

不可視マーカを用いた位置・姿勢推定のための 環境構築とユーザ位置・姿勢推定システム

中里 祐介^{*1*2} 神原 誠之^{*1} 横矢 直和^{*1}

A User Localization and Marker Initialization System Using Invisible Markers

Yusuke Nakazato^{*1*2}, Masayuki Kanbara^{*1} and Naokazu Yokoya^{*1}

Abstract – A wearable augmented reality (AR) system has received a great deal of attention as a new method for displaying location-based information in the real world. In wearable AR, it is required to precisely measure position and orientation of a user for merging the real and virtual worlds. This paper proposes a user localization system for wearable AR in indoor environments. To realize a localization system, it is necessary to easily construct environments for localization without producing undesirable visual effects. In the proposed system, wallpapers containing printed invisible markers are pasted on ceilings or walls. To construct environments for localization, this system contains a tool which calibrates the alignment of the markers from photos of the markers with digital still camera. The user's position and orientation are estimated by recognizing the markers using an infrared camera with infrared LEDs.

Keywords : invisible marker, localization, augmented reality, retro-reflector, infrared camera, wearable computer

1 はじめに

ウェアラブル拡張現実感 (Augmented Reality: AR) は、ユーザが装着したウェアラブルコンピュータやモバイル端末を用いて現実環境に仮想環境を重畳表示することにより、ユーザの位置に応じた情報などを直感的に提示可能な技術であり、ヒューマンナビゲーションなどの分野での実用化が期待されている。このウェアラブル拡張現実感では、現実世界と仮想世界の座標系の位置合せを行うためにユーザの正確な位置・姿勢計測が重要な課題となる。そこで本研究ではウェアラブル拡張現実感を実際の環境で利用するために、屋内環境においてユーザの位置・姿勢を精度良く推定することが可能なシステムの実現を目的とする。

従来、ユーザの位置・姿勢を計測する手法として、屋外では広範囲で位置の計測が可能な GPS と姿勢計測のためのジャイロセンサを組み合わせる手法がよく用いられている [1, 2, 3]。一方、屋内では GPS の利用が困難であるため、さまざまな位置計測手法が提案されている [4, 5]。代表的なものに、環境中に設置した赤外線ビーコンから信号を受信することにより絶対位置を計測する手法 [6, 7] がある。しかし、この手法では位置検出は安定に行えるが、電源を必要とする赤外

線ビーコンを環境中にインフラとして設置する必要がある。また、あらかじめ計測しておいた実環境の自然特徴点の位置や 3 次元モデルなどを利用して、ユーザが装着したカメラで撮影した画像からユーザの位置・姿勢を計測する手法 [8, 9, 10] も提案されている。このような手法では実環境に手を加える必要が無く、ユーザが装着するセンサがカメラのみで済むという利点があるが、計算量が多く、見た目が似たパターンが多い環境では安定して位置・姿勢を計測することが難しい。

そこで従来、実環境に位置・形状・色が既知の画像マーカを多数配置し、それらをユーザが装着したカメラで撮影した映像からユーザの位置・姿勢を計測する手法 [11, 12] がよく利用されている。この手法では安価な画像マーカを利用するために容易にインフラを設置することが可能であり、またマーカの検出が容易であるため安定した位置・姿勢の計測が可能である。しかしながら、画像マーカは検出が容易である反面、非常に目立つため、現実環境の景観を損ねてしまう。そこで肉眼では見ることのできない赤外線を用いた不可視マーカを利用する手法 [13, 14] や、景観に合わせてデザインしたマーカを利用する手法 [15, 16] が提案されている。

本研究では、実際の屋内環境で利用可能なユーザの位置・姿勢推定システムの実現を目指すため、我々が従来から提案している景観を損ねない半透明の再帰性反射材からなる不可視マーカ [14] を利用する。また実

^{*1}奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

^{*2}現在、キヤノン株式会社

^{*1}Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

^{*2}Presently with Canon Inc.

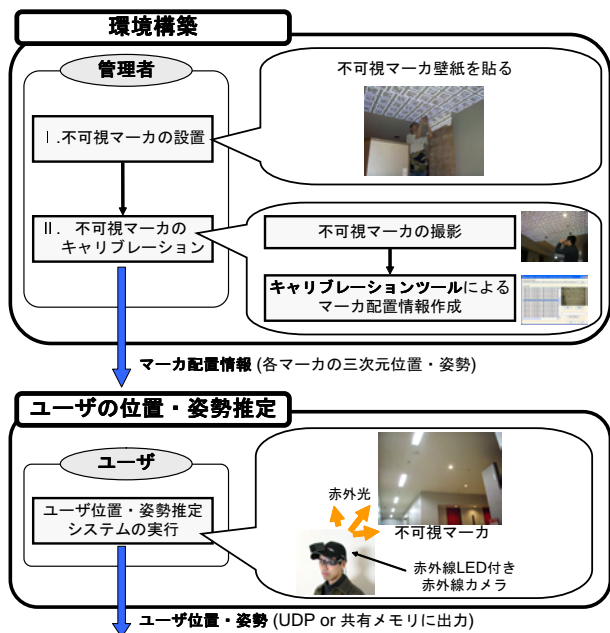


図1 不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定システムの概要
Fig.1 Overview of a user localization system using invisible markers.

際にユーザ位置・位置姿勢推定システムを利用する場合、そのためのインフラを容易に構築できることが望まれる。そのため提案システムは、図1に示すように、位置・姿勢推定のためのインフラ環境を容易に構築する環境構築のフェーズと、その環境の下でユーザの位置・姿勢推定を行うフェーズからなる。

前者の環境構築フェーズでは、不可視マーカのインフラ環境を容易に構築するために、壁紙と同色の再帰性反射材からなるマーカを印刷した壁紙を利用し、マーカのキャリブレーションを行うツールを提供する。マーカを用いて精度良くユーザの位置・姿勢を計測するためには、多くのマーカが密に配置されている方がよい。しかしながら、多数のマーカを一つ一つ貼ることは多くの労力を必要とする。そこで、多数の不可視マーカが印刷された壁紙を使用することにより、マーカ設置作業の労力の軽減を図る。インフラの管理者は、不可視マーカ壁紙の各マーカが個別のIDパターンを持つように加工した後、それを環境中の天井等に貼る。そしてキャリブレーションツールに不可視マーカをデジタルカメラで撮影した画像とそのカメラの内部パラメータ、マーカ的设计情報を入力し、マーカの3次元位置・姿勢が記述されたマーカ配置情報を得る。ここで出力されたマーカ配置情報は後者のユーザの位置・姿勢推定フェーズで利用される。

ユーザ位置・姿勢推定のフェーズでは、環境構築フェーズで得られたマーカの配置情報を利用し、ユーザが装着した赤外線LED付き赤外線カメラで不可視マーカを撮影・認識することにより、ユーザの位置・姿



(a) 不可視マーカ (フラッシュ無しで撮影)
(b) 不可視マーカ (フラッシュありで撮影)
(a) Invisible markers without a flash. (b) Invisible markers with a flash.

図2 天井に設置した不可視マーカ壁紙
Fig.2 Invisible marker wallpaper on a ceiling.

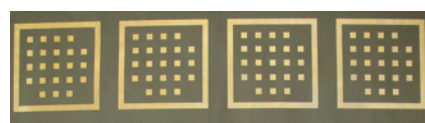


図3 不可視マーカのパターン
Fig.3 Pattern of invisible marker.

勢を推定する。環境構築フェーズで多数の不可視マーカが密に設置されているため、精度良くユーザの位置・姿勢の計測が可能である。

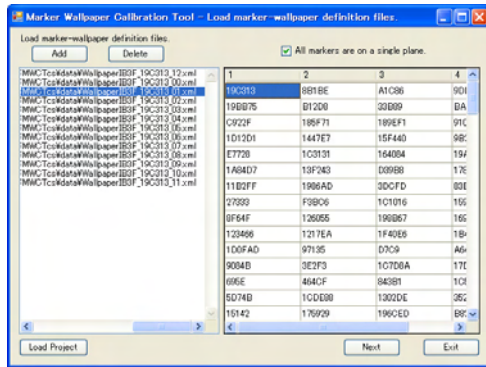
以下、2節では、不可視マーカを用いた位置・姿勢推定のための環境構築フェーズについて述べ、3節でユーザの位置・姿勢推定フェーズについて詳述する。最後に4節で本研究のまとめと今後の課題を述べる。

2 位置・姿勢推定のための環境構築

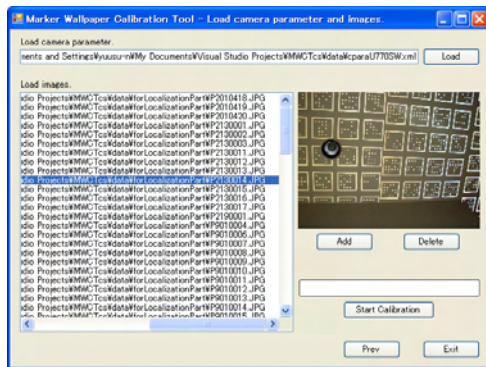
2.1 不可視マーカの設置

本研究ではマーカ設置の簡便化のために不可視マーカを印刷した壁紙を利用する。図2にその不可視マーカ壁紙を設置した天井の様子を示す。不可視マーカ壁紙は提案システムのために特注したもので(ユニチカスパークライト社)、通常の壁紙に壁紙と同色の再帰性反射材からなるマーカが接着されている。そのため再帰性反射材の性質によりカメラのフラッシュなどの光を当てながら撮影するとマーカを高輝度で撮像することができる。

図3に示すように、各マーカの形状は正方形であり、その枠の内部には $N \times N$ の格子状に点が配置されている。ただし画像マーカの向きを一意に決定するために格子の4隅の内1つだけに常に点が配置され、残り3つには点は配置されない。この4隅を除いた格子点を1ビットとして端から順にビットコードを割り当てる。さらにビットコードにはCRC(Cyclic Redundancy Check)による符号化がなされたコードを割り当て、マーカ認識処理においてIDの誤り検出に利用する。したがって、CRCによるチェックビットの数を C とすると、 2^{N^2-4-C} 通りのIDをマーカに



(a) マーカ設計情報入力画面
(a) A form to input information of marker design.



(b) マーカ撮影画像入力画面
(b) A form to input markers' images.

図4 不可視マーカのキャリブレーションツール
Fig. 4 Calibration tool for invisible marker.

割り当てることができる。

印刷工程上、マーカ印刷時に全てのマーカに固有のIDを持たせることはできないため、壁紙には全ビットが1であるようなパターンが印刷されている。そのため、それらのパターンを各マーカが固有のIDを持つように加工する必要がある。提案システムにはパターン作成ツールが用意されており、マーカの大きさ・間隔、格子点の大きさ・間隔・数、CRCチェックビット数を入力すると、各マーカが固有のIDを持ったパターンの図とマーカ設計情報が出力される。パターンには全てのIDが出現するまで同じIDが出現しないようにランダムなIDを持ったマーカが並べられる。マーカ設計情報には、入力したマーカの大きさなどの情報と作成されたIDパターンの並びが記述されており、後述のキャリブレーションツールで利用される。インフラの管理者は、作成されたIDパターン図を見ながら電動やすり等を用いて0ビットに対応する格子点を削り取り、パターン加工された壁紙を天井等の壁面に通常の壁紙と同じように貼る。

2.2 不可視マーカのキャリブレーション

ユーザの位置・姿勢を推定するためには、マーカの3次元位置・姿勢をあらかじめ計測しておく必要があ

基準マーカの位置・姿勢、マーカ撮影画像、カメラ内部パラメータ、マーカ設計情報

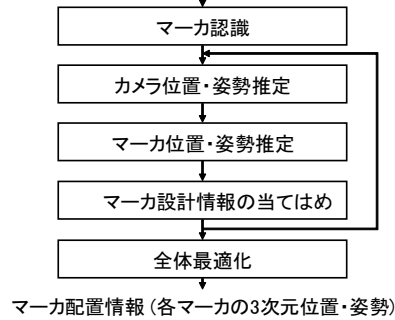


図5 不可視マーカのキャリブレーション処理の流れ
Fig. 5 Flow diagram of marker calibration.

る。そこで提案システムではこの作業を容易にするために、マーカのキャリブレーションツールを提供する。インフラの管理者は解像度の高いデジタルカメラで設置した不可視マーカの画像をフラッシュ撮影し、このツールを用いてマーカの配置情報を作成する。

ツールには、不可視マーカを撮影した画像とそのカメラの内部パラメータ、マーカ設計情報、および基準とするマーカの世界座標系における3次元位置・姿勢を入力する。マーカ設計情報は前述のパターン加工作業で作成され、マーカの大きさ、間隔、格子点の大きさ、間隔、数、CRCチェックビット数、壁紙に加工したIDパターンの並びが記述されている。

キャリブレーションツールを操作する作業員は、まず図4(a)に示すフォームにあるAddボタンを押してマーカ設計情報が定義されたファイルを入力する。マーカ設計情報が入力されるとフォームの右側にIDパターンの並びが表示される。その中から基準とするマーカのIDをダブルクリックして表示されるダイアログにそのマーカの世界座標系における3次元位置・姿勢を入力する。このとき全てのマーカが同一平面上にあると仮定できる場合はチェックボックスにチェックを入れる。全ての基準マーカの入力を終わると、Nextボタンを押して、図4(b)に示すフォームに切り替える。このフォームのLoadボタンを押してカメラの内部パラメータを記述したファイルを読み込み、Addボタンを押してマーカ撮影画像を入力する。最後にStart Calibrationボタンを押すとキャリブレーションが開始され、マーカの配置情報ファイルが出力される。このマーカの配置情報ファイルには、推定されたマーカの3次元位置・姿勢が記述されており、次のユーザ位置・姿勢推定フェーズで利用される。

2.2.1 マーカキャリブレーションの処理概要

キャリブレーションツールにおける具体的な処理の流れを図5に示す。まず最初に入力された画像から、

形状が四角形であるマーカ領域を探索し、ID を認識する。ID を構成するビットコードに対して CRC による誤り検出を行い、誤りの無かったマーカの 4 隅の点およびマーカ内部の格子点を特徴点として抽出する。次に基準マーカの座標系を世界座標系とし、基準マーカを写したカメラの世界座標系における位置・姿勢を推定する。さらに位置・姿勢が推定されたカメラに写るマーカの世界座標系における位置・姿勢を推定し、そのマーカを写したカメラの位置・姿勢を推定する。この処理を繰り返すことにより、全てのマーカの世界座標系における位置・姿勢を推定する。その際、誤差の蓄積の軽減のため、マーカ設計情報を利用してマーカの位置・姿勢を補正する。最後に、全ての入力画像を通して再投影誤差が最小になるようにマーカとカメラの位置・姿勢を最適化し、得られたマーカの 3 次元位置・姿勢をマーカの配置情報として出力する。以下にカメラ位置・姿勢推定とマーカ位置・姿勢推定の処理について詳述する。

カメラ位置・姿勢推定： マーカ撮影画像 f から検出したマーカの特徴点 p の再投影誤差の和を表す誤差関数 (式 (2)) を最小化することにより、カメラの外部パラメータ行列 M_f 、すなわち世界座標系におけるカメラの位置・姿勢を推定する。

$$R_{fp} = \sum |\tilde{x}_{fp} - x_{fp}|^2 \quad (1)$$

$$E_f = \sum_p R_{fp} \quad (2)$$

ここで、 \tilde{x}_{fp} はマーカ撮影画像 f 上で検出された特徴点 p の 2 次元座標、 x_{fp} は特徴点 p の 3 次元座標を Tsai の手法 [17] を用いてレンズ歪みを考慮して画像 f 上に投影した座標を表す。また、画像 f の外部パラメータ M_f の自由度は 6 とし、カメラ座標系の基底ベクトルは単位直交条件を満たすものとする。本システムでは出口らの手法 [18] を利用し、最小自乗法によって外部パラメータの初期値を線型演算によって推定した後に、非線型最適化を行うことにより M_f を得る。このとき全てのマーカが同一平面上にある場合はその拘束条件を利用して外部パラメータを計算する。

マーカ位置・姿勢推定： マーカの大きさや格子点の間隔などは入力したマーカ設計情報から与えられているため、マーカ座標系での特徴点 p の座標は既知である。よって、特徴点 p のマーカ座標系での 3 次元位置と入力画像 f 上での 2 次元位置を用いて、前述のカメラ位置・姿勢推定処理と同様の処理により、マーカ座標系からカメラ座標系への変換行列 M_{MC} を算出する。これを画像 f の外部パラメータ M_f を用いて以下の式により変換することで、マーカの世界座標系における位置・姿勢を表す外部パラメータ行列 M_M を



図 6 天井に設置した不可視マーカ (フラッシュ撮影)

Fig. 6 Invisible markers on the ceiling. (This photo was taken with a flash.)

求める。

$$M_M = M_{MC}^{-1} \cdot M_f \quad (3)$$

また、マーカ設計情報にはマーカ間隔やマーカの並びが記述されているため、位置・姿勢が推定されたマーカに隣接するマーカの位置・姿勢も推定可能である。ただし、不可視マーカ壁紙が切断されて貼られる場合があるため、上記のマーカ位置・姿勢推定処理で推定された位置・姿勢と隣接するマーカから設計情報に基づいて計算された位置・姿勢の差がある閾値以下であれば、マーカ設計情報を元にした位置・姿勢の方が正しいとしてこれを利用する。このようにマーカ設計情報を利用することにより誤差の蓄積の軽減を図る。

2.3 環境構築についての評価実験

環境構築の手間や、キャリブレーションツールの精度を評価するため、実際の環境において不可視マーカによる位置・姿勢推定のための環境を構築した。

今回試作した不可視マーカ壁紙では、16cm 四方のマーカを約 24個/ m^2 の密度で配置し、そのパターンに格子行数 $N = 5$ 、CRC チェックビット数 $C = 3$ で各マーカが固有の ID を持つパターンを割り当てた。よって割り当てられる ID の数は $2^{18} = 262144$ 通りで、約 $10000m^2$ の範囲に固有の ID を持ったマーカを配置することが可能である。このパターンはオフィスのような 3m 程度の高さの天井にマーカを貼った場合に、人間の頭部に装着したカメラで多くのマーカが撮影でき、かつ ID の認識ができるように設計した。また CRC のチェックビット数はマーカの誤認識率と ID の数を考慮して決定した。

本実験では 310×4 個のマーカが印刷された壁紙を切断し、図 6 のように約 $65m^2$ の本学廊下の天井に設置し、提案するキャリブレーションツールを用いてマーカの 3 次元位置・姿勢を推定した。マーカの設置に関する作業には、5 人でおおよそ 20 時間程度必要

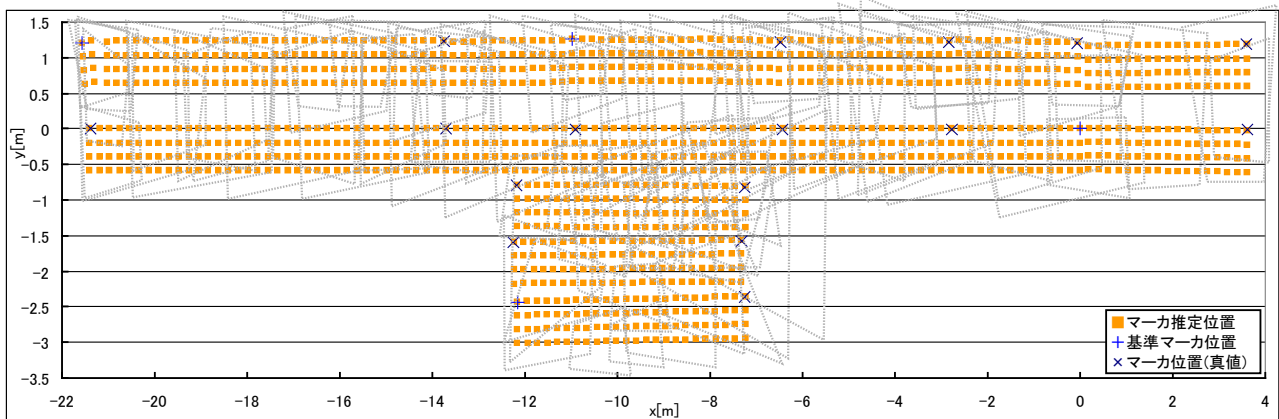


図7 マーカのキャリブレーション結果 (基準マーカが1つの場合)
Fig. 7 Result of marker calibration (1 reference marker is used).

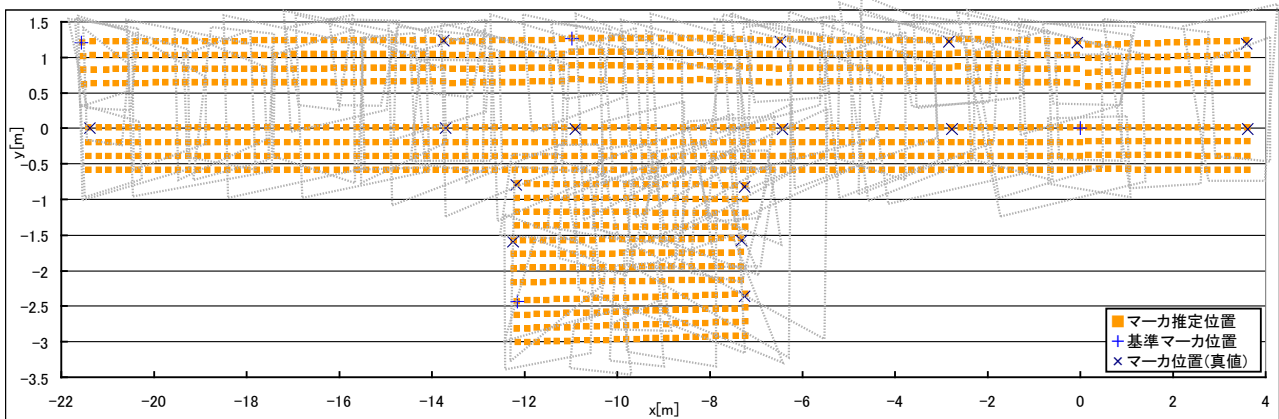


図8 マーカのキャリブレーション結果 (基準マーカが4つの場合)
Fig. 8 Result of marker calibration (4 reference markers are used).

とした。その内訳はマーカのパターンを加工する作業に13時間、壁紙を天井に設置する作業に7時間程度であった。経験上、同じ数のマーカを一つ一つ人手で設置する場合と比較すると全体の作業時間は軽減されたが、マーカのパターン加工の作業時間が依然として多いため、今後この作業を自動化する必要がある。

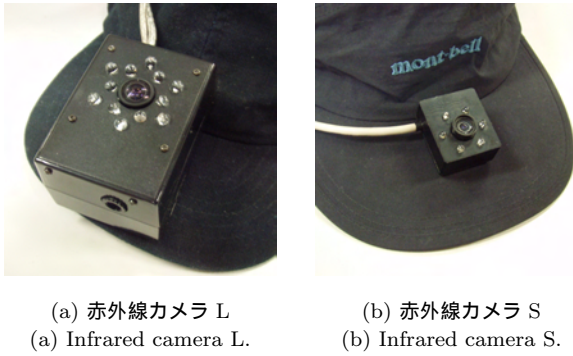
本実験では全てのマーカが同一平面状にあるという拘束条件を用いて、基準マーカを1つだけ与えた場合と4つ与えた場合のキャリブレーション実験を行った。図7,8にそれぞれで推定されたマーカの位置を示す。この図において+が基準マーカ、 \square がマーカの推定位置、 \times がその真値を表す。また点線で囲まれた四角形は各入力画像の撮影範囲を表す。キャリブレーションツールに入力した画像は100枚(3072×2304画素)で、使用したカメラは μ 770SW(Olympus製)、カメラの内部パラメータはTsaiの手法[17]を用いて推定した。基準マーカおよびマーカの真値はトータルステーション(トプコン製GPT-9005A, 測距精度:±5mm)を用いて約5m間隔で20点計測した。このときの誤差は、基準マーカが1つの場合平均約13mm、標準偏差12mm、

基準マーカが4つの場合は平均11mm、標準偏差7mm程度であった。

3 ユーザ位置・姿勢推定

提案システムでは、前述したキャリブレーションツールで作成したマーカ配置情報と赤外線カメラの内部パラメータを利用し、天井などに貼った不可視マーカ壁紙をユーザが装着した赤外線LED付き赤外線カメラで撮影・認識することによりユーザの位置・姿勢を推定する。推定した位置・姿勢は計算機の共有メモリ内に書き込まれ、拡張現実感システムなどの他のアプリケーションから参照される。また、指定したネットワーク上の計算機にUDP(User Datagram Protocol)を用いて位置・姿勢推定結果を送信することも可能となっている。

以下では提案システムのために作成した赤外線カメラ、カメラ位置・姿勢推定処理の詳細、および推定精度の評価実験について述べる。



(a) 赤外線カメラ L (a) Infrared camera L. (b) 赤外線カメラ S (b) Infrared camera S.

図 9 赤外線 LED 付き赤外線カメラ
Fig. 9 Infrared camera with infrared LEDs.

表 1 赤外線カメラの仕様
Table 1 Specification of infrared camera.

	赤外線 カメラ L	赤外線 カメラ S
外形寸法 [mm]	75 × 55 × 47	25 × 20 × 10
本体重量 [g]	115	20
解像度 [画素]	1024 × 768	640 × 480
水平画角 [度]	110	70
LED 数	12	6
インタフェース	USB2.0 (×2)	USB2.0
画像更新 速度 [fps]	29.12	30

3.1 赤外線 LED 付き赤外線カメラ

提案システムのために用途に応じて特性の異なる 2 種類の赤外線カメラを作成した。それらの外観を図 9 に、仕様を表 1 に示す。従来我々が提案した手法 [14] で用いられている赤外線カメラと同様に、これらの赤外線カメラのレンズ周辺には赤外線 LED が取り付けられており、再帰性反射材からなる不可視マーカを高輝度で撮影することが可能である。本カメラは取り扱いを容易にするため、両者のカメラともインタフェースに USB 2.0 を採用している。

また 2 種類のカメラの内、一方の赤外線カメラは精度良く位置・姿勢を推定するために、画角が広く解像度の高いカメラ（以降、赤外線カメラ L）となっている。この赤外線カメラ L にはビデオスルー型拡張現実感システムなどで利用するための前方撮影用カメラも内蔵している。ユーザにとっては装着する機器はできるだけ小型・軽量である方が望ましい。そこでもう一方のカメラ（以降、赤外線カメラ S）は、解像度や赤外線 LED の明るさの代わりに、小型・軽量化に特化した。

3.2 位置・姿勢推定処理概要

中里らの手法 [14] では赤外線 LED を点滅させその差分画像からマーカを認識していたが、位置・姿勢推定の更新速度がカメラの更新速度の半分になってしまうため、本システムでは赤外線 LED を点灯して撮影した画像のみからマーカの認識を行う。また、本シス

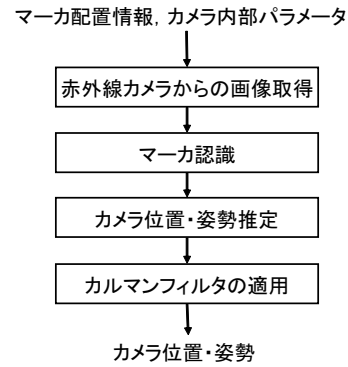


図 10 カメラ位置・姿勢推定処理の流れ
Fig. 10 Flow diagram of camera position estimation.

テムではマーカの誤検出を減らすためにマーカの ID に冗長度を持たせて符号化し、推定した位置・姿勢の安定化のためにカルマンフィルタ [19] を適用する。

図 10 にカメラ位置・姿勢推定処理の流れを示す。まずマーカ領域を抽出するために、赤外線カメラで撮影した画像を 2 値化し、形状が四角形である領域を探索する。次に抽出したマーカ領域内のパターンを構成する格子点をビットコードに変換し、CRC による誤り検出を行い、マーカの ID を認識する。ID に誤りの無かったマーカの 4 隅の点およびマーカ内部の格子点の画像上での座標を利用し、マーカのキャリブレーションの際の処理と同様に、認識した全マーカの特徴点の再投影誤差を最小化することにより、カメラの位置・姿勢を推定する。1 つのマーカは平面上にあると仮定しているため、1 つ以上のマーカが認識されれば、位置・姿勢が推定可能である。

ユーザの位置・姿勢を AR で利用するためには、その値が滑らかに変化することが望ましい。そこで推定したカメラ位置・姿勢にカルマンフィルタ [19] の一種である SRCDKF (Square Root Central Difference Kalman filter) [20] を適用する。SRCDKF は非線型カルマンフィルタであり、パラメータが少なく安定しているという特徴を持つ。

3.3 ユーザ位置・姿勢推定の評価実験

赤外線カメラの位置・姿勢推定精度の評価実験と、実際の環境に設置した不可視マーカ壁紙の下でのユーザの位置・姿勢の推定実験を行い、提案システムを検証した。

3.3.1 カメラ位置・姿勢推定精度の評価

本実験では、提案システムで利用する 2 種類の赤外線カメラによる位置・姿勢推定精度を評価する。カメラ位置・姿勢の真値を得るために、図 11 に示すようにロボットアームの先端に赤外線カメラを取り付け、ロボットアームの正面にマーカが印刷された壁紙を設置した。赤外線カメラの内部パラメータは Tsai の手

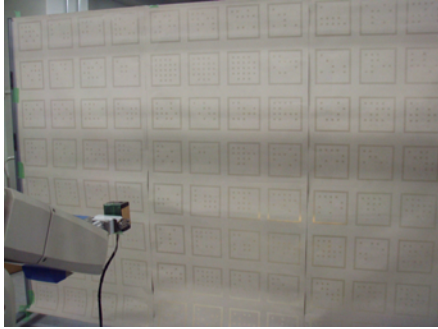


図 11 不可視マーカとロボットアームにとりつけられた赤外線カメラ

Fig. 11 Invisible markers and an infrared camera which is attached to robot arm.

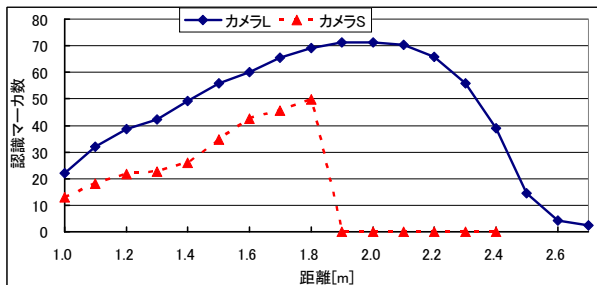


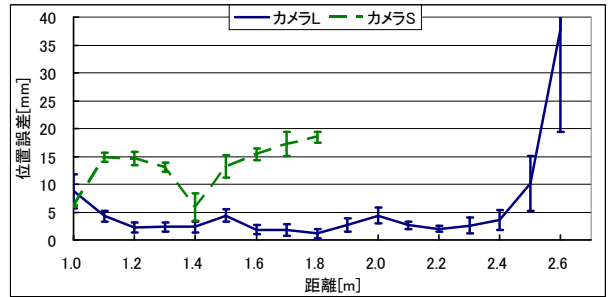
図 12 カメラとマーカ面との距離を変化させたときの認識マーカ数

Fig. 12 Number of recognized markers with respect to distance between a camera and markers.

法 [17] を用いて推定し、赤外線カメラおよびマーカの位置関係はトータルステーション (トプコン製 GPT-9005A, 測距精度:±5mm) を用いて計測した。マーカには 2.3 節での実験にて使用した不可視マーカ壁紙と同じものを利用し、約 $1.7m \times 2.4m$ の範囲に縦 7, 横 12 個の格子状に $16cm$ 四方のマーカを配置した。提案システムの利用シーンを考えると、ユーザの装着した赤外線カメラと天井に設置したマーカは正対することが多い。そこで、本実験ではカメラとマーカ面までの距離と精度の関係の評価するため、カメラとマーカ面を正対させてその間の距離を $10cm$ ごとに変化させ、各条件でカメラ L に関しては 10 回、カメラ S は 3 回の試行を行った。なお本実験では時系列に依存しないカメラの推定位置・姿勢精度を評価するため、カルマンフィルタは適用していない。

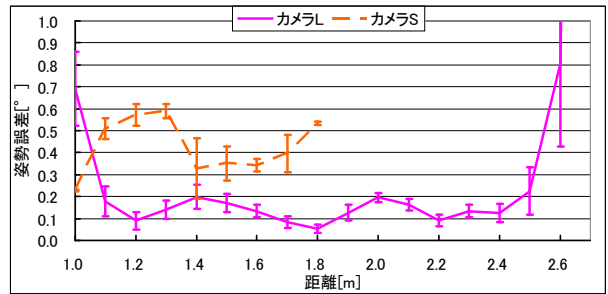
図 12 にその際に認識したマーカの平均個数の変化の様子を示す。また、図 13 に赤外線カメラ L,S についてカメラとマーカ面との距離を変化させたときの位置・姿勢の誤差の平均と各試行における分散の変化の様子を示す。

図 12 を見て分かる通り、カメラとマーカ面が近い場合はカメラの画角内に入るマーカが少ないため、認識



(a) 位置誤差

(a) Errors in estimated position.



(b) 姿勢誤差

(b) Errors in estimated orientation.

図 13 カメラとマーカ面との距離を変化させたときの位置・姿勢の誤差

Fig. 13 Errors in estimated position and orientation with respect to distance between a camera and markers.

マーカ数が少ない。逆にカメラとマーカ面が離れるとマーカパターンが認識できなくなり、かつマーカからの反射光が弱まるために、認識マーカ数が少なくなっている。特に赤外線カメラ S は小型化し、赤外線 LED の数が少ないため輝度が低くなり、カメラからマーカ面までの距離が $1.8m$ を超えるとマーカが認識できなかった。

また図 13 より、赤外線カメラ L は、マーカが 30 個以上認識できている $1.1m$ から $2.4m$ の間で位置に関しては約 $5mm$ 、姿勢に関しては約 0.2° でカメラ位置・姿勢が推定できていることが確認できる。その際の標準偏差もそれぞれ約 $2mm$ 、 0.05° と安定して推定できている。赤外線カメラ S は解像度が 640×480 、画角が 70 度であり、カメラ S よりも解像度も画角も小さいために誤差が大きくなっており、位置、姿勢それぞれに関して約 $15mm$ (標準偏差 $2mm$)、 0.5° (標準偏差 0.1°) の誤差でカメラ位置・姿勢が推定されている。どちらのカメラもオフィスのような一般的な環境の天井にマーカを設置し、ユーザが頭部にカメラを装着した際に想定されるカメラとマーカ面までの距離内 ($1.2m \sim 1.5m$) で位置・姿勢が推定できている。

3.3.2 実環境でのユーザ位置・姿勢推定

実環境での位置・姿勢推定精度の評価: 環境構築フェーズで構築した環境の下でのカメラ位置・姿勢推定精度

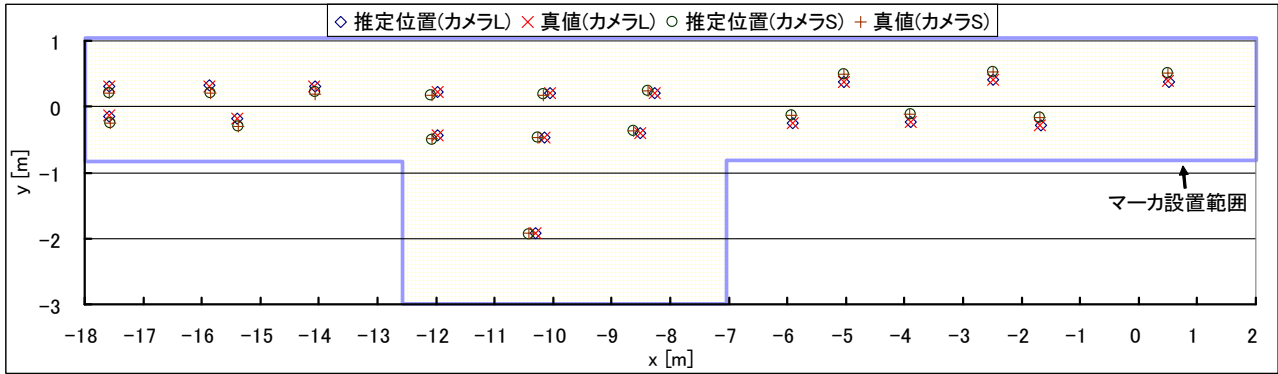


図 14 実環境での位置・姿勢推定結果 (基準マーカが 1 つの場合)
 Fig. 14 Estimated position of 2 infrared cameras (1 reference markers are used in marker calibration).

を評価するため実験を行った。本実験では 2.3 節で述べた実験において構築した環境下で、2 種類の赤外線カメラを静止させてカメラ位置・姿勢を推定し、その状態におけるカメラ位置・姿勢をトータルステーション (トプコン製 GPT-9005A, 測距精度:±5mm) を用いて計測した。マーカの配置情報として、2.3 節で示した基準マーカが 1 つの場合と 4 つの場合のキャリブレーション結果を利用し、赤外線カメラ L と S は台の上にほぼ鉛直上向きで固定した。台と各カメラ間の位置・姿勢の関係は手で計測し、トータルステーションを用いて台の位置・姿勢を計測した結果から各カメラの位置・姿勢の真値を算出した。また、このときのカメラと天井との間の距離は約 1.2m であった。

図 14 に基準マーカが 1 つの場合のキャリブレーション結果を用いて推定されたカメラ位置とその真値を 2 次元上に投影した結果を示す。この図は環境を真上から見下ろした様子に相当する。また、基準マーカが 4 つの場合もほぼ同様の結果が得られた。カメラ位置・姿勢の計測は図 14 に示すように環境内の 18 箇所で行っており、このときのカメラ位置・姿勢推定の誤差を表 2 に示す。誤差が平均約 13mm (標準偏差 12mm) であった基準マーカが 1 つの場合のキャリブレーション結果を利用した場合よりも、誤差が平均 11mm (標準偏差 7mm) であった基準マーカが 4 つの場合の方が精度良くカメラ位置・姿勢が推定できている。

一般に位置・姿勢推定に用いる特徴点の計測誤差が等方性を持つのであれば、特徴点の数が多く、かつ特徴点とカメラ間の距離に近いほど、推定されるカメラ位置・姿勢の精度は高くなる [21]。しかしながら本システムのキャリブレーションツールで得られるマーカ位置は、蓄積誤差の影響により偏りを持ちやすく、キャリブレーションの誤差がユーザ位置・姿勢推定の精度に与える影響は大きいと考えられる。そのため広い範囲でキャリブレーションを行う場合は基準マーカを複数与える必要がある。

表 2 実環境でのカメラ位置・姿勢推定精度
 Table 2 Errors in estimated position and orientation under the invisible marker wallpapers.

基準マーカ数	カメラ L		カメラ S	
	1	4	1	4
位置平均誤差 [mm]	9	9	13	11
位置標準偏差 [mm]	4	4	6	5
姿勢平均誤差 [°]	0.41	0.35	0.52	0.41
姿勢標準偏差 [°]	0.13	0.14	0.31	0.24

カメラ位置・姿勢推定の誤差が影響を与える、拡張現実感で提示する画像上での仮想物体の誤差 (e_x, e_y) は次式で表すことができる。

$$(X', Y', Z', 1)^T = M_u M (X, Y, Z, 1)^T \quad (4)$$

$$(X'_n, Y'_n, Z'_n, 1)^T = M_u M_n (X, Y, Z, 1)^T \quad (5)$$

$$e_x = \frac{scr_x}{2 \tan(\theta_x/2)} \left(\frac{X'_n}{Z'_n} - \frac{X'}{Z'} \right) \quad (6)$$

$$e_y = \frac{scr_y}{2 \tan(\theta_y/2)} \left(\frac{Y'_n}{Z'_n} - \frac{Y'}{Z'} \right) \quad (7)$$

ここで仮想物体の世界座標系における 3 次元座標を $(X, Y, Z)^T$, カメラ推定位置に誤差が無い場合とある場合の表示装置座標系における 3 次元座標を $(X', Y', Z')^T$, $(X'_n, Y'_n, Z'_n)^T$ とする。また、行列 M, M_n は推定されたカメラ位置・姿勢に誤差が無い場合とある場合の赤外線カメラの外部パラメータ, M_u は赤外線カメラの座標系から表示装置座標系への変換行列, scr_x, scr_y は表示装置の解像度, θ_x, θ_y は表示装置の水平・垂直画角をそれぞれ表す。よって、解像度 800×600, 水平画角 60°, 垂直画角 45° の表示装置を用いて、5m 先の仮想物体を描画すると、赤外線カメラ L によって位置誤差 9mm, 姿勢誤差 0.4° の誤差で位置・姿勢が推定できた場合、合成画像上で最大で 4 画素程度の誤差が生じる可能性がある。同様にカメラ S を想定し、位置誤差 13mm, 姿勢誤差 0.5° の誤差で位置・姿勢が

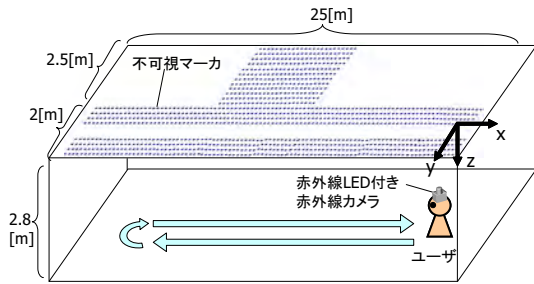


図 15 ユーザ位置・姿勢推定実験の環境
Fig. 15 Environment of user localization experiment.

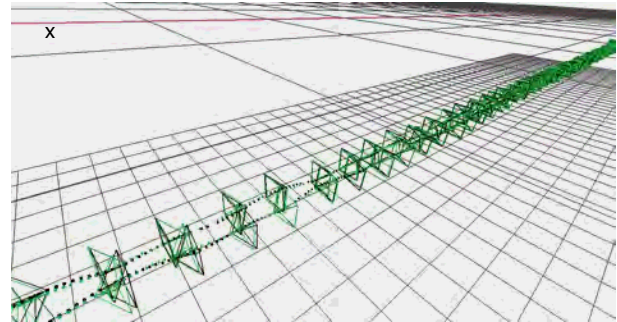


図 16 ユーザ位置・姿勢推定結果
Fig. 16 Estimated position and orientation of user.

推定できた場合は、合成画像上で 5 画素程度の誤差が生じる可能性がある。

実環境でのユーザ位置・姿勢推定の検証： 実際のウェアラブルコンピュータユーザの位置・姿勢推定結果を確認するため、2.3 節で構築した環境下で、ウェアラブル拡張現実感システムを構築して実験を行った。本実験では、ウェアラブル拡張現実感の注釈合成画像を生成するため、ユーザはユーザ視点画像撮影用カメラを内蔵する赤外線カメラ L を頭部に装着し、図 15 に示す環境中の座標系の x 方向へ歩いて往復した。このときのカルマンフィルタのパラメータは経験的に決定した。また、計算機には ThinkPad X60 (lenovo 製, CPU: Intel Core2Duo T7200 2GHz, メモリ: 2GB) を使用した。このときのユーザの位置・姿勢推定結果を図 16 に示す。この図において、座標系の原点はマーカを貼った天井面にあり、黒色の四角錐および円がカルマンフィルタ適用前のカメラ位置・姿勢、もう一方の色の四角錐と円がカルマンフィルタ適用後のカメラ位置・姿勢を表す。これらの結果より、推定した位置・姿勢に大きな外れ値がなく、提案システムによって安定してユーザの位置・姿勢が推定できていることが確認できる。

提案するユーザ位置・姿勢推定システムは、赤外線 LED でマーカを照らしながら撮影するため、シャッター速度を高速にすることができる。実験では 1/250 秒のシャッター速度で撮影したため、ユーザ視点画像にモーションブラーが発生するような動きに対しても、ユーザの位置・姿勢が推定でき、正しい位置に注釈が提示されていることが生成した注釈合成画像から確認できた。ただし、カルマンフィルタ適用前の位置・姿勢を用いて注釈提示画像を生成すると、2,3 画素程度のジッターが発生した。しかしながら、カルマンフィルタ適用後の位置・姿勢を用いた場合はジッターの発生が抑えられることが確認できた。

この実験において位置・姿勢推定の更新頻度は約 29fps (CPU 使用率: 約 15%) であり、実時間で位置・姿勢が計測できることが確認できた。

4 まとめ

本論文では、屋内におけるウェアラブル拡張現実感の実利用を目指し、ウェアラブルコンピュータユーザの位置・姿勢を推定するシステムを構築した。提案システムはインフラ環境の構築を容易に行えるように支援する環境構築フェーズと、実時間で精度良くユーザの位置・姿勢推定を行うフェーズから構成される。

ユーザ位置・姿勢推定システムの実利用を目指す場合、そのためのインフラを容易に構築でき、かつ景観を損ねずに精度良くユーザの位置・姿勢を計測できることが望まれる。そこで提案システムでは、ユーザ位置・姿勢推定のためのインフラに再帰性反射材からなる不可視マーカを密に印刷した壁紙を利用し、設置したマーカをデジタルカメラで撮影してキャリブレーションするツールを提供することで環境の構築の労力の軽減を図った。これにより景観を損ねることなく多数のマーカを密に設置することができ、ユーザが装着した赤外線 LED 付き赤外線カメラを用いて精度良くユーザの位置・姿勢を推定することが可能となる。

また、本研究では特性の異なる 2 種類の赤外線 LED 付き赤外線カメラを作成し、その評価を行った。実環境における実験において、解像度の高い赤外線カメラ L は位置 9mm, 姿勢 0.4°, 小型・軽量のカメラ S の場合は位置 13mm, 姿勢 0.5° 程度の平均誤差で安定してユーザの位置・姿勢が推定できることを確認した。

今後の課題としては、多くの作業時間を必要としているマーカのパターンの加工を自動化やパターンの誤りを検出するツールの作成、ユーザ位置・姿勢推定処理のハードウェア化などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の支援による。

参考文献

- [1] T. Höllerer, S. Feiner and J. Pavlik: "Situating documentaries: Embedding multimedia presentations in the real world," Proc. 3rd IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'99), pp. 79-86, 1999.
- [2] P. Dahne and J. N. Karigiannis: "ARCHEOGUIDE: System architecture of a mobile outdoor augmented reality system," Proc. 1st IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), pp. 263-264, 2002.
- [3] 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 (MIRU2005) 講演論文集, pp. 933-938, 2005.
- [4] P. Bahl and V. N. Padmanabhan: "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," Proc. 19th Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000), pp. 775-784, 2000.
- [5] M. Kourogi and T. Kurata: "Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and wearable camera," Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 03), pp. 103-112, 2003.
- [6] G. Welch, G. Bishop, L. Vicci, S. Brumback, K. Keller and D. Colucci: "High-performance wide-area optical tracking - the hiball tracking system," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 10, No. 1, pp. 1-21, 2001.
- [7] D. Hallaway, T. Höllerer and S. Feiner: "Coarse, inexpensive, infrared tracking for wearable computing," Proc. 7th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'03), pp. 69-78, 2003.
- [8] I. Skrypnik and D. G. Lowe: "Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 110-119, 2004.
- [9] L. Vacchetti, V. Lepetit and P. Fua: "Combining edge and texture information for real-time accurate 3D camera tracking," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 48-57, 2004.
- [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] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. D. Bondi, M. Morris and W. Piekarski: "AR-Quake: An outdoor/indoor augmented reality first person application," Proc. 4th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC2000), pp. 139-146, 2000.
- [12] M. Kalkusch, T. Lidy, M. Knapp, G. Reitmayr, H. Kaufmann and D. Schmalstieg: "Structured visual markers for indoor pathfinding," Proc. 1st IEEE Int. Augmented Reality Toolkit Workshop (ART'02), 2002.
- [13] H. Park and ong Il Park: "Invisible marker tracking for AR," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 272-273, 2004.
- [14] 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.
- [15] 齊藤滋, 谷川智洋, 廣瀬通孝: "コード化した模様を内装に施した室内における位置同定システム", 電子情報通信学会 技術研究報告, MVE2006-06, pp. 1-6, 2006.
- [16] 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, PRMU2006-195, pp. 7-12, 2007.
- [17] R. Y. Tsai: "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision," Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 364-374, 1986.
- [18] 出口光一郎: "射影幾何学による PnP カメラ補正問題の統一的解法", 情報処理学会「コンピュータビジョン'90 - ビジョンと環境理解 - シンポジウム」論文集, Vol. 90, pp. 41-50, 1990.
- [19] G. Welch and G. Bishop: "An introduction to the kalman filter," SIGGRAPH 2001 Course 8, 2001.
- [20] R. van der Merwe and E. A. Wan: "Sigma-point kalman filters for integrated navigation," Proc. the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation, pp. 641-654, 2004.
- [21] 佐藤智和: "複数の動画像を用いたカメラパラメータ推定に基づく屋外環境の三次元モデル化に関する研究", 奈良先端科学技術大学院大学 博士論文 NAIST-IS-DT0161018, 2003.

(2007年12月10日受付)

[著者紹介]

中里 祐介 (正会員)



2008年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。現在、キヤノン株式会社に勤務。複合現実感に関する研究に従事。博士(工学)。日本バーチャルリアリティ学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

神原 誠之 (正会員)



2002年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。同年同大情報科学研究科助手, 現在に至る。コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。博士(工学)。1999年電子情報通信学会学術奨励賞受賞, FIT2005論文賞受賞。日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

横矢 直和 (正会員)



1974年大阪大学基礎工学部情報工学科卒。1979年同大大学院博士後期課程修了。工博。同年電子技術総合研究所入所。以来, 画像処理ソフトウェア, 画像データベース, コンピュータビジョンの研究に従事。1986~87年マツギル大・知能機械研究センター客員教授。1992年奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授。現在, 同大情報科学研究科教授。1990年, 2007年情報処理学会論文賞受賞。2005年情報処理学会フェロー, 電子情報通信学会フェロー。情報処理学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, 映像情報メディア学会, IEEE, ACM SIGGRAPH 各会員。