基礎論文

複合現実感のための同系色ツートンカラーマーカにおける ID 符号体系と誤り検出・訂正

茂地顕一郎[*1]　柴田史久[*1]　木村朝子[*1]　田村秀行[*1]

An ID Assignment and Error Detection / Correction Method for Two-tone Similar Colored Markers

Kenichiro Moji[*1]　Fumihisa Shibata[*1]　Asako Kimura[*1] and Hideyuki Tamura[*1]

Abstract --- This paper describes an ID assignment and error detection / correction method for Two-tone similar colored markers, which we have proposed for geometric registration method on mixed reality. We assume that these markers' color are similar to that of the background object to make them unimposing. However, there are trade-off between robustness and inconspicuousness. In general, any image recognition method cannot avoid recognition errors caused by external factors. Therefore, our proposed markers occasionally get not enough identification result by these reasons.

To solve this problem, we have developed an ID assignment and recognition error detection / correction method. First, we clarified the total number of IDs for marker-units that consist of some small markers. We formulated single marker-unit system, in which we attach importance to the total number of IDs, and composite marker-unit system, in which we attach importance to the robustness. Secondly, we developed a recognition error detection / correction method. Basic idea is that the system assigns some numerical value to each small marker and judges the difference between the sum of the assigned value and previously given check digit. The level of recognition error detection and correction can be adjustable based on the mapping between the numerical value and each small marker.

Keywords: mixed reality, two-tone similar colored markers, id, error detection, error correction

1 はじめに

現実世界の映像に仮想物体を実時間で合成する複合現実感（Mixed Reality; MR）において，仮想物体を現実世界の意図した位置に正確に重畳描画するための「位置合わせ」は最重要課題であり，多くの研究者によって様々な手法が提案されてきた[1]．とりわけ，カメラから得られる画像を利用した位置合わせ手法は，特殊なセンサを必要とせずカメラのみで実現可能である点，ビデオシースルー方式との親和性が高い点などから，多くの手法が提案されている．これら手法は大きく，人工マーカを使った手法[2]と自然特徴を使った手法[3]に分けられ，近年は計算機の高性能化を原動力として後者の研究が活発になりつつある[4-6]．しかしながら前者の手法も，自然特徴の利用が難しい環境や，使用の簡便性，初期位置合わせの容易さなどから今後も引き続き利用されると考えられる．

ARToolKit[7,8]に代表される前者の手法の要諦は，計算機で認識・同定が容易なマーカを環境中に設置し，カメラ画像中で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ことである．しかし，この手の人為的マーカは，計算機による認識率の向上を目的として目立つデザインを採用しているため，美観を損ねてしまうという問題を抱えている．

これに対して我々は，半人為的・準恣意的にデザインしたマーカを用いることで，美観と位置合わせ能力の頑健性を両立する SFINCS（Semi-Fiducial INvisibly Coded Symbols）［半人為的で，目立たないように符号化された記号群の意］という概念を提唱し，対象領域の隅に対象領域と同系色のマーカを設置して位置合わせを行う「TT 方式（Two-Tone similar colored marker 方式，ツートンカラー方式）」を提案した[9]．

TT 方式では，実環境への変化を抑えるというアプローチから，設置領域と同系色の小型マーカを複数個組み合わせて用いており，マーカ貼付面積の低減を図っている．また，小型マーカの組み合わせによって ID を符号化しており，この組み合わせを識

*1　立命館大学大学院理工学研究科
*1　Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

別することで, ID に紐付けられた位置情報を取得し, カメラの位置姿勢を推定する.

一般に，画像認識を用いて位置合わせを実現する場合，光源環境などの外的要因により，多かれ少なかれ認識誤りは発生し, これを無くすことは難しい. 上述の方法で位置姿勢を推定するため，TT 方式では小型マーカの認識誤りが発生した場合，位置姿勢推定が失敗することが考えられるが，美観に配慮した目立ちにくいマーカを採用するという前提から，小型マーカの認識誤りを皆無にすることは不可能である.

そこで本論文では, ID を符号化する過程において冗長性を持たせることで，画像認識からは分離した符号処理によって ID の同定誤りの検出・訂正する手法を提案する. 以降では，TT 方式における ID の符号体系, および ID の符合化を利用した ID 同定誤りの検出・訂正手法について述べる.

2 TT 方式

2.1 TT 方式の概要

TT 方式は，美観への影響を抑えるというアプローチから，対象領域と同系色の小型マーカを複数個組み合わせて利用することで，実環境との調和を図りながら位置合わせを実現する手法である. マーカ・エレメントと呼称するこの小型マーカは，現実のオブジェクトの一様な色をした平面の端に貼付して利用する（**図 1** 参照）. 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. この色の特徴を利用してマーカをカメラ画像中から検出し，4 つないしは 6 つのマーカ・エレメントの組み合わせを用いてカメラの位置姿勢を推定する.

我々は，このマーカ・エレメントの組によって構成される位置合わせのための集合をマーカ・ユニットと定義し，4 つないしは 6 つのマーカ・エレメントからなるマーカ・ユニットをそれぞれ，四つ組ユニット／六つ組ユニットと呼称している（**図 2** 参照）. なお，TT 方式ではマーカ・ユニットの構成する長方形の四隅の頂点を基準としてカメラとマーカ・ユニットの相対的な位置関係を算出する.



図1　TT 方式を用いた位置合わせの例

Fig.1 An example of geometric registration using two-tone similar colored markers

マーカ・ユニットの構成要素となるマーカ・エレメントには 7 種類の形状を用いる. これらを**図 3** に示す. マーカ・エレメントは形状ごとに，マーカ・ユニットの四隅に配置する「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」に分類する. これらのマーカ・エレメントは頂点の数および辺の長さを用いて形状を判定する. I 型のマーカ・エレメントはどれも同一の形状であるが，設置する際の向きによって複数種類のマーカ・エレメントとして使い分けが可能な共通の形状とし, 合計 10 種類のマーカ・エレメントが利用可能である.

図 3 において角エレメントの頂点に記した丸印は, マーカ･ユニット構成時の四隅の頂点の位置を示し, 辺エレメントの破線部はマーカ･ユニットの構成する長方形に接する辺を示している. 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. ID はマーカ・ユニットごと，すなわちマーカ・エレメントの組み合わせごとに 1 つずつ付与され，世界座標中におけるマーカの位置情報と紐付けされる. カメラ画像中からマーカ・ユニットを検出・同定することで，カメラとマーカ・ユニットの相対的な位置関係と ID に紐付けられたマーカの位置情報から，カメラの世界座標中での位置姿勢が推定可能となる. なお，カメラの位置姿勢推定には，マーカ・ユニットの回転を識別する必要があるため，点対称の構成をとるマーカ・ユニットは利用できない.

四つ組ユニットと六つ組ユニットの使い分けに関しては，美観という観点からはマーカ貼付面積の少ない四つ組ユニットが好ましい. しかしながら六つ



(a)四つ組ユニット　　(b)六つ組ユニット

図2　四つ組ユニットと六つ組ユニットの例

Fig.2 An example of 4 marker-unit and 6 marker-unit

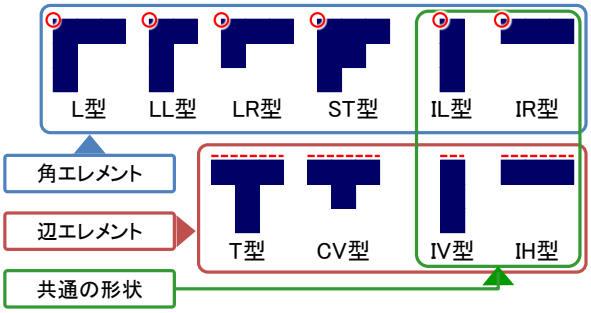


図3　マーカ・エレメントの種類と分類

Fig.3 Classification of marker-elements

組ユニットではより多くの ID が利用可能であり，豊富な表現力を利用した頑健な ID 符号体系が構築可能であることから，どちらを利用するかは状況に依存する．

2.2 関連研究

人工マーカを用いた位置合わせ手法は，単一のマーカを用いた手法および，複数のマーカを組み合わせた手法に分類可能である．単一のマーカを用いた手法として，一般的に知られている ARToolKit は正方形状のマーカを用いてカメラの位置姿勢推定を行う．この手法では，マーカの枠内に描かれた模様をパターンマッチングによって識別しており，枠内に描かれる模様によって ID 同定の難易が変化するため明確な ID 数を体系的に提示できない．マーカの枠内に二次元バーコードを埋め込むことで体系的に ID を符号化する手法も存在するが[10, 11]，白黒の目立ちやすいマーカが利用されており，美観については考慮されていない．

複数のマーカの組み合わせによってカメラ位置姿勢を推定する手法も提案されている[12-15]．これらの手法は，正方形や同心円状のマーカに色や模様を配置し，それらの組み合わせによって位置合わせを実現している．現実世界に多数設置したマーカ群を用いるため，単一のマーカを利用する場合よりも安定した位置合わせが可能な手法も存在する[15]．しかし，いずれの手法も，現実世界に貼付するマーカは視覚的に目立つコントラストの強いデザインが主流であり，周辺の美観を損ねてしまう．

一方で，我々が提唱した SFINCS と同様に，美観を考慮し，環境適応性を向上させたマーカを用いる手法もいくつか提案されている．Wagner らは，2 本の棒状のバーコードを位置合わせに用いる手法や，正方形マーカの枠部分に ID を埋め込み，枠のみを用いて位置合わせを実現する手法など，マーカ面積を大幅に低減した手法を提案している[16]．ただし，この手法も白と黒を基本としたコントラストの強いマーカを用いている．不可視な赤外線を利用した手法として，中里らは再帰性反射材を用いて作成したマーカに対して赤外線を放射し，赤外線カメラを用いて位置合わせを実現する手法を提案している[17]．また，白井らはプロジェクタから投影した赤外光による IR マーカを利用して携帯端末に情報提示を行う手法を提案している[18]．しかし，これらの手法は赤外線カメラを必要とするため，ユーザ視点のカメラのみを用いる手法と比べて，システムが複雑になるという問題がある．

3 ID 符号体系

TT 方式では，マーカ・ユニットと ID の対応関係を示す指標として ID 符号体系を構築しており，複数の符号体系により，同一構成のマーカ・ユニットであっても異なる表現のマーカ・ユニットとして利用が可能である．ID の符号化とは，マーカ・ユニットへの ID の付与であり，マーカ・エレメントの組み合わせをある種の符号として捉え，この符号に対して情報の紐付けを行うことである．符号の解釈は様々であり，符号体系によってマーカ・ユニットを多様な形式で捉えることが可能となる．

この符号体系として，マーカ・ユニットを構成する全てのマーカ・エレメントの組み合わせに対して 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 体系を構築した．

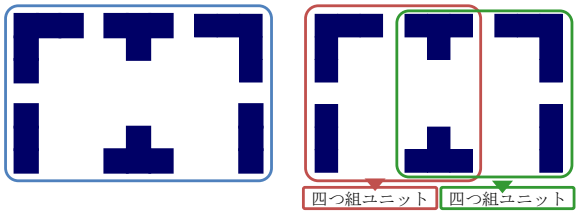
単体マーカ・ユニット体系は最も多くの ID を表現可能な体系であり，複合マーカ・ユニット体系は冗長な構成によりマーカ・エレメントのオクルージョンに対応した体系である．なお，これらの体系のうちのどれを利用するかについては，後述の誤り検出・訂正の有無とあわせて，予め決められているものとする．本章では各符号体系の特徴や ID の表現力について述べる．

3.1 単体マーカ・ユニット体系

単体マーカ・ユニット体系は，マーカ・ユニットの構成要素となるマーカ・エレメントのすべての組み合わせを用いることで，最も多くの ID を利用可能な体系である．この体系に基づいた四つ組／六つ組ユニットをそれぞれ単体四つ組ユニット／単体六つ組ユニットと呼称する．単体六つ組ユニットを**図 4 (a)**に示す．

3.1.1 単体四つ組ユニット

単体四つ組ユニットは，4 つの角エレメントから構成されるマーカ・ユニットである．回転を識別するために点対称となる構成のマーカ・ユニットを除くと，単体四つ組ユニットに使用する角エレメントの種類を n 個としたときの，総 ID 数 $f_{S4}(n)$ は**式(1)**



(a)単体六つ組ユニット　(b)複合六つ組ユニット

図4　単体／複合六組ユニットの例

Fig.4 An example of single / composite 6 marker-unit

のように表現できる．

$$f_{S4}(n)=\frac{n^4-(n+{}_nC_2\times 2)}{4} \quad (1)$$

図 3 に示した 6 種類の角エレメントを用いた場合，単体四つ組ユニットは 315 の ID を表現可能である．

3.1.2 単体六つ組ユニット

単体六つ組ユニットは，4 つの角エレメント，および 2 つの辺エレメントから構成されるマーカ・ユニットである．

六つ組ユニットは，2 つの辺エレメントが異なる形状の組み合わせであれば，角エレメントの構成に関わらず，回転の識別が可能となる．この場合は，単純に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．

一方，2 つの辺エレメントが同一形状の組み合わせの場合，角エレメントによって回転を識別する必要があるため，角エレメントは点対称とならない配置とする必要がある．辺エレメントは，これらの 4 つの角エレメントの左右方向と上下方向の間に配置する 2 つの組み合わせが考えられる．したがって，使用する角エレメントと辺エレメントの種類をそれぞれ n，m としたとき，単体六つ組ユニットの総 ID 数 $f_{S6}(n$ 個, m 個$)$ は**式(2)**のように表現できる．

$$f_{S6}(n,m)=2\times m\times\frac{n^4-(n+{}_nC_2\times 2)}{4}+{}_mC_2\times n^4 \quad (2)$$

図 3 に示した 6 種類の角エレメントおよび 4 種類の辺エレメントを用いた場合，単体六つ組ユニットは 10296 の ID を表現可能である．

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ことで，一部のマーカ・エレメントにオクルージョンが発生した場合にも位置合わせが可能な体系である．ただし，位置合わせの基準として 4 つのマーカ･エレメントが構成する長方形が必要であるため，オクルージョン発生時も，マーカ・エレメントによって長方形が維持されている必要がある．

なお複合マーカ･ユニット体系は，複数のマーカ・ユニットを内包するため，四つ組ユニットを 2 つ内包した複合六つ組ユニットが最小の構成となる．これを図 4 (b)に示す．

3.2.1 複合六つ組ユニット

複合六つ組ユニットは四つ組ユニットを 2 つ内包した六つ組ユニットである．内包す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．オクルージョン発生時には，四つ組ユニットを用いて位置合わせを行う場合があるため，辺エレメントの組み合わせには，四つ組ユニットとして長方形を構成可能な組み合わせのみを用いる．また，同一の構成となる四つ組ユニットを重複して利用しないことで，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の ID の同定を可能としている．

複合六つ組ユニットは，四つ組ユニットを重複しないように 2 つ選び出し組み合わせることで構成するため，構成可能なマーカ・ユニットのバリエーション，すなわち ID 数と，同時に利用可能なマーカ・ユニットの数は異なる．これらの数は，辺エレメントの組み合わせごとに異なり，5 つに場合分けが可能である．この場合分け条件ごとの ID 数，同時利用可能なマーカ・ユニット数の計算式を**表 1** に示す．このうち条件(D)の一部と条件(E)では，辺エレメントとして IH 型（長辺がマーカ・ユニットの構成する長方形の辺に接している I 型マーカ・エレメント）を用いた際に，マーカ・ユニットが構成する長方形の頂点位置の判定が困難であるため除外して計算している．

複合六つ組ユニットに内包される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．したがって，各条件において，構成可能な四つ組ユニットの種類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総数との積となる．この構成可能な四つ組ユニット群から，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を構成する．

図 3 に示した 10 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 となり，そのうち 167 を同時に利用可能である．

3.2.2 複合六つ組ユニットのオクルージョン対応

複合六つ組ユニットは 2 つの四つ組ユニットを内

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
Table 1　Number of IDs and available 6 marker-units

条件			ID 数	同時利用可能なマーカ･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	$n^4\times{}_{m-l}C_2$	$n^2\times{}_{m-l}C_2$
(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）

包しているため，一部のマーカ・エレメントにオクルージョンが発生した場合も，オクルージョンの影響のない四つ組ユニットを用いて位置合わせが可能である．この場合，最大 2 つの角エレメントのオクルージョンにまで対応可能である．また，ID 数は表 1 と同様となる．オクルージョン発生時においても，内包する四つ組ユニットの 4 頂点を正しく検出することができれば，位置合わせの精度は理論上変化しない．ただし，内包する四つ組ユニットの頂点間の距離が，六つ組ユニットと比べて小さくなるため量子化誤差の影響が大きくなることが考えられる．

辺エレメントに対するオクルージョンでは，マーカの表現力は低下してしまうものの，あらかじめ辺エレメントの組み合わせを定めておくことで，1 つの辺エレメントのオクルージョンに対して，片方の辺エレメントから，辺エレメントの組み合わせを特定でき，ID が同定可能となる．カメラの位置姿勢は 4 つの角エレメントの構成する長方形を基準とすることで推定する．この場合，単体六つ組ユニットと同様の角エレメントの 4 頂点を用いて位置合わせを行うため，オクルージョンの有無に関わらず位置合わせの精度に変化はない．

この場合，最大で 2 つの角エレメント，もしくは 1 つの辺エレメントのオクルージョンに対応可能である．この場合の ID 数は，辺エレメントの組み合わせ方によって変化するが，表 1 の(A)から(E)の条件のうち, ID をもっとも多く利用可能な条件から優先して利用することで，より多くの ID が表現可能である．辺エレメントの組み合わせとして，「T, IV」「CV, CV」「IH, IH」あるいは「CV, IV」「T, T」「IH, IH」を用いることで最も多くの ID が利用可能となる．図 3 に示した 10 種類のマーカ・エレメントを用いた場合，辺エレメントのオクルージョンに対応した複合六つ組ユニットの最大 ID 数は 2314 となり，そのうち 68 を同時利用可能となる．

TT 方式の各 ID 符号体系における総 ID 数および同時利用可能なマーカ・ユニット数を**表 2** に示す．

4 頑健な ID 同定手法

画像認識を用いた位置合わせ手法では，カメラからの映像の入力が必要となるが，この映像には少なからずノイズが含まれており，このノイズが原因となって認識誤りが発生する．この認識誤りは，位置姿勢推定結果の誤差や, ID の同定誤りなどとして現れる．特に TT 方式では，マーカを目立たせないというコンセプトから, マーカ・エレメントの形状を，オブジェクトの隅に調和するデザインとして統一しており，形状の識別誤りに起因する ID の同定誤りがしばしば起こり得る．このような認識誤りは，利用する環境によって程度が変化するものの，画像認識を利用する以上は不可避な問題である．

本研究では，画像における認識誤りを情報通信分野での通信路における雑音に起因する誤りと同種の問題として捉え，ID 符号化の過程でマーカ・ユニットに持たせた冗長性により，画像認識からは分離・独立した処理によって ID の同定誤りの検出・訂正を実現する手法を考案した．

この手法では様々な利用環境下で起こり得る認識誤りを, 符号を用いた処理によって検出・訂正しており, 一般的に知られた誤り検出手法でもあるチェックディジットに似た考え方を用いている．チェックディジットとは，データの妥当性を確認するために付加される値であり，情報源の持つ値を基として一定の規則に従い算出される．TT 方式では，各マーカ・エレメントを数値へと符号化し，マーカ・ユニットの数値の合計を mod 演算することで求まる剰余値をチェックディジットとして用いる．

なお，TT 方式はマーカ・ユニットが構成する長方形の 4 頂点を基準として位置合わせを行っているが, ID の同定誤りが発生した場合も，その 4 頂点の位置は変化しないため，同定誤りを訂正できれば位置姿勢を正しく推定することが可能となる．

4.1 マーカ・エレメントの識別誤りパターンの分析

ID の同定誤り検出・訂正手法では，チェックディジットとして予め指定した任意の値を持つマーカ・ユニットのみを用いることで，マーカ・エレメントの識別誤り時に，指定した値とは異なるチェックディジットが検出され, ID の同定誤りとして検出が可能となる．ただし本手法は，同一のチェックディジットを持つマーカ・ユニット間で同定誤りが発生しないことが前提となる．つまり，この前提を満たした ID の符号化が必要である．

また，各マーカ・ユニットからは一定の規則に従ってチェックディジットが算出されるが，チェックディジットの種類が増えるほど，同一のチェックディジットを持つマーカ・ユニットの数が減少し，利用可能な ID 数も減少する．

表2 各体系の ID 数と同時利用可能なマーカ・ユニット数
Table 2 Number of IDs and available 6 marker-units for each ID assignment method

ID 付与の体系			総 ID 数	同時利用可能なマーカ・ユニット数
単体四つ組ユニット			315	
単体六つ組ユニット			10296	
複合六つ組ユニット	欠損対応	角エレメントのみ	5605	167
		角エレメント& 辺エレメント	2314	68

実環境では，マーカ貼付時のわずかなずれや光源の位置・方向の微妙な差異などにより，少し異なったパターンが観測されることになり，何の影響でマーカ・エレメントの識別結果が変化するのかが正確に分析できない．そのため，10,296 通りのマーカ・ユニットすべてに対して完全に同一の条件で実験を実施することは事実上不可能である．そこで本手法では，起こりうるノイズや光の照り返しなどを含めた利用する環境を想定したシミュレーションにより，マーカ・エレメントの識別誤りパターンを実験的に求め，その分析結果を用いることで，総 ID 数の減少を抑えながら，上述の前提を満たしたマーカ・ユニットの ID の符合化を行う．

4.1.1　シミュレーション

マーカ・エレメントの識別の誤りパターンは，全 10296 通りの単体六つ組ユニットを用いて，計算機上のシミュレーションによって求める．入力画像には**図 5** に示すような実物の段ボール箱の写真にマーカ・ユニットを合成した画像を用い，カメラに対して画像を回転・移動させた場合のマーカ・エレメントの識別の誤りパターンを求める．画像中のマーカ・エレメントには 60mm×60mm に相当するサイズを用い，350mm×200mm の平面の 10mm 内側にマーカ・ユニットを構成する．また，**図 6** のように光の照り返しにより，一部のマーカ・エレメントの色が変化した場合を想定した画像も用いる．図 6 では左上方向から光を照らしているが，他にも上／右上／下方向から光を照らした画像についてもシミュレーションを行う．

画像の回転は水平軸および垂直軸に対して-40 度から 40 度まで 20 度刻みに，光軸に対して 0 度から 315 度まで 45 度刻みに回転させる．実環境での利用時と同様の垂直画角 17.1 度のカメラ・レンズを用いた場合を想定し，カメラとマーカ・ユニット間の距離が 1.5m，1.8m，2.1m，2.4m に相当する距離において，上記の回転とのすべての組み合わせに対してマーカ・エレメントの誤りパターンの分析を行った．

4.1.2　マーカ・エレメントの識別誤りパターン

シミュレーションの結果を**表 3** および**表 4** に示す．表 3 はシミュレーションにて，ID を間違えることなく正しく同定したマーカ・ユニットの割合を示している．表 4 は，各距離におけるマーカ・エレメントの識別誤りのパターンを示しており，表中の矢印の左側は本来のマーカ・エレメントの形状を，右側は誤って識別した形状を示している．ノイズを加えていない画像では 2.4m 離れた場合にのみ識別誤りが発生した．識別誤りの大半は辺の長さの判定誤りによって発生していた．また，どの画像を用いた場合でも，マーカ・エレメントの識別誤りは，6 つのマーカ・エレメント中の 1 つにとどまっていた．

なお，識別誤りの原因は，光の照り返しによってマーカ・エレメントの色が部分的に変化することにあり，実環境下でも光の照り返しによってシミュレーションと同様の誤りが発生することが分かっている．従って，シミュレーションから実環境下での識別誤りパターンに酷似した結果を求めることが可能である．

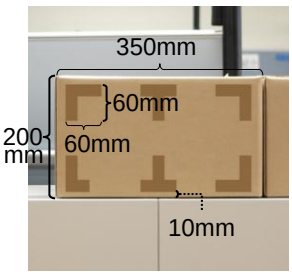


図5　実験に用いる画像
Fig.5　Image for simulation



図6　照り返し画像
Fig.6　Reflect light image

4.2 ID の同定誤り検出手法

ID の同定誤り検出には，マーカ・ユニットの構成から算出するチェックディジットを用いる．本手法では，このチェックディジットとして予め任意の値を指定し，指定した値を持つマーカ・ユニットのみを用いることで誤りの検出を実現する．マーカ・エレメントの識別誤りが発生した場合，指定した値以外のチェックディジットが検出され，ID の同定誤りとして検出が可能となる．ただし，単一のチェックディジットでは同時に発生する複数のマーカ・エレメントの識別誤りは検出できないため，本手法では

表3　マーカ・ユニットの ID 同定率
Table 3　Identification rate of 6 marker-unit ID

入力画像	ID 同定率			
	1.5m	1.8m	2.1m	2.4m
ノイズなし	100%	100%	100%	95.9%
照り返し（左上）	86.8%	61.5%	66.9%	93.2%
照り返し（上）	100%	97.1%	56.4%	54.1%
照り返し（右上）	50.1%	33.7%	52.5%	84.4%
照り返し（下）	100%	100%	100%	99.2%

表4　マーカ・エレメントの識別誤りパターン
Table 4　Error pattern of discrimination of marker-elements

入力画像	識別誤りの内容			
	1.5m	1.8m	2.1m	2.4m
ノイズなし				CV ➔ T
照り返し（左上）	ST ➔ L, LL, IL, IR	L ➔ LR, IR LR ➔ IR ST ➔ LL, LR	L ➔ LR ST ➔ LR	CV ➔ T
照り返し（上）		T ➔ CV	LR, ST, IL, IR ➔ LL T ➔ CV	ST, IL, IR➔ LR CV ➔ T T ➔ CV
照り返し（右上）	L, LL ➔ IL ST ➔ L,LL,LR,IR	L, LL ➔ IL IR ➔ IL ST ➔ L,LL,LR	L ➔ LL,IL LL ➔ IL ST ➔ L,LL,LR	ST ➔ L,LL CV ➔ T
照り返し（下）				CV ➔ T

1 つのマーカ・エレメントの識別誤りにのみに対応している．

なお，チェックディジットは，マーカ・エレメントの符号化に用いる値の種類数を法とした mod 演算によって算出するため，この符号化に用いる値の種類が少ないほど，利用可能な ID 数が増加する．

4.2.1 マーカ・エレメントの符合化

マーカ・エレメントの符号化とは，各マーカ・エレメントを符号値へと換算し，値として扱うことである．換言すれば，マーカ・エレメントから数値への写像を決定することだと表現できる．この符合化には，予め求めたマーカ・エレメントの識別誤りのパターンを用いる．この識別誤りパターンを基に，識別を誤る前の本来のマーカ・エレメントと識別を誤った後の間違ったマーカ・エレメントがそれぞれ異なる符合値を持つように符号化を行う．符号値には，可能な限り小さな非負の整数を用い，複数のマーカ・エレメントに対して同一の符号値の重複した符号化も可能とすることで，符合値の種類を減らし，ID 符合化の効率を向上させる．この符号化は，マーカ・エレメントから符号値への全射を決定することに等しく，この制約に則った符号化により，符号値への換算の方法に関わらず誤り検出が可能となる．

ここでは具体例として表 4 の照り返し（上）の識別誤りパターンを基に，マーカ・エレメントを符合化した結果を**表 5** に示す．

4.2.2 チェックディジットによる誤りの検出

誤りの検出は，予め指定した任意のチェックディジットと，マーカ・ユニットを構成する 6 つあるいは 4 つのマーカ・エレメントの符合値の合計を比較することで行う．両者が等しければ ID の同定誤りがなく，異なった場合は誤りを検出したことになる．

表 5 の符合値を用いてマーカ・ユニットのチェックディジットを算出した例を**図 7** に示す．図 7 の場合，6 つのマーカ・エレメントの符合値の合計は「6」となり，この値を符合値の種類数である「3」を法とした mod 演算によって算出される「0」がチェックディジットとなる．ここまでの ID 同定誤りの検出手法をまとめると**図 8** のようになる．

表 5 の符合値を用いて，チェックディジットが「0」となるマーカ・ユニットのみを用いた場合，単体六つ組ユニットの ID 数は 3451 となる．

誤り検出手法では，チェックディジットを用いることでマーカ・ユニットに冗長性を持たせているが，一方でその冗長性により利用可能なマーカ・ユニットの構成は限定されている．しかし，各マーカ・エレメントの符号値や，チェックディジットの値は任意に指定が可能であり，これらの値の変更によって，誤り検出能力の調整や，利用可能なマーカ・ユニットの構成を変化させることが可能である．

表5　誤り検出手法におけるマーカ・エレメントの符号換算表

Table 5　Translation table of maker-elements for error detection

マーカ・エレメント	角エレメント						辺エレメント			
	L 型	LL 型	LR 型	ST 型	IL 型	IR 型	T 型	CV 型	IV 型	IH 型
符号値	0	0	1	2	2	2	1	0	0	0

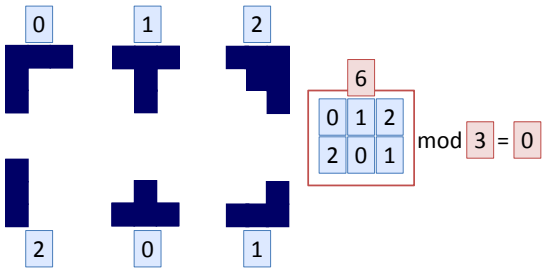


図7　誤り検出手法におけるチェックディジット

Fig.7　Check digit of error detection method

4.3 ID の同定誤り訂正手法

ID の同定誤り訂正手法は，誤り検出手法の考え方を踏襲し，チェックディジットを用いて誤り訂正を実現する．本手法では**図 9** のようにマーカ・ユニットを 3 つのエリアに分割し，各エリアにおけるマーカ・エレメントの符号値の合計を mod 演算することで求まる複数のチェックディジットを利用する．

各エリアのチェックディジットには予め任意の値を指定し，それぞれのエリアにおいて指定したチェックディジットを持つマーカ・ユニットのみを，本手法で用いるマーカ・ユニットとする．

各エリアから検出されるチェックディジットと任意に指定したチェックディジットの差異によって，

ステップ0：初期設定

I. $a_i \in A\ (i = 1, \dots, r)$, $b_j \in B\ (j = 1, \dots, s)$とする．
（a_i：各マーカ・エレメント，r：マーカ・エレメントの種類数，
b_j：各符号値，s：符号値の種類数）

ステップ1：符号値の決定

I. マーカ・エレメントの識別誤りパターンから s を求める．

II. 求めた s から集合Bの各要素b_jに符号値を割り当てる．
（b_jはs元符号となる）

ステップ2：マーカ・エレメントから符号値への写像を決定

I. 識別誤りパターンを用いて写像 $f: A \to B$を決定する．
識別を誤る関係にある集合Aの各元からは集合Bの異なる元へと写像を決定する．

ステップ3：マーカ・ユニットの符号値からチェックディジットを算出

I. $M_k = (b_{k1}, \dots, b_{kt}),\ b_{kl} \in B(l = 1, \dots, t)$
（M_k：マーカ・ユニットにおける符号値の組，
t：マーカ・ユニット中のマーカ・エレメントの数，b_{kl}：符号値，
l：マーカ・エレメントの番号）

II. $C_{Mk} = \left(\sum_{m=1}^{t} b_{km}\right) \bmod s$　（C_{Mk}：チェックディジット）

ステップ4：チェックディジットによる誤りの検出

I. $C = C_{Mk}$ならば正しく，$C \neq C_{Mk}$ならば誤り．
（C：予め指定したチェックディジット）

図8　誤り検出手法のアルゴリズム

Fig.8　Algorithm of identification error detection

マーカ・エレメントの誤り箇所と本来のマーカ・エレメントの特定が可能となり, ID の同定誤りの検出と訂正が可能となる.

本手法のチェックディジットも，マーカ・エレメントの符号化に用いる値の種類数を法とした mod 演算によって算出するため，この符号化に用いる値の種類が少ないほど, 利用可能な ID 数が増加する.

なお，本手法では，複数のエリアのチェックディジットを用いることで，1 箇所のマーカ・エレメントの識別誤りを訂正可能であるが，同時に 2 箇所のマーカ･エレメントの識別誤りの検出も可能となる.

4.3.1　マーカ・エレメントの符合化

誤り訂正手法におけるマーカ・エレメントの符合化も，誤り検出手法と同様に，あらかじめ求めたマーカ・エレメントの識別誤りパターン用いて，マーカ・エレメントを符号値へと換算する．誤り訂正手法では，誤りが発生するマーカ・エレメントがそれぞれ異なる符号値を持つよう符号化を行う．すなわち，識別を誤る前の本来のマーカ・エレメントそれぞれが異なる符号値として換算されることとなる．この際，符号化に用いる値には可能な限り小さな非負の整数を用いる．誤りの発生するマーカ・エレメントと発生しないマーカ・エレメントはそれぞれ異なる値へと符号化し，誤りの発生しない各マーカ・エレメントは同一の符号値への重複した符号化も可能とする．この符号化は，誤りの発生するマーカ・エレメントから符号値への全単射および，誤りの発生しないマーカ・エレメントから符号値への全射を決定することに等しい．この制約に則った符号化により，符号値への換算のされ方に関わらず誤り訂正が可能となる．識別を誤る前の本来のマーカ・エレメントはそれぞれ異なる符号値へと写像を決定することで，これらのマーカ・エレメントと符号値の対応関係を一対一として，符号値への逆写像からマーカ・エレメントの特定を可能としている.

ここでは具体例として表 4 の照り返し（上）の識別誤りパターンを基に，マーカ・エレメントを符合化した結果を表 6 に示す.

4.3.2　識別誤り箇所の特定

誤り訂正を実現するためには，識別の誤りが発生しているマーカ･エレメントを特定する必要がある．誤り箇所の特定は，図 9 に示した各エリア毎に算出するチェックディジットと予めエリア毎に指定したチェックディジットの差異を用いて行う.

表 7 に，これらの差異から求められる誤り箇所を示す．表中の「○」は検出したチェックディジットと指定した値とに差異がない場合を，「×」は差異がある場合を示している. 仮にエリア A および B から指定値とは異なるチェックディジットが検出された場合, エリア A, B の重複する領域から誤り箇所は左上のマーカ・エレメントであると特定できる．四つ組ユニットの場合も同様に，エリアを 3 つに分割することで，誤り箇所の特定が可能となる.

また, 複数のエリアにおいて差異が存在する場合，そのエリア間のチェックディジットの差異は，表 7 の符号化に用いた符合値の種類数を法として同一となる．この差異が同一ではない場合は，複数のマーカ・エレメントに識別誤りが発生している.

なお，マーカ・ユニットのエリア分割は，識別誤り箇所を一意に特定することを目的としており，その特定が可能であるなら，エリア分割の形式は任意に変更可能である.

4.3.3　チェックディジットの差異による誤りの訂正

ID の同定誤り訂正は，マーカ・エレメントの識別誤り箇所を特定した上で，各エリアに指定したチェックディジットと検出したチェックディジットの差異を用いて実現する.

チェックディジットの差異とは，すなわち本来のマーカ・エレメントと誤って識別されたマーカ・エレメントの符号値の差分を指している．つまり，この差分を求めることにより，誤って識別されたマー

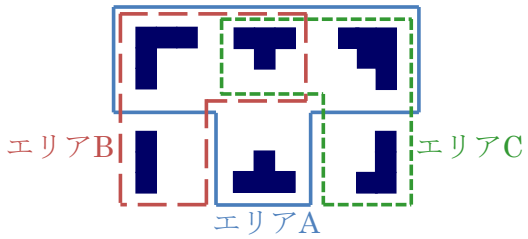


図9　マーカ・ユニットのエリア

Fig.9　Area of a marker-unit

表6　誤り訂正手法におけるマーカ･エレメントの符号換算表

Table 6　Translation table of maker-elements for error correction

マーカ･エレメント	角エレメント						辺エレメント			
	L 型	LL 型	LR 型	ST 型	IL 型	IR 型	T 型	CV 型	IV 型	IH 型
符号値	0	0	1	2	3	4	1	2	0	0

表7　チェックディジットによる誤り箇所の特定

Table 7　Detection of marker–element error using check digit

エリア			エレメントの識別誤り箇所
A	B	C	
○	○	○	誤りなし
○	○	×	右下
○	×	○	左下
×	○	○	下
○	×	×	
×	○	×	右上
×	×	○	左上
×	×	×	上

カ・エレメントの符号値から本来のマーカ・エレメントの符号値が計算可能となる．

誤って識別されたマーカ・エレメントの符号値は誤り箇所の特定によって把握可能である．この誤って検出した符号値とチェックディジットの差異の差分を計算することで，本来のマーカ・エレメントの符号値が計算できる．この符号値の計算は，チェックディジットと同様に符合値の種類数を法とする．

本手法におけるマーカ・エレメントの符号化では，識別を間違えるマーカ・エレメントと符号値を一対一の関係として符号化しているため，チェックディジットの差分計算によって求めた符号値から本来のマーカ・エレメントを復元し，ID の同定誤り訂正が可能となる．

表 6 の符合値を用いてマーカ・ユニットのチェックディジットを算出した例を**図 10** に示す. 図 10 の場合，エリア A, B, C のそれぞれのチェックディジットは「A:0, B:0, C:2」となる．仮に**図 11** のようにマーカ・エレメントの識別を誤った場合，チェックディジットの差異から誤り箇所は右上のマーカ・エレメントであることが特定できる. また, 図 10 と図 11 のチェックディジットの差分は「3」であるため，誤って検出した右上のマーカ・エレメントの符号値「0」から符号値の種類数「5」を法として「3」を減算することで，本来の符号値「2」が算出可能である．表 6 において符号値「2」の角エレメントは ST 型のみであることから，本来の正しいマーカ・エレメントが特定でき，ID の同定誤りを訂正可能となる．ここまでの ID 同定誤り訂正手法をまとめると**図 12** のようになる．

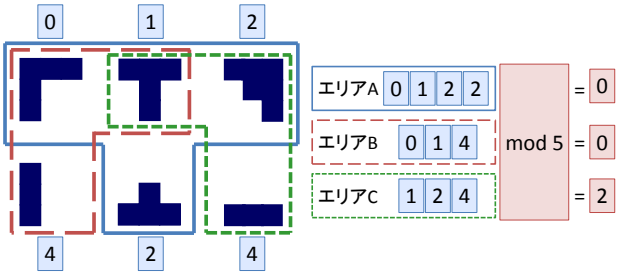


図10　誤り訂正手法におけるチェックディジット

Fig.10 Check digit of error correction method

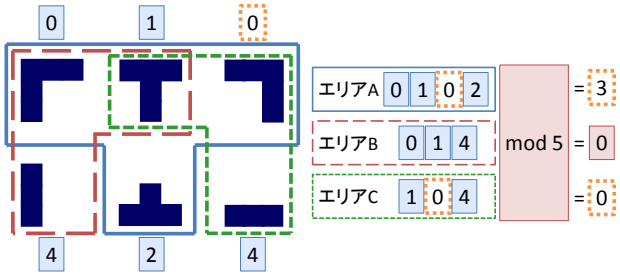


図11　マーカ・エレメントの識別誤り例

Fig.11 Example of error discrimination of marker-element

表 6 の符合値を用いて，チェックディジットが「A:0, B:0, C:2」となるマーカ・ユニットのみを用いた場合, 単体六つ組ユニットの ID 数は 98 となる．

本手法では，誤り検出手法と同様に，チェックディジットによるマーカ・ユニットの冗長性から，利用可能なマーカ・ユニットの構成は限定されている．しかし，マーカ・ユニットのエリア分割の形式や，各エリアのチェックディジットの値，マーカ・エレメントの符号値を変更することにより，誤り訂正能力の調整や，利用可能なマーカ・ユニットの構成を変更可能である．

5 むすび

本稿では，美観と頑健性を両立した位置合わせ手法である TT 方式において，ID 符号体系として単体・複合マーカ・ユニット体系の 2 体系を構築し，これらの表現力である ID 数について述べた．

また，これらの体系に適用可能な頑健な ID 同定手法として, ID 符号化の過程においてチェックディジットの概念を導入し，同定の誤り検出・訂正を実現する手法について述べた．本手法は，マーカの認識誤りを符号によって検出・訂正しているため，利用環境に応じて ID の符号化方法に変更を加えることにより，誤り検出・訂正能力と ID の表現力を調節が可能である．また，述べるまでもないが，個々のマーカの認識アルゴリズムには無関係であるため，マーカの形状を全く異なるものに変更したとしても適用可能である．本稿では，具体例として，シミュ

ステップ0, 1

誤り検出手法と同様

ステップ2：マーカ・エレメントから符号値への写像を決定

I. 識別誤りパターンを用いて写像 $f: A \to B$を決定する．
識別を誤る集合Aの各元からは集合Bの元への全単射を決定する．
識別を誤らない各元からは上記とは異なる集合Bの元へ
重複を許して写像を決定する．

ステップ3：各エリアのチェックディジットを算出

I. マーカ・エレメントの番号を用いて所属エリアを指定する．
番号はマーカ・ユニットの左上から時計回りに割り当てる．
$A = \{1, 2, 3, 4\}, B = \{1, 2, 6\}, C = \{2, 3, 4\}$

II. $M_k = (b_{k1}, \ldots, b_{kt}),\ b_{kl} \in B (l = 1, \ldots, t)$
(M_k: マーカ・ユニットにおける符号値の組，
t: マーカ・ユニット中のマーカ・エレメントの数，b_{kl}: 符号値，
l: マーカ・エレメントの番号; 左上から時計回りに割り当てる)

III. $C_{MkX} = (\sum_{m \in X} b_{km}) \bmod s$
(C_{MkX}: 各エリアの チェックディジット，XはA, B, Cのいずれか)

ステップ4：誤り箇所の特定

I. $D_X = (C_{MkX} - C_X) \bmod s$ （D_X: sを法とした空間での演算結果，
C_X: 各エリアの指定したチェックディジット)

II. $D_X = 0$ならば正しく，$D_X \neq 0$ならば誤り．

III. 誤りなら表7を用いてD_A, D_B, D_CからLを特定．
$0 < L \leq t$（L: 誤り箇所のマーカ・エレメントの番号）

ステップ5：チェックディジットによる誤りの訂正

I. $T_L = b_{kL} - D_L,\ T_L \in B$（$T_L$: 誤り箇所の正しい符号値）

II. $E_L = f^{-1}(T_L)$　（E_L: 誤り訂正後のマーカ・エレメント）

図12　誤り訂正手法のアルゴリズム

Fig.12 Algorithm of identification error correction

レーションによりマーカ・エレメントの識別誤りパターンを求めた結果を基に ID を符号化しているが，画像認識アルゴリズムの改良や，安定したマーカ認識が見込める環境での利用など，識別誤りのパターンが減少する場合，マーカ・ユニットの ID 符号化の効率が向上し，より多くの ID を用いて誤りの検出・訂正が可能となる．すなわち，マーカ認識の頑健性と ID の表現力はトレードオフの関係にあり，本稿では ID 表現の冗長性を増すことで誤りの検出・訂正による頑健性の向上を実現した．一方，識別誤りの増加につながるものの，マーカ・エレメントの種類を増やすことで，ID の表現力を向上させることも可能である．

今後は提案手法を基に，効率の良い符号化手法の考案に取り組む．また並行して，マーカ検出の頑健性の向上や処理の高速化など画像認識処理についても研究を進めており[19]，今後は照明の変化に対する頑健性の向上に取り組む予定である．

謝辞

本研究の開発・実装作業に携わった栗田真輔氏に感謝の意を表する．また，本研究の一部は，科学研究費補助金（基盤研究(B) No. 22300046，研究代表：柴田史久）の支援による．

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：“AR/MR における幾何位置合わせ手法の現状 －人工マーカを使った手法の研究動向と課題－”，第 14 回日本 VR 学会大会論文集, 3C2-1, 2009.

[3] 佐藤智和，横矢直和：“AR/MR における幾何位置合わせ手法の現状 －自然特徴を使った手法の研究動向と課題－”，第 14 回日本 VR 学会大会論文集，3C2-2, 2009.

[4] 武富貴史，佐藤智和，横矢直和：“優先度情報を付加したランドマークデータベースによる動画像からのカメラ位置・姿勢推定の高速化とロバスト性の向上”，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, PRMU2007-202, pp. 281 – 286, 2008.

[5] G. Klein and D. Murray: “Parallel tracking and mapping on a camera phone,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2009), pp. 83 – 86, 2009.

[6] D. Wagner, G. Reitmayr, A. Mulloni, T. Drummond, and D. Schmalstieg: “Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones”, IEEE Trans, Visualization and Computer Graphics, Vol. 16, No. 3, pp. 355 - 368, 2010.

[7] 加藤博一, M. Billinghurst，浅野浩一，橘啓八郎：“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”，日本 VR 学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607 - 616, 1999.

[8] 加藤博一：“拡張現実感システム構築ツール ARToolKit 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.

[9] R. Tenmoku, Y. Yoshida, F. Shibata, A. Kimura and H. Tamura: “Visually elegant and robust semi-fiducials for geometric registration in mixed reality,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2007), pp. 261 – 262, 2007.

[10] M. Fiala: “ARTAG Rev2 Fiducial Marker System: Vision based Tracking for AR,” In Workshop of Industrial Augmented Reality, 2005.

[11] D. Wagner and D. Schmalstieg: “ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices,” Proc. of 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW'07), pp. 139-146, 2007.

[12] Y. K. Cho, J. Lee, and U. Neumann: “A Multi-ring color fiducial system and a rule-based detection method for scalable fiducial-tracking augmented reality,” Proc. Int. Workshop on Augmented Reality (IWAR’98), 1998.

[13] G. A. Thomas, J. Jin, T. Niblett, and C. Urquhart: “A versatile camera position measurement system for virtual reality TV production,” Proc. Int. Broadcasting Convention (IBC’97), pp. 284 - 289, 1997.

[14] L. Naimark and E. Foxlin: “Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), pp. 27 - 36, 2002.

[15] M. Fiala: “ARTag, a fiducial marker system using digital techniques,” Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 590 - 596, 2005.

[16] D. Wagner, T. Langlotz and D. Schmalstieg: “Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phone,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2008), 2008.

[17] 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VR学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 295 - 304, 2005.

[18] 白井良成，松下光範，大黒毅：”秘映プロジェクタ：不可視情報による実環境の拡張”，WISS2003, pp. 155 - 122, 2003.

[19] 栗田真輔，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9報）～TT方式におけるトラッキングと位置姿勢推定の並列化～”，第 15 回日本 VR 学会大会論文集, pp. 274 – 277, 2010.

[著者紹介]



茂地 顕一郎 （学生会員）

2009 年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒．現在，同 大学院博士前期課程在学中．複合現実感における位置合わせに関する研究に従事．

柴田 史久 （正会員）

木村 朝子 （正会員）

田村 秀行 （正会員）

掲載号の別論文参照