

# 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 8 報) ～TT 方式における ID 表現法 MOJI-Code の実現～

Visually Elegant and Robust Semi-Fiducials for Geometric Registration in Mixed Reality (8)  
- Development of An ID Assignment Method "MOJI-Code" for SFINCS-TT Markers -

茂地頭一郎, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行

Kenichiro Moji, Fumihisa Shibata, Asako Kimura and Hideyuki Tamura

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

**Abstract:** This paper describes a development of image-based geometric registration method using semi-fiducial markers in mixed reality (MR). Our proposed markers, “two-tone similar colored markers” have the following characteristics: 1) color similar to that of the background object, 2) placed at the corners of real objects in an inconspicuous manner. Each marker-unit, which is used for geometric registration, consists of some small marker-elements whose shapes are different, and a unique ID is assigned to the marker-unit. We named this ID assignment method for SFINCS-TT “MOJI-code”. In this paper, we tried to find out the aggregate number of ID and conducted the experiment in which we found the recognition rate of the marker-units for developing effective ID assignment.

**Key Words:** mixed reality, semi-fiducial markers, id,

## 1. はじめに

現実世界の光景に仮想世界を継ぎ目なく融合する複合現実感 (Mixed Reality ; MR) では, 仮想物体を現実世界の正しい位置に重畳描画する位置合わせが最も重要な課題である。これは幾何学的整合性の問題と呼ばれ, 解決するための様々な手法が提案されている[1]。この手法の 1 つとして, 人為的マーカをカメラで撮影し, カメラ画像中のマーカの位置や形状からカメラの位置姿勢を推定するマーカベース手法がある。ARToolKit[2]に代表されるこの手法は安定性・簡便性・コストなどの理由で, 現在の主流となっている。しかしながら, 人為的マーカを利用して広域環境での位置合わせを実現しようとする, 環境中に多数のマーカを貼付することになり, 美観を損ねてしまう。

そこで我々は, 半人為的/準恣意的にデザインした環境に溶け込んだマーカを用いることで, 美観と位置合わせ能力の頑健性の両立を目的とする位置合わせ手法を提案した。我々はこの手法を SFINCS (Semi-Fiducial INvisibly Coded Symbols) [半人為的, 目立たないように符号化された記号群の意] と総称し, 対象領域の隅に対象領域と同系色のマーカを設置する「ツートンカラー方式 (Two-Tone colored marker 方式, 以下, TT 方式)」を提案・実装した[3]。

TT 方式は設置箇所と同系色の小型マーカ (マーカ・エレメントと呼ぶ) の組で 1 つのマーカ (マーカ・ユニットと呼ぶ) を構成し, これを位置合わせに用いる。ID はこのマーカ・ユニットに対して与えることになるが, それぞ

れのマーカ・ユニットへの体系立った ID 付与の方法はこれまで特に議論せずに行った。そこで我々は, マーカへの ID 付与の体系を「MOJI-Code」と総称し, 2 種類の考え方に基づいた ID 付与体系の構築を行い, 付与可能なマーカの総 ID 数を整理した。また, マーカ・ユニットの識別率と識別誤りの内容について分析した。本稿では MOJI-Code および検討した ID 付与の手法について報告する。

## 2. TT 方式

### 2.1 概要

TT 方式は対象領域の隅に対象領域と同系色のマーカ, すなわち実環境と調和のとれたマーカを設置し, 位置合わせに利用する手法である。本方式で位置合わせに利用するマーカは, 単色で構成された実物体の平面に貼付して利用することを想定している。マーカの色は, 対象領域と色相が同じで彩度・明度が異なる色とする。この条件を利用してマーカを入力画像中から検出し, 対象領域の隅に設置した 4 つないしは 6 つのマーカ・エレメントと呼ぶ小型マーカの組み合わせにより ID の識別および, カメラの位置姿勢推定を行う。マーカ・エレメントの組によって構成される位置合わせの単位をマーカ・ユニットと呼び, マーカ・エレメントを 4 つ組み合わせたものを四つ組ユニット, 6 つ組み合わせたものを六つ組ユニットと呼ぶ。これらを図 1 に示す。カメラ画像中のマーカ・ユニットの位置からカメラとマーカ・ユニットの相対的な位置関係を求め, マーカ・ユニットの ID と絶対座標から絶対的なカメラの位置

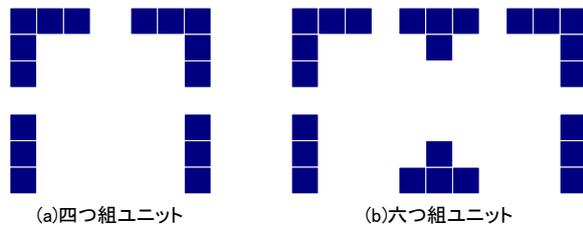


図 1 四つ組みユニットと六つ組ユニット

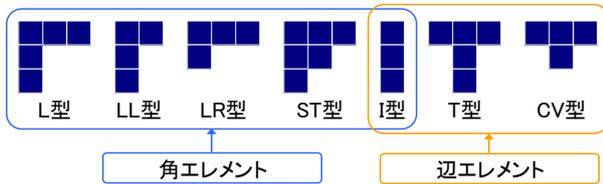


図 2 マーカ・エレメントの分類

姿勢を推定する。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位置合わせ可能なマーカと判定し位置姿勢推定に用いる。

## 2.2 マーカ・エレメントの種類

TT 方式で利用するマーカ・エレメントを図 2 に示す。マーカ・エレメントは、形状ごとに四隅に配置する「角エレメント」と角エレメントの間に配置する「辺エレメント」に分類できる。I 型はどちらにも利用できる共通の形状とする。四つ組ユニットは 4 つの角エレメント、六つ組ユニットは 4 つの角エレメントと 2 つの辺エレメントによって構成する。I 型は設置する向きによって 2 種類に分類して用いることが可能であるため、実質は 8 種類のエレメントが存在することになる。

## 3. MOJI-Code

MOJI-Code (Mobile Oriented Juxtaposable Information Code) とはマーカ・ユニットに固有の ID を付与し、マーカ・ユニットを、意味を持つ一種のコードとして表現する体系の総称である。我々はまず、マーカが一部隠れた場合や誤認識時の誤り訂正機能をもつような ID 付与、符号化体系として MOJI-Code の実現を目指す。

ID を付与する体系として、マーカ・ユニットを構成する全てのマーカ・エレメントにより ID を付与する単体マーカ・ユニット体系と、1 つのマーカ・ユニット中に、構成するマーカ・エレメントの数が少ないマーカ・ユニットを内包する複合マーカ・ユニット体系の 2 体系を検討した。単体マーカ・ユニット体系はより多くの ID を付与することを目指した体系であり、複合マーカ・ユニット体系は冗長な構成を取りマーカ・ユニットの欠損に対応した体系である。なお、六つ組の単体マーカ・ユニットを単体六つ組ユニット、六つ組の複合マーカ・ユニットを複合六つ組ユニットと呼称する。これらを図 3 に示す。これらの体系について以下に付与可能な総 ID 数について述べる。

### 3.1 単体マーカ・ユニット体系

マーカ・ユニットを構成する場合に重要なのは、マーカ・ユニットの回転を識別可能なマーカ・エレメントの配

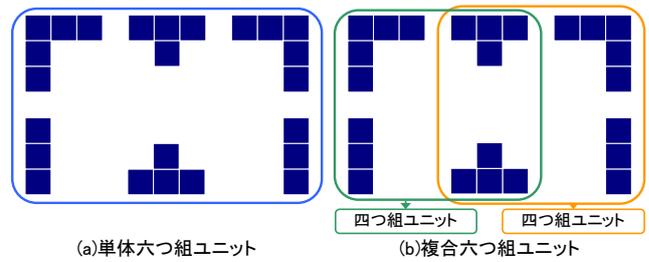


図 3 マーカ・ユニットの体系

置である。カメラの位置姿勢を一意に推定する場合、点対称となる構成のマーカ・ユニットを用いることはできない。

単体四つ組ユニットでは、4 つの角エレメントが点対称とならない配置の組み合わせが利用できる。単体四つ組ユニットの総 ID 数とマーカ・エレメントの種類は式 (1) のように表現できる。

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

(エレメントの種類数 :  $n = \text{角}$ )

単体六つ組ユニットでは、辺エレメントの組み合わせにより利用できる総 ID 数が異なる。2 つの辺エレメントが同一形状の場合、角エレメントが点対称とならない配置に対し、辺エレメントを垂直と水平に配置する 2 つの組み合わせが考えられ、これらと辺エレメントの種類数との積が総 ID 数となる。一方、辺エレメントが異なる形状の組み合わせの場合、辺エレメントによって一意にマーカ・ユニットの回転を識別できるため、角エレメントの組み合わせの総数と辺エレメントの組み合わせの総数の積が ID 数となる。単体六つ組ユニットの総 ID 数とマーカ・エレメントの種類は式 (2) のように表現できる。

$$(\text{総ID数}) = 2 \times m \times \frac{n^4 - (n + {}_n C_2 \times 2)}{4} + {}_m C_2 \times n^4 \quad (2)$$

(エレメントの種類数 :  $n = \text{角}$ ,  $m = \text{辺}$ )

2.2 節で述べた 8 種類のマーカ・エレメントを用いた場合、単体四つ組ユニットの ID 数は 315 個となり、単体六つ組ユニットの ID 数は 10296 個となる。

### 3.2 複合マーカ・ユニット体系

複合マーカ・ユニット体系はマーカ・ユニットの中にさらに小さな構成のマーカ・ユニットを内包するため、2 つの四つ組ユニットを内包する複合六つ組ユニットが最小の構成となる。この場合、辺エレメントは 2 つの四つ組ユニット間で共有する。

複合六つ組ユニットは同一の四つ組ユニットを重複利用しないことで、1 つの四つ組ユニットからこれを含む複合六つ組ユニットを一意に特定可能となる。内包される四つ組ユニットは、角エレメント 2 つと辺エレメント 2 つで構成され、辺エレメントは 2 つの四つ組ユニット間で共有される。この辺エレメントの組み合わせごとに、総 ID 数と同時に利用可能な六つ組ユニット数が異なるため、5 つに場合分けを行い計算する。この計算式の一覧を表 1 に示す。このうち条件(D)の一部と条件(E)は、辺エレメントとして横向きに I 型を配置した際に、各マーカ・エレメントの頂

表 1 複合六つ組ユニットの ID 数と同時利用可能なユニット数

条件		ID 数	同時利用可能な六つ組ユニット数
(A)	2つの辺 エレメントが 同一形状かつ	I型では ない場合 $n^2 C_2 \times (m-l)$	$\frac{n^2}{2} \times (m-l)$
(B)		I型の場合 $n^2_{-1} C_2 + n^2_{-2n} C_2$	$\frac{n^2-1}{2} + \frac{n^2-2n}{2}$
(C)	2つの辺 エレメントが 異なる形状 かつ	I型を 含まない場合 $n^4 \times_{m-1} C_2$	$n^2 \times_{m-1} C_2$
(D)		I型を 1つ含む場合 $(n^2 - \frac{n}{2})^2 \times (m-l)$	$(n^2 - \frac{n}{2}) \times (m-l)$
(E)		2つとも I型の場合	

(マーカ・エレメントの種類数:  $n$  = 角,  $m$  = 辺,  $l$  = I型)

点で四つ組ユニットとしての長方形を構成できないため除外して計算している。

複合六つ組ユニットの総 ID 数は内包される四つ組ユニットを基準に考える。この四つ組ユニットには角エレメントが2つ含まれており、辺エレメントの組み合わせは表1の条件ごとに固定されている。各条件における内包される四つ組ユニットの総 ID 数は角エレメントの種類数の二乗と辺エレメントの組み合わせの総数との積となる。内包される四つ組ユニットから、異なる構成の2つを選び出し組み合わせることで複合六つ組ユニットが完成する。内包される四つ組ユニットは重複して利用しないため、総 ID 数と同時利用可能な複合六つ組ユニットの数は異なる。

2.2 節で述べた 8 種類のマーカ・エレメントを用いた場合、複合六つ組ユニットの総 ID 数は 5605 個となり、そのうち 167 個が同時利用可能となる。

### 3.3 複合マーカ・ユニット体系における欠損への対応

TT 方式では位置姿勢推定の基準としてマーカ・ユニットを用いるため、その要素となるマーカ・エレメントの欠損時にはカメラの位置姿勢は推定できない。しかし、複合六つ組ユニットは 2 つの四つ組ユニットを内包することから、マーカ・エレメントが1つ欠損した場合にも欠損部を復号し位置姿勢の推定が可能である。

角エレメントが欠損した場合、内包される2つの四つ組ユニットの組み合わせが既知であるため、欠損していない四つ組ユニットからこれを内包する六つ組ユニットを特定でき、IDの復号と位置姿勢の推定が可能である。

また、あらかじめ利用する辺エレメントの組み合わせを限定しておくことで、辺エレメントが欠損した場合にも、片方の辺エレメントから欠損した辺エレメントを一意に特定することができる。この場合は4つの角エレメントを用いてカメラの位置姿勢の推定が可能である。

2.2節で述べた8種類のマーカ・エレメントを用いた場合、マーカ・エレメントの欠損に対応した複合六つ組ユニットの総ID数は2314個となり、そのうち68個が同時利用可能となる。

## 4. ID 表現法

ID 表現法とはマーカ・ユニットに何らかの指標を基に表現した文字列(数字列を含む)を ID として対応付け、マ

ーカ・ユニットに意味を持たせることである。換言すれば、マーカ・ユニットのパターンを符号化し固有の ID として付与する手法である。MOJI-Code には単体/複合マーカ・ユニットの 2 種類の ID 付与体系が存在するが、これらについて識別率やマーカパターンなど様々な指標に基づいた複数の ID 表現法の構築を目指す。

### 4.1 識別率ベース ID 表現法

前章にて各 ID 付与体系における総 ID 数を求めたが、これはすべてのマーカ・ユニットを理想的に識別した場合の最大値である。これらの中には、実際の利用においてマーカ・ユニットと認識しても、カメラとの位置関係によってマーカ・エレメントの形状や配置といったマーカパターンの識別を誤り、結果として位置姿勢を推定できないマーカ・ユニットも含まれると予想される。

識別率ベース ID 表現法は、マーカ・ユニットの識別の誤りを実験的に求め、その結果に基づき冗長性を持たせた ID の付与手法である。この表現法により、マーカ・ユニットの識別率、つまりマーカパターンの識別の正確さから、より頑健といえるマーカの組み合わせを選択することが可能となる。例えば、認識しづらい環境に複数のマーカを配置する場合など、より認識の精度が求められる場面での活用が想定できる。

### 4.2 識別率計測シミュレーション実験

識別率ベース ID 表現法の構築にあたり、各々のマーカ・ユニットの識別率を計算機上でのシミュレーション実験によって求める。マーカ・ユニットの識別には従来の手法 [4] を改良して用いる。なお実験では実利用環境を想定し、カメラに Point Grey Research 社製の FLEA2 (水平画角 85 度、垂直画角 69 度のレンズ使用) を用いた場合をシミュレーションする。実験では 10296 通りの単体六つ組ユニットを模した 2 次元画像を 3 次元空間上の平面に張り付け、この平面を回転・移動させた画像に対して識別率を測定する。3 次元空間中の平面は水平軸および垂直軸に対して -30 度から 30 度まで 15 度刻みに、光軸に対して 0 度から 330 度まで 30 度刻みに回転させる。カメラとマーカ・ユニット間の距離は 1.5m および 1.8m に相当する距離として、上記の回転との組み合わせすべてに対して実験を行う。図 4 に示すようにマーカ・エレメントには 60mm×60mm に相当するサイズを用い、300mm×225mm の平面の 4.5mm 内側にマーカ・ユニットを構成する。

### 4.3 実験結果

シミュレーション実験の結果を以下に示す。図 5 はカメ

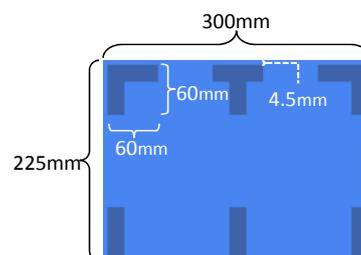


図 4 実験に用いる六つ組ユニット

ラとマーカ・ユニットの相対的な位置関係を推定できた場合の平均位置姿勢推定率を、推定率の高い順に示している。当然、マーカ・ユニットが離れた場合や、傾いた場合は推定率が多少下がるものの、大多数のマーカ・ユニットが90%以上の高い割合でカメラとの相対的な位置関係を推定できていることがわかる。

これらのマーカ・ユニットのうち、マーカ・ユニットを構成するマーカ・エレメントの組み合わせを正確に識別した場合の識別率を表2に示す。この表では識別を誤ったマーカ・エレメントの数ごとに識別率を示しており、約70%のマーカ・ユニットを正確に識別できている一方で、30%弱は識別に失敗していることがわかる。

識別の誤りの要因には、マーカ・エレメントが似た形状であることが挙げられる。L型、LL型、LR型およびT型、CV型は辺の長さのみが異なる形状であるため、カメラの光軸方向に対するマーカ・ユニットの傾きがきつくなるほど、カメラから見たマーカ・エレメントの辺の長さの差が縮まり、識別を誤る傾向にあった。実験に用いたマーカ・ユニット画像と、識別を誤ったマーカ・ユニットを図5に例示する。図5の上部に示すマーカ・ユニットは、高確率で下部の3つのマーカ・ユニットとして識別を誤る。本来のマーカ・ユニットと、識別を誤った3つのマーカ・ユニットはいずれもL型の識別を1カ所誤っている。

実験ではマーカ・ユニット約30%が識別を誤ってはいるが、その大半は6つのマーカ・エレメントうちの1つの誤りにとどまっている。この特徴を利用した1つのID表現法として、マーカ・エレメントの配置規則に制限を加えるなど、識別の誤りをマーカ・ユニットの持つIDから解決できる手法が考えられる。

また、識別を誤ってもマーカとカメラの相対的な位置姿

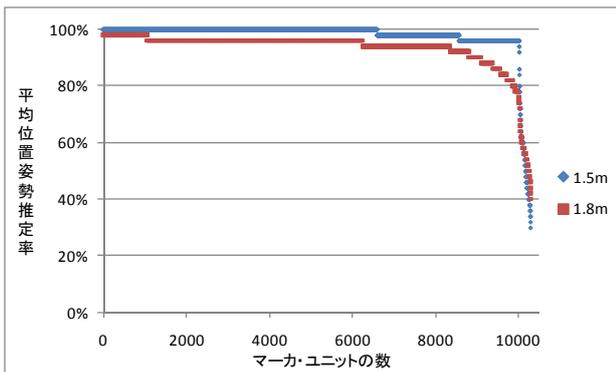


図5 位置姿勢取得率の分布

表2 マーカ・ユニットの識別率

マーカ・ユニット中の 識別を誤ったマーカ・エレメントの数	識別率
0個(誤りなし)	71.47%
1個	25.38%
2個	1.85%
3個	0.29%
4個	0.43%
5個	0.39%
6個	0.18%

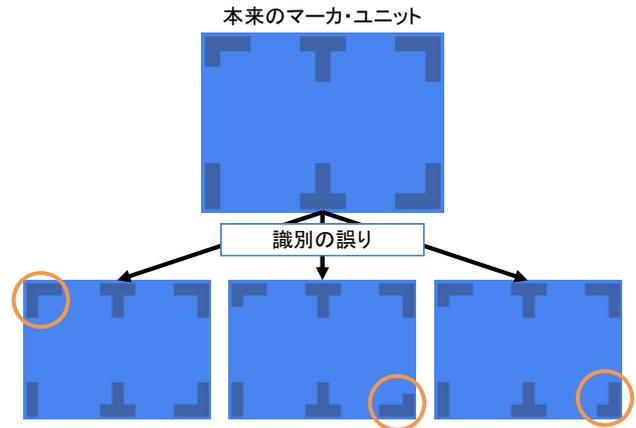


図5 識別を誤ったマーカ・ユニット

勢の推定には影響はないことから、推定した位置姿勢からマーカ・ユニットの傾き程度を計算し、これを誤り訂正として識別に活用するといった改良も考えられる。

これらの実験・分析結果に基づき、今後は MOJI-Code を用いた、より実利用に即したマーカの設計と ID 表現法の構築に取りかかる。

## 5. むすび

本稿では TT 方式において、マーカ・ユニットへの ID 付与の体系である MOJI-Code として、単体/複合マーカ・ユニット体系の2種類を構築し、これらの体系の表現力である付与可能な ID 数を整理した。また、ID を付与しマーカ・ユニットを表現するための手法としてシミュレーション実験により各マーカ・ユニットの識別率を測定し、識別率に基づいた ID 表現法の実現のための検討を行った。

今後はマーカパターンの認識アルゴリズムの改善とともに、識別率ベース ID 表現法を具体的に検討し、より確実な識別が可能な手法としてこれを実現する。また、識別率とは異なる指標に基づいた新たな表現法を検討する。

## 参考文献

- [1] 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 VR 学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp.171 - 180, 2003.
- [2] 加藤博一: “拡張現実感システム構築ツール ARTToolKit の開発”, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2001 - 232, Vol. 101, No. 652, pp. 79 - 86, 2002.
- [3] 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)”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, 信学技報 Vol. 106, No. 470, PRMU2006 - 195, pp. 7 - 12, 2007.
- [4] 海川真佑, 前田紗希, 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2報) ~ ツートンカラー方式の機能拡張 ~, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, 信学技報, Vol. 107, No. 427, PRMU2007-186, pp. 169 - 174 (2008.1)