメラの焦点のずれや、マーカに影が重なることで検出が行えなくなること度も度々あった。隣接ピクセルの平均値を閾値とした輪郭線追跡によりマーカ検出を行っている為、マーカと設置領域のエッジがぼやけることや、対象領域の濃度が様でないことが安定した検出が行えない原因であるといえる。図6のように対象領域に対する濃度差をはっきりとつけることで検出は安定するが、美観と頑健性のトレードオフを利用者が見極める必要があるといえる。

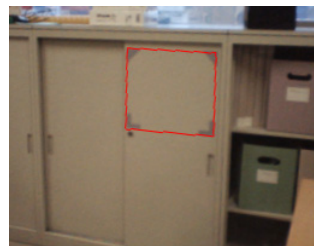


図 5：濃度差の少ないマーカを用いた実行例

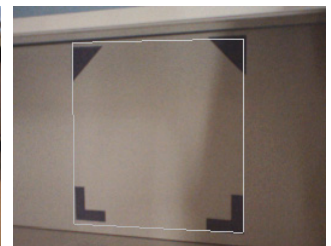


図 6：濃度差の大きいマーカを用いた実行例

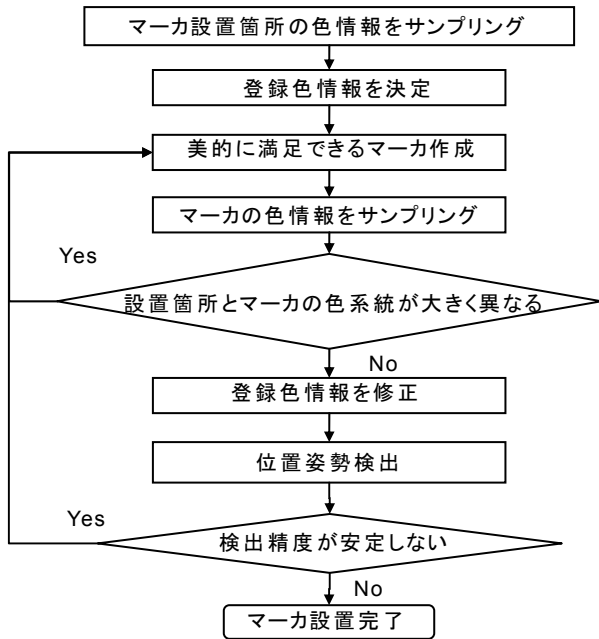


図 7：マーカ設置の手順

## 4.2. マーカ設置方法

美観と頑健性はトレードオフであり、利用者がその用途や環境に応じて見極める必要がある。また、カメラ毎で自動焦点調節機能の有無やノイズの出やすさ、撮影画像の色身等の違いがある為、マーカ検出精度や登録色情報が異なる。よって、マーカを設置する時は、実際に用いるカメラでマーカ色を決定する必要がある。その上で、色系統が設置箇所とできる限り近く、美観と頑健性の両方で満足する濃度のマーカ色に近づける。マーカ設置の手順を図 7 に示す。

## 5. 実用に向けた性能評価実験

本システムが実利用に耐えうる性能があるかを評価するためにマーカの認識率及び位置姿勢の計測精度を、カメラとマーカの位置関係を変化させながら計測した。また、実什器にマーカを設置し、本手法の処理速度を計測した。

### 5.1. マーカ計測精度

マーカの計測精度を評価するために、[7]で行われている実験と同様に、マーカ・ユニットの中心とカメラ間の距離及びカメラの光軸とマーカ面がなす角度を変えながら、計測値を記録した。図 8 のように棚などに使われる金属製の板に一边 60mm、太さ 20mm の L 型マーカを 2 つと、一边 60mm の ▲ 型マーカ 2 つをマーカ・ユニットの一边が 300mm の正方形になるように設置して、マーカ・ユニットが画像中心に写るようにカメラを設置した。マーカ及び設置箇所は図 6 と同一の素材・色であり、カメラは予備実験で用いたものと同じである。カメラとマーカが向かい合った際にマーカ・ユニットが画像中に納まる限界の距離である 600mm から 100mm ずつ離し、カメラがマーカに正対



図 8：実験風景

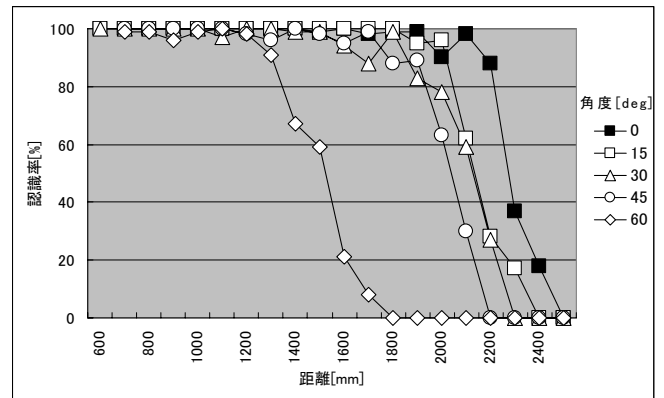


図 9：マーカ・ユニット認識率

する状態から 0, 15, 30, 45, 60 度の角度をつけてマーカを撮影した。各試行において 100 フレーム分のマーカ・ユニットの認識率と 100 回の計測におけるカメラの光軸方向の姿勢の誤差と位置の誤差の平均値を計測した。マーカの認識率の結果を図 9 に示す。マーカとカメラの距離が 600mm でマーカの法線とカメラの光軸がなす角が 45 度および 60 度の時はマーカ・ユニットが画面に収まらなかったため、認識率の計測は不可能であった。認識が行えた地点における光軸方向の誤差及びカメラ位置の誤差をそれぞれ図 10, 図 11 に示す。カメラの光軸とマーカ面の角度が鈍角になると検出されたマーカの形状が変化する為、認識率が急激に低下したが、45 度以内ならマーカから約 2000mm の距離まで位置姿勢検出が行えた。距離に応じて誤差が増していくが、カメラとマーカ間が 1500mm の地点で約 5 度の方向の誤差と約 50mm の位置の誤差があった。マーカは、仮想物体を重畳する実什器や扉などに美観を損ねずに設置することを想定としており、カメラとマーカの距離はおおよ手の届く距離から一步離れた距離までの範囲を想定している。本実験においては、マーカから 1500mm の距離での画像中のマーカ領域の面積比は約 0.6% であり、従来の人工マーカと比較して十分に目立たずに設置可能なことから、想定する距離において数十 mm、数度以内の精度は満足できるものと考えられる。さらに遠くから位置姿勢検出が行いたい場合は、より大きなマーカや濃度差の大きいマーカ・

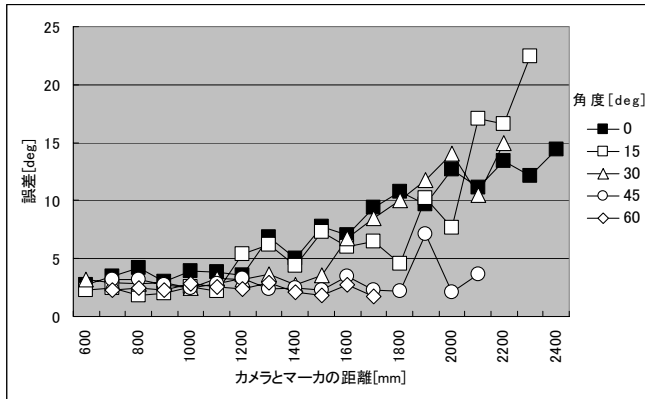


図 10：カメラの光軸方向の姿勢の誤差

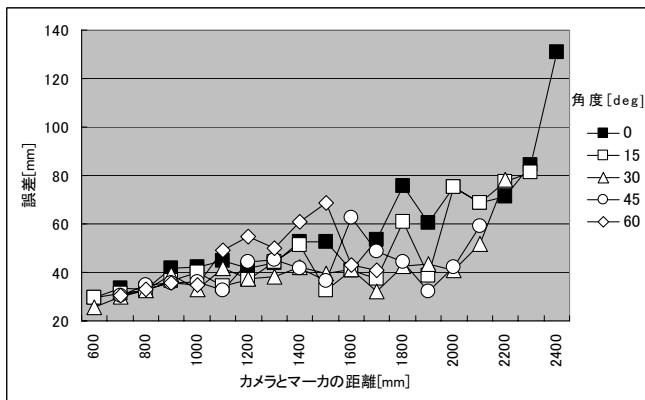


図 11：カメラ位置の誤差

エレメントを用いることで解消できるが、美観とのかねあいを考慮する必要がある。

## 5.2. 処理速度

図 12 のようなキャビネットの側面にマーカを設置してあらゆる角度から眺めた際の処理時間を計測した。使用端末は、DELL DIMENSION 8300 で、CPU は Intel Pentium 4 2.80 GHz、メモリは 1GB である。カメラは、ELECOM UCAM-N1D30MBK で、画像サイズは QVGA である。本手法で位置姿勢検出にかかる時間は平均 20.39ms であった。3 章で示したように通常は画像を全走査してマーカ検出を行うが、前フレームで位置姿勢検出に成功した時は探索範囲を限定することで処理速度を向上させている。全走査時と限定走査時それぞれの処理時間は、38.07ms と 13.48ms となっている。全走査の処理速度でもリアルタイム処理を行う上で十分な速度であると言える。

## 6. むすび

本稿では、複合現実感分野での「美観と頑健性を両立させた半人為的マーカ」の導入を提唱し、これを SFINCS と総称した。その具体的事例の第一歩として、「ツートンカラー方式」のマーカを考案し、その検出能力、位置合わせ精度に関する実験を行って、実用に耐える精度及び速度で動作することを確認した。

今後は、SFINCS の第 2 段となる新たなマーカの提

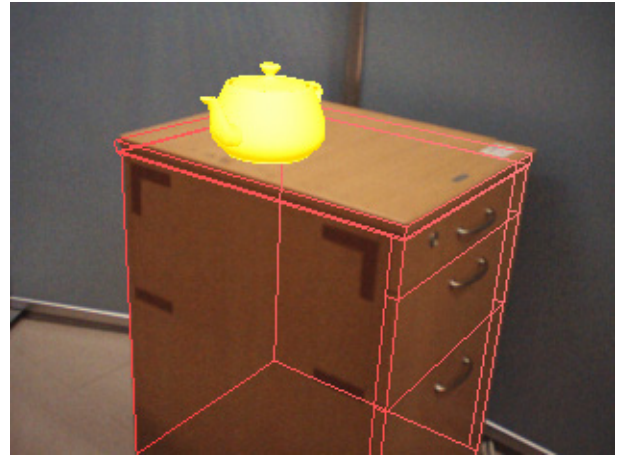


図 12：実行結果

案を行うと共に、本手法の改良も行っていく。具体的には、よりロバストなマーカ検出が行えるためのアルゴリズムの改良や、美観を損なわないマーカ配置則についての検討を行う。また、T 型や + 型などのマーカ・エレメントの追加や、実際に本方式を利用したアプリケーションの開発も行う予定である。

## 謝 辞

本研究の実験にご協力頂いた杉澤妙子氏に感謝いたします。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] 「複合現実感」特集号，日本バーチャルリアリティ学会論文誌（TVRSJ），Vol.4, No.4, 1999.
- [2] 「複合現実感 2」特集号，同上，Vol.7, No.2, 2002.
- [3] 「複合現実感 3」特集号，同上，Vol.10, No.3, 2005.
- [4] S.K.Feiner（田村秀行訳）：“複合現実感がひらく第 3 の視界”，日経サイエンス，2002 年 7 月号，pp.40-49.
- [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] 加藤博一他：“マーカー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”，同上，Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- [7] <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [8] V.Lepetit et al.：“Fully Automated and Stable Registration for Augmented Reality Application,” Proc. Int. Symp. On Mixed and Augmented Reality(ISMAR 2003),pp.93-102,2003.
- [9] 大江統子他：“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.
- [10] 中里祐介他：“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”，同上，Vol.10, No.3, pp.295-304, 2005.
- [11] 齊藤滋他：“コード化した模様を内装に施した屋内における位置同定システム 第 2 報”，日本 VR 学会第 11 回大会論文集，pp.498-501, 2006.
- [12] 高木幹雄，下田陽久編：“新編 画像解析ハンドブック”，東京大学出版会，2004.