基礎論文

ポスタを利用した複合現実感用幾何位置合わせ

天目 隆平[*1]　西上 彰人[*2]　柴田 史久[*2]
木村 朝子[*2]　田村 秀行[*2]

A Geometric Registration Method Using Wall Posters as AR-Markers

Ryuhei Tenmoku[*1]　Akito Nishigami[*2]　Fumihisa Shibata[*2]
Asako Kimura[*2]　Hideyuki Tamura[*2]

Abstract --- This paper describes a geometric registration method using visually unobtrusive flat posters arranged in the real world for mixed reality. The proposed method is one approach of SFINCS (Semi-Fiducials Invisible Coded Symbols) research whose purpose is achieving good balance between elegance with regard to the environment and robustness of the registration. In this method, posters which will be used for geometric registration are designed to blend into the environment, but recognized as markers based on certain design rules. Posters in the real scene can be found in real time using these design rules. This paper introduces the framework of this method and describes two kinds of design rules: layout rules and color scheme rules. Some experiments using example rule sets are also described to show the potential abilities of our proposed method.

Keywords: mixed reality, geometric registration, poster, semi-fiducial

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，新たな情報提示技術として設計･製造･建設等の様々な分野から，注目を集めている．MR を実現する上で，現実世界と仮想世界の位置合わせ問題，すなわち幾何学的整合性問題は最も重要な課題として従来から様々な研究が行われてきた[1].

これまでに提案されている手法は大きく，物理センサを利用したもの，画像認識を応用したもの，及び両者のハイブリッドなものに分けることができる．中でも，画像認識を応用した手法は，数多くの提案が為されており，特に**図 1** に示すような同心円状や正方形の人為的マーカを利用した手法は，利用の簡便さから数多くの MR アプリケーションで採用されてきた．加藤らによって開発された ARToolKit[2][3] は，その代表例である（**図 2**(a)）．しかしながら，このような人為的で目立つマーカ（fiducial と呼ばれる）を図 2(b)のように至る所に貼付するという無粋さが嫌悪され，周囲の人々からは美観を損ねるという苦情も少なくない．



図 1 従来の画像マーカの利用例
Fig.1 Examples of existing fiducial markers



(a)　(b)
図 2 ARToolKit マーカ
Fig.2 ARToolKit markers

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の両立を達成する位置合わせ手法を提唱し，その目的でデザインされたマーカ群を SFINCS (Semi-Fiducial INvisibly Coded Symbols) ［半人為的で，目立たないように符号化された記号群の意］と総称した．美観を損ねないマーカ構築の方法論として，(1)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方法と，(2)現実環境に自然に存在

*1 立命館大学総合理工学研究機構
*2 立命館大学大学院理工学研究科
*1 Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University
*2 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

するものに位置情報を埋め込む方法の 2 通りのアプローチを試みた．(1)に基づいた手法として，これまでに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「ツートンカラー方式(Two-Tone colored marker 方式，TT 方式)」を提案し[4]，マーカ作成の支援を行うオーサリングツールの開発も行ってきた．

本論文では，(2)の具体的な手法として，実環境中に設置されたポスタを位置合わせに利用する「ポスタ埋め込み方式(Poster Masquerade 方式，以下，PM 方式と略す)」を提案する．

2 研究背景と本研究の概要

2.1 研究背景

MR における幾何学的整合性問題は，現在主流となっているビデオシースルー方式を前提とした場合，ユーザが装着した HMD に付随するカメラ，もしくはユーザが所持する携帯端末に装備されたカメラの現実世界中における位置と姿勢を計測する問題として定式化される．幾何学的整合性を扱ってきた従来手法を大別すると

(1) 磁気センサ等の物理センサを用いる手法
(2) カメラを用いた画像認識を応用した手法
(3) 上記を組み合わせたハイブリッドな手法[5-7]

に分けられる．

とりわけ，(2)の画像認識を応用した手法は，ビデオシースルー方式との親和性の高さから，様々な手法が提案されている．前章で述べたように，簡便性やコストなどの面から多数の方式が検討されているのは，人為的マーカを現実世界中に配置する手法である[8-10]．これらの方式の基本となる考え方は，マーカを表す基本的な形状を決めた上で，その中に含まれるパターンによって ID を一意に決定するという方法である．

例えば，ARToolKit の場合，マーカは，一定の太さを有する黒色の正方形の枠を有し，その内部に自由なパターンを描いたものとして規定される．内部のパターンは予めシステムに ID と結び付けられて格納される．位置合わせを行う際には，最初にマーカとカメラ間の相対的な位置姿勢の関係を算出した上で，ID 毎に登録された世界座標系における位置姿勢情報と組み合わせる．人為的マーカは概して，デザインの自由度が低く，環境への影響が大きいものの，安定性の高さや初期位置合わせの容易さなどのメリットを有する手法といえる．

一方，人為的マーカの対極に位置するのは，環境中の自然特徴点を用いた手法である．これらの手法は，環境の事前知識無しにカメラの時系列相対移動量を推定するトラッキング手法[11][12]と，事前に登録しておいた環境中の自然特徴点の情報をもとに，カメラの絶対位置・姿勢を求める手法[13-17]に分けられる．

前者は，ロバストな位置合わせを実現するために，カメラトラッキングと同時に環境中の自然特徴点の 3 次元マップを構築する手法[12]が提案されるなど，近年急速な進歩を遂げている．一方，後者は何らかの方法で初期フレームのカメラの位置・姿勢を求める必要があり，いかに高速かつ高精度で初期位置合わせを実現するかが課題となる．

これらの手法では，初期位置合わせに，実環境中に存在する画像テンプレートや環境中の自然特徴点ごとに付近の画像テンプレートをその自然特徴点の実環境中の 3 次元位置と関連付けて格納したデータベースを用いる．当然，登録データが増えれば増えるほど，即ち，より広域な環境で位置合わせを実現しようとすると，初期位置合わせに時間がかかる．自然特徴点を用いた手法は，安定性や初期位置合わせの点で難しさがあるものの，環境への影響に関しては皆無といえる．

このような中，美観を損なうことなく，従来の目立つ人為的マーカに近い精度をもった位置合わせ手法の提案が望まれる．この考え方こそが，我々の提唱する SFINCS の基本理念である．

「美観を損ねない／目立たないマーカ」という意図を達成した手法は，既に幾つか発表されている．中里ら[18]は，再帰性反射材を用いて作成したマーカを天井に貼付し，赤外線を放射した上で赤外線カメラによって計測する手法を提案している．この手法は，MR 映像の合成に用いるカメラとは別に，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．

また，齊藤ら[19]は，位置情報を埋め込んだデザイン性に優れた模様のマーカを部屋の内装に施す位置合わせ手法を考案した．しかし，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目立ってしまうという問題点がある．

本稿で提案する PM 方式は，環境中に存在しても周囲の雰囲気を乱さないポスタを位置合わせに利用する手法であり，人為的マーカを用いる手法と自然特徴点を利用する手法の中庸に位置付けられる．本方式の要諦は，位置検出に利用するポスタに対して，デザイン上の制約を設け，その制約を，ポスタを検出する上での手がかりとして利用するという考え方である．

デザイン上の制約とは，具体的にはポスタを構成する要素の配置や配色に関する制約であり，以降ではこの制約をデザインルールと呼ぶ．ポスタ

表 1 本手法の位置付け

Tab.1 Orientation of the proposed method

	環境への影響	安定性	初期位置合わせ	デザイン自由度
人為的マーカ	大	高	易	低
自然特徴点	無	低	難	×（対象外）
SFINCS-PM	中	中	易	中

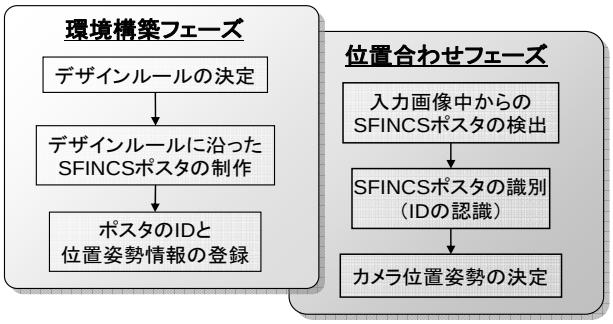


図 3 PM 方式を利用した位置合わせのワークフロー

Fig.3 Workflow of registration using SFINCS-PM

をマーカとして利用する場合，デザインの自由度を完全に残し，テンプレートマッチングなどによって検出するという方式も考えられるが，本研究では，ポスタ検出の難しさや安定性の低下はデザインの自由度に起因すると考え，デザインルールという概念を導入した．画像認識を利用した手法における本研究の位置付けを**表 1** に示す．

2.2 提案方式の概要

PM 方式は，掲示板やポスタボード，壁面等にポスタを貼付して位置合わせを行う．処理の手順としては大きく，環境構築フェーズと位置合わせフェーズに分けられる（**図 3**）．

環境構築フェーズでは，最初に位置合わせに利用するポスタのデザインルールおよびそれらのポスタの識別に用いるポスタの特徴を示す ID ルールを決定する．その上で，デザインルールを満足するポスタを制作し，環境中に設置する．ここで，ポスタの審美性と検出･位置合わせ･識別の頑健性を確認し，所望の精度が達成されるまでポスタの調整を行う．最終的に，設置したポスタの識別に用いる特徴量と 3 次元位置姿勢情報をデータベースに登録する．ポスタ作成以外の工程は，PM 方式を利用する環境構築担当者が，我々が提供するオーサリングツールを利用して行うことを想定している．

位置合わせフェーズでは，カメラから得られる画像を入力とし，最初に画像中から SFINCS ポスタ領域の検出を行う．次に，ポスタの識別を行い，得られた ID を用いてカメラの位置姿勢を決定する．**図 4** に PM 方式による MR 合成の画像例を示す．



図 4 PM 方式による MR 合成画像例

Fig.4 Generated images of SFINCS-PM

図 4 にも示した通り，当然ながら環境中には位置合わせに利用するポスタ以外のポスタや掲示物が貼付されていることが想定され, このような環境の中, 如何にして位置合わせ用のポスタのみを検出するかが大きな課題となる．本研究では，デザインの自由度をデザインルールという形で減少させると同時に, ポスタ検出の手がかりとして利用することで，検出精度を高めている．次章では，下記に定義した言葉を用いて PM 方式についての詳細を述べる．

- **SFINCS ポスタ**：PM 方式で位置合わせに利用するポスタのこと．
- **デザインルール**：画像中のポスタ候補領域が SFINCS ポスタであるか否かを判定するルール．
- **ID ルール**：SFINCS ポスタを一意に識別するためのルール．デザインルールによって ID の埋め込み方式が変わるため，デザインルールとともに定められる．
- **共通ルール**：全ての SFINCS ポスタに共通のルール．下記の 2 つのルールを定める．
  - 形状は長方形とし，縦横比は一般的なポスタサイズと同様の $\sqrt{2}:1$ とする．
  - 輪郭は設置面と異なる色とする．
- **ルールスキーム**：デザインルール及び ID ルールを設計するための体系．
- **ルールセット**：ルールスキームに基づいて設計されたデザインルールとポスタ ID ルールの組．

3 ルールスキームを利用したルールセットの設計

PM 方式では，本手法を利用した MR アプリケーションシステムの設置者が，位置合わせに用いるポスタのルールセットを設計し，現実環境中に貼付するポスタのデザインを行うことを想定している．ポスタのデザインは絵や文字などの構成要素の配置とポスタ上での配色によって決まる[20]ことに基づき，開発者側がルールセットの設計を行う枠組みとして，

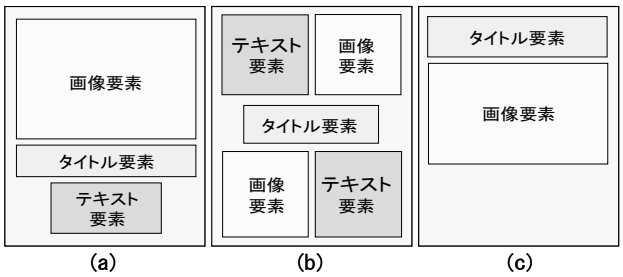


図 5 配置ルールスキームに基づいたデザインルール例

Fig.5 Example design rules based on layout rule scheme

配置ルールスキームと配色ルールスキームの 2 種類のルールスキームを導入した．

ルールスキームにはこれら 2 つだけではなく，構成要素を変更したものや両者を組み合わせたものなど様々なルールスキームがあると考えられる．環境構築担当者が MR アプリケーションの実行環境を用意する際は，最初にルールスキームを選択し，それに則ってルールセットを設計する．

3.1 配置ルールスキーム

配置ルールスキームとは，画像や文字などのポスタの構成要素のレイアウトを利用したルールスキームである．ポスタの構成要素として以下の 3 つを定義する．

- **タイトル要素**：1 行または 2 行の文字列から構成される要素．文字色は単色とし，ポスタ背景色に対して目立つ色とする．下記の 2 つの条件をともに満たすものをタイトル要素と判定する．
  - **(i)** 対象領域内の色相値において，ポスタの背景色を除いたヒストグラムの分散値が閾値以下である．
  - **(ii)** 文字列の色相値を持つ画素を水平方向に射影した際のヒストグラムを求め，文字列の行数を調べ，文字列が 1 行または 2 行である．
- **画像要素**：1 枚の矩形の写真から構成される要素．多数の色から構成される要素とする．対象領域内の全画素の色相値のヒストグラムにおいて，度数が閾値以上である値の数が閾値以上であるとき，対象領域を画像要素であると判定する．
- **テキスト要素**：複数行の単色文字列で構成される要素．タイトル要素の条件(i)のみを満たす場合，テキスト要素であると判定する．

［デザインルール］

デザインルールは，これらの構成要素の種類と配置関係により設定される．配置ルールスキームに基づいたデザインルールの例を**図 5** に示す．例えば，デザインルール図 5(a)を採用した場合，ポスタの上部に画像要素が位置し，その下にタイトル要素，そして一番下にテキスト要素があるレイアウトのポスタのみを SFINCS ポスタと見なす．各要素の定義に基づき，各要素を判定する関数を用意し，それらの関数をデザインルールに従って局所的に適用することで SFINCS ポスタであるかどうかの判定を行う．

［ID ルール］

ポスタ背景色やタイトル要素，テキスト要素等の色相値，画像要素の色相の最頻値等，事前に用意された特徴のリストから，ID 認識に用いる特徴を複数選択し，決定する．

3.2 配色ルールスキーム

配色ルールスキームとは，ポスタの色の特徴を利用したルールスキームである．デザインルールにはポスタ全体の色ヒストグラムにおける条件を利用する．

［デザインルール］

あらかじめ用意されたポスタの色ヒストグラムに関する条件のリストから必要な条件を選択し，閾値を設定することでデザインルールを設計する．配色ルールスキームでは，複数のルールの論理積によってデザインルールを表現する．以下にポスタの色ヒストグラムに関する条件の例を挙げる．なお，キーカラーA，B は，それぞれ，ポスタの色ヒストグラムにおいて最も多く使われている色相と 2 番目に多く使われている色相を示す．

- キーカラーA, B の色相値が x 以上 y 以下である．
- キーカラーA, B の構成比が k 以上 l 以下である．
- キーカラーA，B の構成比の和，差が u 以上 v 以下である．
- 有彩色と無彩色の割合が m 以上 n 以下である．

［ID ルール］

キーカラーの色相値や RGB 値，キーカラーの構成比や有彩色の割合の値等，ポスタの色彩に関する特徴のリストの中から，ID 認識に用いる特徴を複数選択し，決定する．

4 位置合わせアルゴリズム

図 6 に位置合わせフェーズの処理手順を示す．位置合わせフェーズでは入力画像中から SFINCS ポスタを検出し，コンテンツを重畳描画するために①～④の 4 つのステップの処理を逐次的に実行する．また，カメラの位置合わせに成功した場合，次フレームではトラッキングを行うことで，処理の高速化および検出の安定性の向上を図る．以下に各ステップの処理について詳述する．

① Segmentation Step

入力画像中から四角形領域を検出することで，SFINCS ポスタの候補となる領域の検出を行う．四角形領域の検出は下記の手順により実現する．

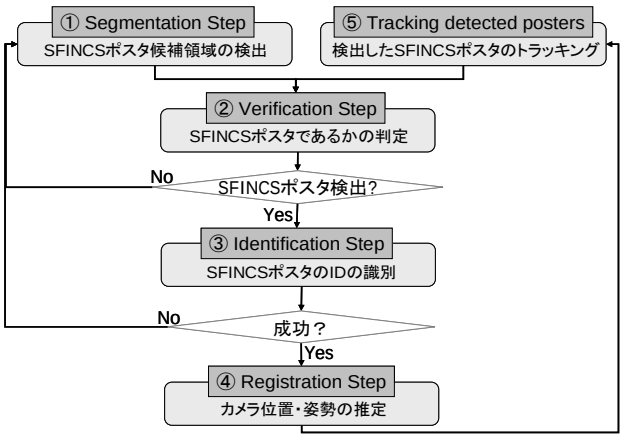


図 6 カメラ位置・姿勢推定までの処理の流れ
Fig.6 Flowchart of the registration

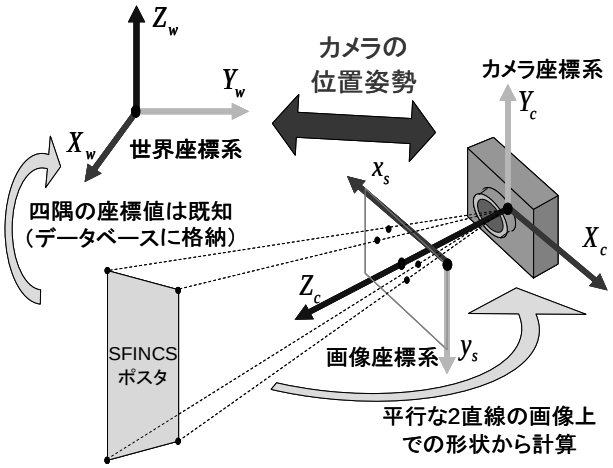


図 7 カメラ位置・姿勢の算出
Fig.7 Calculating camera position and posture

i) カメラからの入力画像全体に対してエッジ検出を適用し，エッジを検出する．
ii) 検出されたエッジの中から長さが一定以上の縦方向のエッジ線分を探す．
iii) 検出された 2 本の縦方向エッジ線分の全ての組において，始点間・終点間にそれぞれエッジ線分が存在するかを判定し，存在すれば四角形領域として検出する．

② Verification Step

①で検出した SFINCS ポスタの候補領域から SFINCS ポスタを検出する．検出の手順は以下の通りである．

i) ポスタ候補領域に逆射影変換を行い，縦横比 $\sqrt{2}:1$の長方形に正対させる．
ii) 正対させたポスタ候補領域がデザインルールを満たすかどうかを判定する．デザインルールの条件を全て満たせば，そのポスタ候補を SFINCS ポスタとして判定する．

③ Identification Step

検出した SFINCS ポスタの ID を推定する．ID の推定には ID ルールを用い，ポスタテーブルに登録された SFINCS ポスタと画像特徴を比較することによって ID の推定を実現する．n 個の画像特徴を ID の識別に利用する場合，ポスタテーブルにおける ID が i であるポスタの j 番目の画像特徴量を $G_{i,j}$，SFINCS ポスタ領域から検出された画像特徴量を G_j とすると，SFINCS ポスタの ID は式 (1) によって得られる E_i が最小値となり，かつ E_i が閾値 T 以下となる i となる．ここで w_j は各特徴量に対する重み係数である．全ての E_i が式(2)を満たさないときは，ID 識別に失敗したものとみなし，カメラの位置姿勢推定を行わない．

$$E_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \left| G_{i,j} - G_j \right| \tag{1}$$

$$E_i \le T \tag{2}$$

④ Registration Step

SFINCS ポスタの ID が特定されたら，データベースに格納されているポスタの ID と四隅の点の三次元位置情報を利用して，カメラの位置・姿勢を算出する．**図 7** にカメラ位置･姿勢算出の概念図を示す．

カメラの位置・姿勢の算出は，世界座標系とカメラ座標系の関係を求めることに帰着する．世界座標系におけるポスタの四隅の点の位置がデータベースに格納されていることから，ポスタとカメラの位置関係が求まれば，世界座標系におけるカメラの位置・姿勢が求まることになる．ポスタとカメラの位置関係は，ポスタの四隅の点によって構成される，世界座標系において平行な 2 組の 2 直線の画像上での形状から求める．原理的には，ARToolKit における位置合わせの原理と同様のアルゴリズムである．

⑤ Tracking detected posters

前フレームにおいてカメラ位置・姿勢の推定に成功したフレームでは，前フレームと現フレームにおいて入力画像中のポスタの位置が大きく変わることはないという仮定のもと，探索範囲を限定する．具体的には，前フレームにおけるポスタの四隅の点付近において検出された自然特徴点のうち，周囲のテクスチャが前フレームのポスタの四隅の各点の周囲のテクスチャと最も類似する特徴点を現フレームにおけるポスタ候補領域の四隅とする．これにより，Segmentation Step の処理を省略し，処理の高速化を図る．

5 実験

本節では，PM 方式の位置合わせ性能および実行時間を定量的に示す実験結果について述べる．まず，5.1 節では，PM 方式が，SFINCS ポスタとそうでな



(a)　(b)　(c)　(d)

ルールセット R_1 のポスタ例



(e)　(f)　(g)　(h)

ルールセット R_2 のポスタ例

図 8 R_1, R_2 のポスタの例

Fig.8 Example posters based on rule set R_1, R_2

いポスタをどれだけ識別できるかについて調べた実験について述べる．次に，4 種類の SFINCS ポスタの認識可能な範囲を調べた(5.2 節)．5.3 節では，5.2 節で最も広い範囲で認識可能だった SFINCS ポスタのカメラ位置姿勢の推定誤差を計測し，ARToolKit の計測誤差との比較を行った実験について述べる．最後に，5.4 節で実行時間について述べる．

5.1 SFINCS ポスタの認識に関する実験

配置，配色ルールスキームを利用して設計したルールセット R_1, R_2 において，デザインルールに適合したポスタだけをどれだけ正しく認識できるかを調査した．ルールセット R_1, R_2 の内容は以下に，ルールセット R_1, R_2 のポスタの例をそれぞれ図 8(a)～(d)，および(e)～(h)に示す．

●ルールセット R_1

［デザインルール］

- 各構成要素のレイアウトは図 5(c)とする．
- ポスタの背景色は単色とする．

［ID ルール］

- ポスタの ID はポスタ背景色の色相値，タイトルの文字色の色相値，画像要素の色相の最頻値に埋め込む．

●ルールセット R_2

［デザインルール］

- キーカラーA およびキーカラーB が有彩色である．
- キーカラーA，B の構成比をそれぞれ C_A，C_B，有彩色，無彩色の構成比をそれぞれ C_{CC}，C_{AC} としたとき，式(3)および(4)を満たす．

$$C_A + C_B \geq C_{CC} \times 0.8 \tag{3}$$

$$C_{CC} \geq C_{AC} \tag{4}$$

［ID ルール］

- ポスタ ID はキーカラーA，B の色相値とその割合，無彩色のポスタ全体に対する割合に埋め込む．

本実験には共通ルールを満たし，かつ，十分な解像度（640×480[pixel]以上）を持つ 103 枚のポスタを用いた．これら 103 枚の内訳を以下に示す．

- R_1 のデザインルールに適合したポスタ：34 枚
- R_2 のデザインルールに適合したポスタ：18 枚
- R_1，R_2 両方のデザインルールに適合しないポスタ：51 枚

これらのポスタは，複数の学生によってデザインされたポスタ及び，画像検索エンジン Google 画像検索で「ポスタ」をキーワードに検索した画像とした．

A4 サイズ（縦 297×横 210[mm]）で印刷したこれら 103 枚のポスタを壁面に貼り，約 1m 離れたカメラでほぼ正面から撮影した．本実験で使用した計算機の仕様は，CPU: Intel Core 2 Duo 1.86GHz，メモリ: 1.0GB で，カメラには Point Grey Research 社製の IEEE1394 カメラ Flea2(最大解像度：640×480[pixel])を用いた．入力画像中のポスタのおおよその大きさは縦 470×横 235[pixel]であり，画面の短辺に対してポスタの長辺がぎりぎり収まる大きさであった．

実験の結果，全てのポスタについて，R_1 ポスタは R_1 ポスタであると，R_2 ポスタは R_2 ポスタであると，どちらでもないポスタはどちらでもないと認識した．このことから，カメラからポスタまでが近距離で認識に容易な状況下では，SFINCS ポスタとそうでないポスタを正しく識別できることが分かった．

5.2 ポスタの認識可能範囲

次に，SFINCS ポスタの認識性能を示すために，SFINCS ポスタを認識可能な範囲を調査した．1 枚ずつ白色の壁面に貼った図 8(a),(b),(e),(f)の 4 種類のポスタを前節の実験と同じカメラで撮影し，認識可能なカメラ位置・姿勢の計測を行った．

実験では，SFINCS ポスタの法線とカメラの光軸とがなす角を 0°から 75°まで 15°刻みで変更し，カメラ画像の中央にポスタの中心を捉えた状態でポスタとカメラの距離を変化させ，(i)ポスタを認識可能な範囲と，(ii)安定して認識可能な範囲を計測した．

本実験では，トラッキング処理を用いず，Segmentation Step および Verification Step の処理により SFINCS ポスタの認識に成功したフレームをポスタの認識に成功したフレームと定義した．(i)は，実験開始直後からの入力動画像 100 フレーム中，1 フレームでも SFINCS ポスタの認識に成功した範囲，

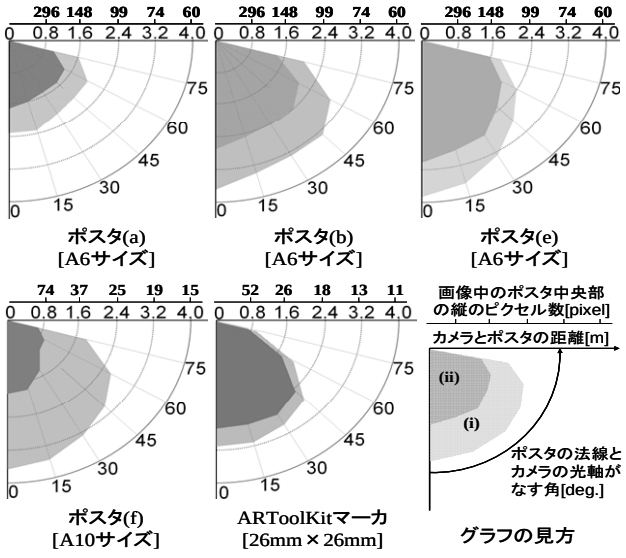


図 9 ポスタの認識可能範囲

Fig.9 Detectable area of each poster

(ii)は同 100 フレーム中 50 フレーム以上において認識に成功した範囲とした.

なお, 本実験では, ポスタのデザインによって(i), (ii)の値が大きく変わるため, 実験環境の広さの制限により, 本実験には A6 サイズ（縦 148mm×横 105mm）および A10 サイズ（縦 37mm×横 26mm）のポスタを利用した．また，一辺 26mm（A10 サイズの短辺と同じ長さ）の ARToolKit マーカに対しても同様の実験を行った.

図 9 に計測された各ポスタおよび ARToolKit マーカの認識可能範囲を示す．なお，図 9 の各グラフは左上をポスタの位置とし，原点からの距離がカメラとポスタの距離を示す．カメラの光軸とポスタの法線がなす角は，原点から見て下方向を 0° （ポスタを正面からカメラで捉えた状態）として，円周方向に沿って大きくなるものとする．また，実験に用いたポスタのサイズが異なるため，目安としてカメラとポスタの距離の上にそれぞれのカメラ画像中のポスタ領域の縦のピクセル数を記す．グラフ間の比較はこの数値を目安に行われたい.

提案手法では，本実験で使用したような小さなサイズのポスタを用いるのではなく，A0（縦 1189mm×横 841mm）～A4（縦 297mm×横 210mm）サイズのポスタを掲示板や壁面に貼り，位置合わせに利用することを想定している．ポスタの認識精度は，カメラ画像中のポスタの大きさに依存すると考えられる. よって，大きさの異なるポスタを貼った場合，入力画像中のポスタが同等の大きさであるときに，同程度に認識される. 即ち，A2 サイズのポスタを用いた場合は，図 9 のグラフにおいて，ポスタの法線とカメラの光軸のなす角はそのままで，カメラとポスタの距離が，ポスタ(a),(b),(e)では 4 倍のとき，ポスタ(f)では16倍のときに図9の結果と同程度に認識されると考えられる.

表 2 ポスタ (e)，(f) の構成比

Tab.2 Composition ratio of poster (e) and (f)

	C_{CC}	C_{AC}	C_A/C_{CC}	C_B/C_{CC}
ポスタ(e)	0.54	0.46	0.86	0.10
ポスタ(f)	0.92	0.08	0.78	0.20

本実験の結果より，ポスタのデザインによって認識可能な範囲が大きく変わることが分かる．特に，(a)のデザインのポスタを認識するためには他のポスタより大きくカメラ画像に映っている必要があり，(f)のデザインのポスタは他のポスタと比べて，カメラ画像中で小さく映った状態でも認識可能であった.

この原因として，各ポスタのデザインルールの判定関数に対するロバスト性の違いが考えられる．例を挙げると，各ポスタのデザインルールの判定に用いる特徴量（**表 2**）に示されるように，ポスタ(f)はポスタ(e)に比べて，式(3)および(4)を，余裕を持って満たすため，量子化誤差に対して頑健であると考えられる.

また，ポスタ(f)は，評価基準(i)に関しては同等サイズの ARToolKit マーカと遜色のない認識可能範囲であった．一方，評価基準(ii)については大きな差があり，安定した認識能力については ARToolKit マーカには及ばないことがわかる．これは，本手法のポスタ検出アルゴリズムが ARToolKit に比べて，蛍光灯のフリッカやカメラのブラーの影響等に脆弱であることが最大の理由だと考えられる. しかしながら，評価基準(i)に大きな差はないことから，トラッキングの利用や今後の手法の改善によって ARToolKit マーカに近い認識性能を実現することも不可能ではないと考えられる.

5.3 位置・姿勢計測誤差

次に，前節の実験で最も広範囲から認識することができたポスタ(f)と ARToolKit マーカを用いて，位置・姿勢の計測精度を定量的に評価するために，文献[2]で行われている実験と同様の実験を行った. A6 サイズのポスタ(f)と一辺の長さが 105mm の ARToolKit マーカを壁面に貼付し，貼付中心とカメラ間の距離及びカメラの光軸とポスタの設置面がなす角度を離散的に変えながら，それぞれの位置・姿勢計測結果を記録した．ポスタおよびマーカの貼付中心とカメラの距離および姿勢の真値はメジャーおよび分度器で実測した．また，入力画像の中心とマーカ・ユニットの中心が一致するように手動で調節して計測を行った.

図 10 に, ポスタもしくはマーカを正しく認識して

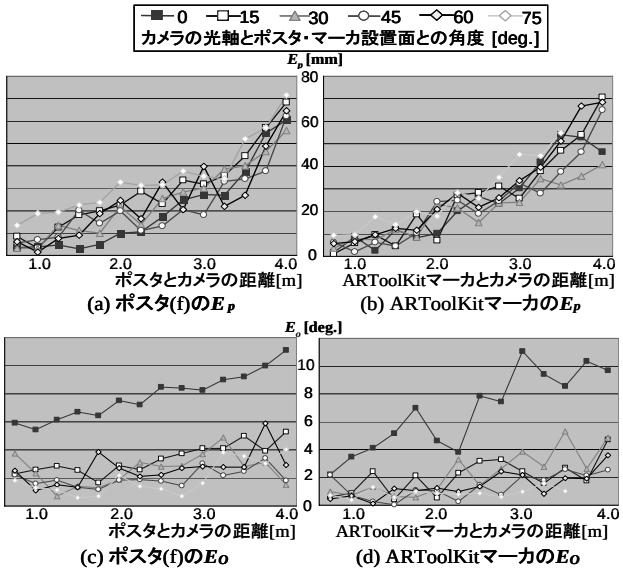


図 10 カメラ位置・姿勢計測誤差

Fig.10 Registration Errors

位置合わせを行ったそれぞれ 100 回の計測結果における位置計測誤差 E_P・姿勢計測誤差 E_O の平均を示す．記録した E_P および E_O は，世界座標系におけるカメラ位置の真値を (X, Y, Z)，ポスタおよびマーカを利用して計測されたカメラ位置を (X_E, Y_E, Z_E)，カメラの光軸方向の単位ベクトルの真値を $\vec{C}$，ポスタおよびマーカから推定されるカメラの光軸方向の単位ベクトルを $\vec{C}_E$ としたとき，それぞれ式(5)および(6)で表される．

$$E_p = \sqrt{(X - X_E)^2 + (Y - Y_E)^2 + (Z - Z_E)^2} \qquad (5)$$

$$E_O = \left|\arccos(\vec{C} \cdot C_E)\right| \qquad (6)$$

本実験結果より，ポスタ(f)は姿勢計測で若干 ARToolKit マーカに劣るものの，ほぼ同程度の位置合わせ機能を持つことがわかる．また，同一平面上に存在する 3 次元位置が既知な（ポスタおよびマーカの四隅の）4 点の入力画像上での位置をもとに位置合わせを行うという手法の性質上，提案手法は ARToolKit マーカと同様に，正面から撮影した際に姿勢の計測誤差が大きくなるという特徴を持つことが分かった．

5.4 実行時間

最後に提案手法の実行時間に関する実験について述べる．提案手法は，アルゴリズムの性質上，事前にデータベースに登録する位置合わせポスタの数と実行時間の相関は低く，①Segmentation Step で検出されるポスタ候補領域の数および②Verification Step で検出される SFINCS ポスタの数に伴い計算量が増加する．そこで，

表 3 (1)の計測結果[msec.]

Tab.3 Processing time of (1)

	検出したポスタ候補数					
	1	5	10	20	30	50
Segmentation	8	18	22	33	51	78
Verification	18	32	91	201	303	684
Identification	0	0	0	0	0	0
Registration	2	2	3	2	2	4
Total	28	52	116	236	356	766

表 4 (2)の計測結果[msec.]

Tab.4 Processing time of (2)

	検出したSFINCSポスタ数		
	1	5	10
Segmentation	10	10	9
Verification	72	99	111
Identification	0	0	0
Registration	3	8	13
Total	85	117	133

(1) ②を 1 に固定して①を変化させた場合

(2) ①を 10 に固定して②を変化させた場合

の位置合わせフェーズの各ステップにかかる時間を計測した．計測結果をそれぞれ，**表 3**，**表 4** に示す．

表 3 に示す結果より，提案手法は，環境が複雑になり，入力画像中から多数のポスタ候補領域が検出されると，Segmentation Step および Verification Step に時間がかかり，ビデオレートでの初期位置合わせは保障されないことが分かる．ただ，通常のオフィス環境では多くとも，①は 50 個程度であり，入力画像上である程度の面積を持った四角形領域のみをポスタ候補領域と見なすことで，①を 10 個程度に減らすことが可能である．表 4 に示す結果より，提案手法は②の増加によっても Verification Step に時間がかかることが分かるが，本手法の利用用途を考えると，同時に入力画像に映る SFINCS ポスタの数は多くとも 10 個程度であり，致命的な実行時間の増加を示す結果ではない．以上より，提案手法が実利用に耐えうる実行時間で位置合わせを実現できることが分かる．

6 考察

以上の実験結果を踏まえ，本論文で提案した PM 方式の特性･意義および今後の発展に関して述べる．

・ID 識別性能

PM 方式では，ID ルールの設計（識別に用いるポスタの特徴の選択）は環境構築担当者に委ねられており，用意された選択肢を組み合わせることで，類似性の低い十数枚程度のポスタなら十分に識別可能

な ID ルールを設計可能であると考える．しかし，今後，ポスタの識別性能に関して厳密に調査し，限界を明らかにする必要がある．特に，類似性の高い複数のポスタを登録した場合，それらをどれくらい正しく識別することができるかを明示する必要があると考える．

・複数のルールセットの同時利用

現在の PM 方式では，1 つのルールセットの利用に限定している．複数のルールセットの同時適用は，Verification step での処理時間が増大し，実時間体験が大前提の MR システムでは計算負荷が大きいためである．コンピュータの計算性能が向上すれば，複数のルールセットの同時利用や，メタルールセットの導入も十分可能であると考えられる．

・位置合わせの制限

現 PM 方式では，ポスタ全体がカメラ画像内に収まった状態でないと位置合わせができないという制約がある（トラッキング時はポスタの四隅が画面内に収まっていれば良い）．また，Segmentation Step で，縦の線分を検出しているため，カメラを 90° 傾けてポスタを映した場合は，正しくポスタが検出されないことがある．ただし，これらについては，利用目的から考えて早急な改善は不要であると考える．

7 むすび

本稿では，美観と検出の頑健性を両立した MR のための位置合わせ手法として，デザインルールに則ったポスタを利用する SFINCS-PM 方式を提案した．本方式は，ARToolKit マーカのような人為的マーカを環境中に貼付する手法に比べて景観への影響が少ない．また，検出の頑健性ではやや劣るものの，検出に成功した場合の位置合わせ能力は，人為的マーカを利用した手法と比較して，大きな性能低下がないことを確認した．

ポスタのデザインにおける自由度は，ポスタ検出における安定性とトレードオフの関係にあり，提案手法では，デザインルールという概念を導入することで，そのバランス自体を調整可能な枠組みとした．さらに，ルールスキームという概念により，デザインの方向性にもバリエーションを与えている．

こうした枠組みを理解し，本方式に真に威力を発揮する MR システム実行環境を構築し，ポスタ設置を行うには，かなりの経験と試行錯誤過程が必要であると考えられる．しかしながら，このような試行錯誤過程があり，ポスタ・デザインに自由度が与えられているからこそ，システム運用者の嗜好や美意識を反映できるのである．本研究は，高性能で汎用性の高い MR 位置合わせ手法を指向するのではなく，適用範囲は狭くても，他の方式にはない個性ある枠組みを提供することを目指している．

その意図したところの第 1 段階は，本研究実験において概略達成できた．今後は，PM 方式の有用性を高めて行くため，ルールセット記述や設置運用の試行錯誤を支援するオーサリングツール開発を行う．

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”, VR 学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp.171 - 180, 2003.

[2] 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”，同上，Vol. 4, No. 4, pp. 607 - 616, 1999.

[3] 加藤博一：“拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発”，信学技報 PRMU2001-232, Vol. 101, No. 652, pp. 79 - 86, 2002.

[4] R. Tenmoku, Y. Yoshida, F. Shibata, A. Kimura, and H. Tamura: “Visually elegant and robust semi-fiducials for geometric registration in mixed reality,” Proc. 6th Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 07), pp. 261 - 262, 2007.

[5] 佐藤清秀，穴吹まほろ，山本裕之，田村秀行：“屋外装着型複合現実感のためのハイブリッド位置合わせ手法”, VR 学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 129 - 137, 2002.

[6] 内山晋二，山本裕之，田村秀行: “複合現実感のためのハイブリッド位置合わせ手法 ―6 自由度センサとビジョン手法の併用―”，同上, Vol. 8, No. 1, pp. 119 - 126, 2003.

[7] L. Naimark and E. Foxlin: “Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker,” Proc. ISMAR 02, pp. 27 - 36, 2002

[8] G. Thomas: “Mixed reality techniques for TV and their application for on-set/pre-visualization in film production,” DVD Proc. Int. Workshop on Mixed Reality Technology for Filmmaking, pp. 31 - 36, 2006.

[9] G. Bianchi, C. Jung, B. Knörlein, M. Harders, and G. Székely: “High-fidelity visuo-haptic interaction with virtual objects in multi-modal AR systems,” Proc. ISMAR 06, pp. 187 - 196, 2006.

[10] E. Mendez, D. Kalkofen, and D. Schmalstieg: “Interactive context-driven visualization tools for augmented reality,” *ibid*., pp. 209 - 218, 2006.

[11] I. Gordon and D. G. Lowe: “Scene modeling, recognition and tracking with invariant image features,” Proc. ISMAR 03, pp. 110 - 119, 2004.

[12] G. Klein and D. Murray: “Parallel tracking and mapping for small AR Workspaces,” Proc. ISMAR 07, pp. 225 - 234, 2007.

[13] V. Ferrari, T. Tuytelaars, and L. VanGool: “Markerless augmented reality with a real-time affine region tracker,” Proc. 4th Int. Symp. on Augmented Reality, pp.87 - 96, 2001.

[14] L. Vacchetti, V. Lepetit, and P. Fua, “Combining edge and texture information for real-time accurate 3D camera tracking,” Proc. ISMAR 04, pp.48 - 57, 2004.

[15] R. Bastos and M. Dias: “Fully automated texture tracking based on natural features extraction and template matching,” Proc. Advances in Compt. Entertain. Tech. 2005, pp.180 - 183, 2005.
[16] 武富貴史，佐藤智和，横矢直和:“優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースに基づく実時間でのカメラ位置・姿勢推定”，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2008), pp. 860 - 865, 2008.
[17] G. Reitmayr and T. W. Drummond: “Going out: Robust model-besed tracking for outdoor augmented reality,” Proc. ISMAR 06, pp. 109 - 118, 2006.
[18] 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”，VR 学会論文誌，Vol.10, No.3, pp.295 - 304, 2005.
[19] 齊藤滋，檜山敦，谷川智洋，廣瀬通孝:“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”, VR 学会第 11 回大会, pp.498 - 501, 2006.
[20] 「プロとして恥ずかしくないレイアウト＆配色の大原則」，インプレスコミュニケーションズ, 2005.

(2009 年 1 月 8 日)

[著者紹介]

天目 隆平（正会員）



2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期過程修了．2006 年同研究科博士後期過程修了. 同年 4 月より立命館大学特別研究員，現在に至る．博士（工学）．複合現実感，モバイルコンピューティングに関する研究に従事．IEEE，電子情報通信学会の会員．

西上 彰人（学生員）



2008 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 大学院理工学研究科博士前期課程に在学中．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）



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1999 年同 研究科博士後期課程修了．大阪大学産業科学研究所助手を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授．現在，同情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，複合現実感等の研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会，情報処理学会等の会員．2005 年本学会学術奨励賞受賞.

木村 朝子（正会員）



1996 年大阪大学基礎工学部卒．1998 年同 大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同大学助手，立命館大学理工学部助教授，科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て，2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授．博士（工学）．実世界指向インタフェース，複合現実感，ハプテックインタフェースの研究に従事．2001 年より 2002 年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate．電子情報通信学会，情報処理学会，ヒューマンインタフェース学会，ACM，IEEE 各会員．本学会学術奨励賞，情報処理学会山下記念研究賞等受賞.

田村 秀行（正会員）



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．現在，同情報理工学部メディア情報学科教授．工学博士．1997 年より 2001 年まで, MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．本学会元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」(オーム社) など．電子情報通信学会フェロー，IEEE, ACM，情報処理学会，人工知能学会，映像情報メディア学会等の会員．情報処理学会論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞.