

## 基礎論文

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・姿勢推定中里 祐介<sup>\*1</sup> 神原 誠之<sup>\*1</sup> 横矢 直和<sup>\*1</sup>Localization System Using Invisible Visual Markers and IR Camera  
for Wearable Augmented RealityYusuke Nakazato<sup>\*1</sup>, Masayuki Kanbara<sup>\*1</sup> and Naokazu Yokoya<sup>\*1</sup>

**Abstract** – To realize an augmented reality (AR) system using a wearable computer, the exact position and orientation of a user are required. We propose a localization method which is based on using an IR camera and invisible visual markers consisting of translucent retro-reflectors. In the method, to stably extract the regions of markers from the captured images, the camera captures the reflection of IR LEDs that are flashed on and off continuously. In experiments, we first describe the quantitative evaluation in computer simulation to decide the alignment of markers in real environments. We then carry out the localization experiments in real environments in which markers are installed based on the marker alignment decided by simulations. Finally, we develop a wearable augmented reality system using the proposed localization system.

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

## 1 はじめに

近年、計算機の小型化、高性能化に伴い、ウェアラブルコンピュータを装着したユーザのための様々なアプリケーションが研究されている [1, 2]. その中でも、ユーザのいる場所に応じた情報を直感的に提供可能なウェアラブル型拡張現実感 (Augmented Reality:AR) システムでは、現実世界と仮想世界の座標系の位置合わせを行う必要があるために、ユーザの正確な位置・姿勢計測が重要な課題となる。

従来、屋外においては、広範囲で位置を計測できる GPS とジャイロセンサの組み合わせが一般的であるが [3, 4], 屋内では GPS が利用できないため、さまざまな位置計測手法が提案されている [5, 6, 7]. 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取得する手法 [8, 9, 10] 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、実環境に位置・形状・色が既知の画像マーカを多数配置し、それらをユーザの頭部に取り付けたカメラで撮影した映像からユーザの位置・姿勢を推定する手法が提案されている [11, 12]. 一方、Naimark ら [13] は、円形のマーカと加速度センサを融合することで、安定した位置推

定が可能なシステムを開発した。このように画像マーカを通常のカメラで撮影する手法は、安価でかつインフラに電源を必要としないという利点があるが、実環境の景観を損ねるため、実際の環境におけるウェアラブル型拡張現実感システムに利用することが難しいという問題がある。

そこで本論文では、屋内環境を対象として、半透明の再帰性反射材からなる不可視の画像マーカに赤外光を照射し、その反射を赤外線カメラで撮影・認識することで、ユーザの位置・姿勢を推定する方法を提案する。その際、赤外光を連続的に点滅させ、それと同期してマーカを撮影することでマーカからの反射光以外の赤外光の影響を軽減する。これにより安価で、かつ景観を損なうことなくユーザの位置・姿勢を推定できるため、実際の屋内環境の広範囲においてウェアラブル型拡張現実感システムの実現が可能となる。

また、そのような実環境において拡張現実感システムを運用する場合、推定されるユーザの位置・姿勢の精度は重要である。従来、正方形マーカ 1 つに対する位置・姿勢の推定精度に関する研究は行われている [14, 15]. しかし、カメラを身につけたユーザが天井に設置した多数のマーカを映し続けるような場合に、どのようにマーカを配置すれば精度良く位置・姿勢が推定できるかはあまり検討されていない。多数のマーカを設置する場合、設置の手間が問題となるが、その解決のために、羽原ら [16] は、ごく一部のマーカの位

\*1 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

\*1 Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

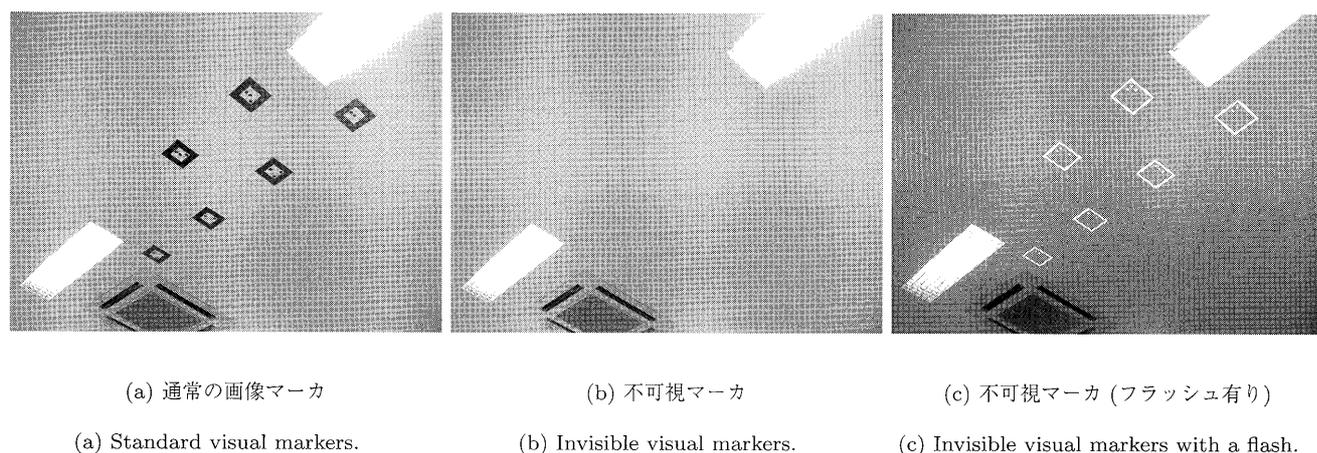


図1 インフラに設置される画像マーカ  
Fig.1 Markers as positioning infrastructures.

置・姿勢を計測し、その他のマーカの位置・姿勢を周囲のマーカから相対的に求める手法を提案している。また、アプリケーションで必要なユーザの位置・姿勢の精度に応じて、場所によってマーカの配置密度を変更することも考えられる。そこで、本研究ではより精度良く位置・姿勢を推定するために、マーカを密に配置した際のマーカの配置パターンについて、シミュレーション実験を通して検討する。

以下2章では、本研究で利用した不可視マーカとそれらを用いた位置・姿勢の推定手法について詳述する。3章では環境中に配置するマーカの密度と精度の関係を検証するために行ったシミュレーション実験、実環境における実験、および提案する位置・姿勢推定手法を利用したウェアラブル型拡張現実感システムについて述べる。最後に本研究のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 不可視マーカを用いた位置・姿勢推定

### 2.1 不可視マーカ

本研究で用いる不可視マーカは半透明の再帰性反射材からなり、屋内環境において天井や壁などに設置することを想定する。再帰性反射材には光源方向に強く光を反射する特性がある。通常の画像マーカを天井に設置した場合、図1(a)のように画像マーカによって景観が損なわれてしまう。しかし半透明の再帰性反射材を画像マーカに用いると、図1(b)が示すように肉眼での視認は困難であり、景観を損ねない。このマーカにフラッシュを当てて撮影すれば、再帰性反射材の特性により、図1(c)のようにマーカを鮮明に捕らえることができる。そこで、不可視の赤外光をマーカに照射し、その反射光を赤外線カメラで撮影することにより、景観を損ねることなくマーカを撮影することが可

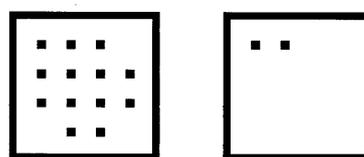


図2 画像マーカのデザイン例 ( $N = 4$ )  
(黒い部分が再帰性反射材)

Fig.2 Instances of markers ( $N = 4$ ) (the black part illustrates a retro-reflector).

能となる。

### 2.2 マーカのパターン

本研究で利用した不可視マーカの例を図2に示す。同図において黒色の部分が再帰性反射材に対応する。マーカにはARToolKit[17]などでよく使われている正方形を用い、正方形の枠の内部に $N \times N$ の格子状に点を配置し、マーカパターンとして利用する。これらの点を1ビットとしてビットコードを割り当てる。ただし内部パターンは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つだけに常に点を配置し、残り3つには点を配置しない。したがって、マーカパターンには $2^{N^2-4}$ 通りのIDを割り当てられる。図2の例のように $N = 4$ の場合は $2^{12}(= 4096)$ 通りのIDが割り当て可能である。

### 2.3 位置・姿勢推定手法

位置・姿勢計測システムの概要を図3に、処理の流れを図4に示す。まず環境中の天井などに不可視マーカを配置する。ユーザは赤外線カメラを上向きに装着し、カメラの周囲に取りつけた赤外線LEDの反射光を撮影する。再帰性反射材は先に述べたように、照射された光を光源方向に反射するという性質を持つため、カメラ付近から発した赤外光を受けた再帰性反射材は高輝度で撮影することが可能である。しかし、撮影さ

中里・神原・横矢：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

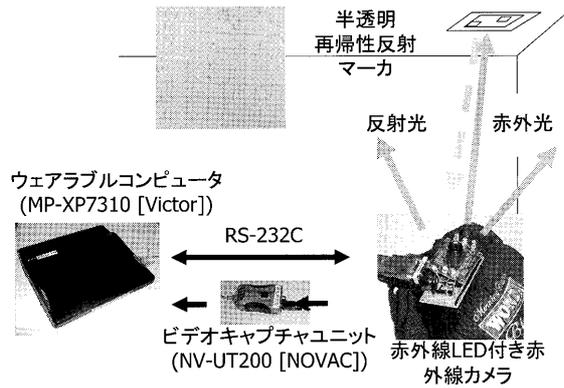


図3 システムの概要  
Fig. 3 Overview of localization system.

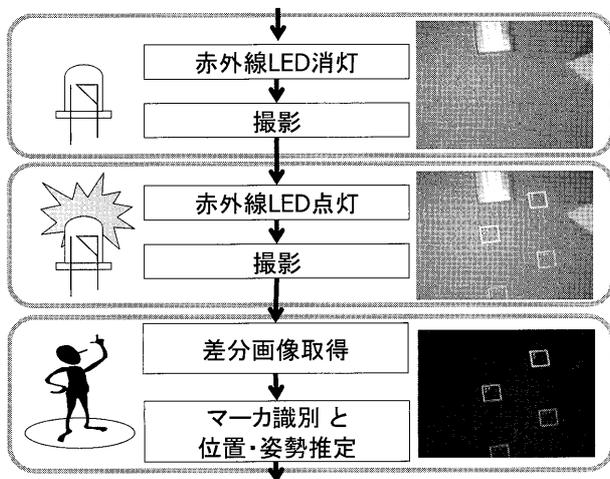


図4 処理の流れ  
Fig. 4 Flow diagram of capturing markers.

れる画像にはマーカだけではなく環境中にある蛍光灯や太陽光の照り返しなども含まれる。そこで、図4に示すようにに計算機により赤外線LEDを制御することで連続的に点滅させ、それと同期してマーカを撮影する。マーカは赤外光を照射したときのみ撮影されるため、赤外光を照射する前後の画像の差分を求め、マーカ以外の赤外光の影響を除去する。さらに、検出されたマーカ候補から領域の大きさが一定の閾値内で、かつ形状が四角形であるものを選択し、マーカに割り当てたIDパターンを認識することにより、マーカ(すなわち、マーカ配置位置)を同定する。また、大きさが既知のマーカの正方形の4隅の点の座標を利用し、認識した全マーカの頂点の投影誤差を最小化することによりマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列を推定し、マーカに対するカメラの相対的な位置・姿勢を求める[17]。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。

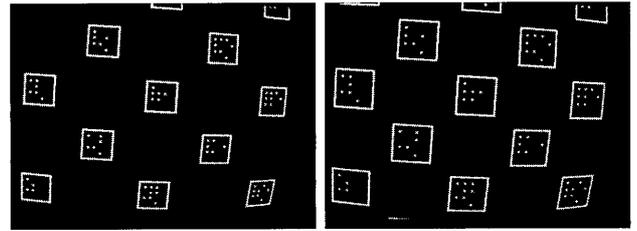


図5 シミュレーション画像例  
Fig. 5 Examples of images used in simulation.

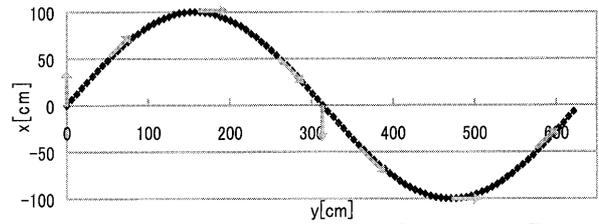


図6 シミュレーションにおけるカメラの移動経路 ( $z=120[\text{cm}]$ )  
Fig. 6 Camera path in simulation ( $z=120[\text{cm}]$ ).

### 3 実験

天井に配置するマーカの最適な大きさとその配置密度を検討するために、シミュレーション実験を行い、シミュレーションの結果を考慮してマーカを配置した実環境において位置・姿勢の推定実験を行った。また、ウェアラブル拡張現実感システムに提案手法を適用し、注釈提示実験を行った。

#### 3.1 シミュレーション実験

##### 3.1.1 シミュレーション実験環境

シミュレーション実験では、天井に配置したマーカのみが撮影された理想的な画像を生成し、カメラの位置・姿勢推定を行った。マーカの抽出、および複数マーカからのカメラの位置・姿勢の推定にはARToolKit[17]を利用した。また、生成した画像には本研究で使用している赤外線LED付き赤外線カメラ(画角 $92.6^\circ$ )の内部パラメータを用いてレンズ歪みを加えた。図5にシミュレーションで使用した画像の例を示す。

本実験では一般的なビル等の屋内環境においてユーザがカメラを頭部に装着することを想定し、マーカを配置した天井とカメラ間の距離を120cmとし、隣り合うマーカ間の距離が同じになるように配置した。本実験におけるマーカは、外枠の幅1cm、格子行数 $N=4$ とし、マーカパターンのビットコードに1ビットのパリティビットを付加した。マーカの一辺の長さを16cmから40cmまで4cmずつ変化させた場合、お

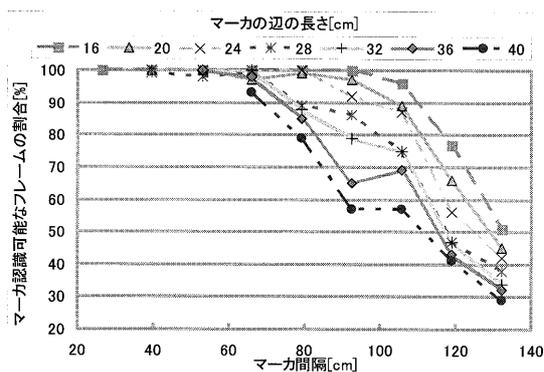


図7 マーカの配置に対するマーカ認識可能フレームの割合  
Fig.7 Ratio of marker-recognized frames with respect to marker arrangements.

よび、マーカ間隔を25cmから135cmまで9段階変化させた場合についてシミュレーションを行った。なお、内部パターンとして配置する点(正方形)の大きさは16cmのマーカでは1cm四方、40cmのマーカでは3cm四方というように相対的に変化させた。カメラは鉛直上向きに天井と正対して、図6で示すようなsinカーブを描く経路を100フレームで移動するものとした。同図において、マーカを設置する天井面が $x$ - $y$ 平面、鉛直下向きが $z$ 方向を表す。また、矢印は $z$ 軸に対するカメラの回転角度( $yaw$ )を表し、本システムを着用したユーザの視線方向に対応する。

### 3.1.2 実験結果とマーカ配置に関する考察

まずマーカの大きさとマーカ間の距離を変化させた際に、カメラの位置・姿勢を推定することができたフレームの割合を図7に示す。マーカ間隔を大きくすると、マーカが撮影画像内に出現しない場合が起こるため、位置・姿勢の推定ができないフレームが発生する。ユーザの位置・姿勢を推定し続けるためには、最低1つのマーカが常に撮影画像内に映り続けなければならない。マーカ認識可能なフレームの割合が98%以上であった際のマーカの辺の長ささとマーカ間隔に注目すると、両者の和が90cm以下であることが望ましいということが確認できた。使用したカメラの画角が $92.6^\circ$ 、天井とカメラ間の距離が120cmであることを考えると、カメラの撮影領域は約 $2.5 \times 1.9$ mとなる。この範囲内に完全なマーカが最低1つ撮影されるためには、マーカ辺の長ささとマーカ間隔の和が約95cm以内である必要があるため、この結果は妥当であると考えられる。ただし、マーカパターンを誤認識する場合もあるため、より安定してカメラの位置・姿勢を推定する必要がある場合には、画像内に多くのマーカが撮影されるように、多数のマーカを配置した方がよい。例えば、拡張現実感システムにおいてCGモデル等の

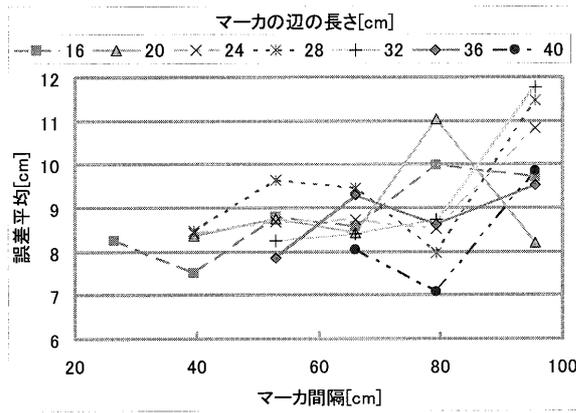
位置ずれがあまり許されない仮想物体を提示するような場合には、マーカを密に配置する方がよい。

次にマーカの大きさとマーカ間の距離に対するカメラの推定位置・姿勢を表す各パラメータ( $x, y, z, pitch, roll, yaw$ )の誤差の絶対値の平均を図8に示す。なお、マーカ間隔が100cm以上の場合については、認識されたマーカの数が少ないため省略する。ここで、 $pitch, roll, yaw$ はそれぞれ $x, y, z$ 軸に対するカメラの回転角度を表す。図8(f)より、 $yaw$ 角に関しては画像マーカの特長により誤差 $1^\circ$ 以内で姿勢計測が可能であることが分かった。また、マーカ間隔が狭くなると多数のマーカが同時に撮影できるために、 $yaw$ 角の誤差が小さくなることが確認できる。ユーザの頭部にカメラを装着することを想定すると、 $yaw$ 角は左右を見回す行為に相当するため、拡張現実感を行う上で好ましい性質であると考えられる。

図8(a)と(e)を比較すると、 $x$ 方向の位置推定誤差と $roll$ 角の推定誤差には相関関係があることが確認できる。同様に(b)と(d)を比較すると、 $y$ 方向の位置推定誤差と $pitch$ 角の推定誤差にも相関関係があることが確認できる。さらに図9を見るとその関係は明らかで、 $pitch$ 角と $y$ には正の相関が、 $roll$ 角と $x$ には負の相関があることが分かる。同図は $yaw$ 角が $0^\circ$ から $180^\circ$ に連続的に変化した後、再び $0^\circ$ に変化した際の、撮影角度( $yaw$ 角)に対する位置・姿勢の推定誤差である。これは、 $x$ 軸回りの回転角である $pitch$ 角の誤差が大きくなれば、 $x$ 軸と直交する $y$ 方向の誤差が大きくなるためである。 $roll$ 角と $x$ 方向の誤差についても同様である。加えて同図より、 $pitch$ 角、 $roll$ 角の誤差はマーカを撮影した角度( $yaw$ 角)に依存していることが分かる。よって、どの角度から撮影しても安定して位置を推定するためには、図5のように全てのマーカを同じ向きに配置するのではなく、各マーカを異なる向きで配置することが望ましいと考えられる。

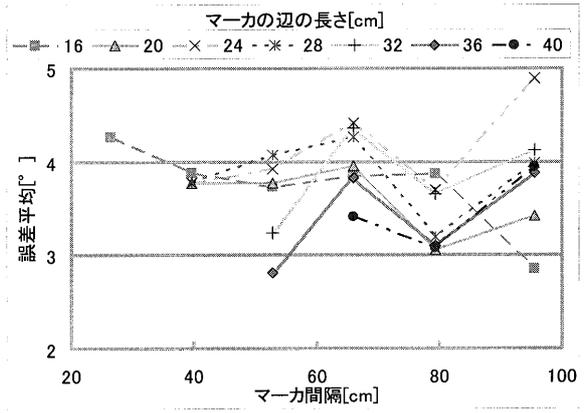
位置・姿勢の推定精度は画像上でのマーカの大きさに依存する。そのため、マーカとカメラの距離が変化した場合、画像上でのマーカが本シミュレーション実験と同様の大きさに映るようにマーカの大きさを決定する必要がある。本シミュレーションではマーカとカメラの距離は120cmであった。よって、想定する環境でのマーカとカメラの距離を $h$ cmとすると、およそ $h/120$ 倍の大きさのマーカを使用すればよい。また、ユーザの頭部の動きに応じてマーカとカメラの距離は動的に変化するため、画像上に映るマーカが小さすぎてマーカパターンが識別できない場合が発生する。したがって、異なる大きさのマーカを組み合わせ使用した方が安定して位置・姿勢を推定できると考えられる。

中里・神原・横矢：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



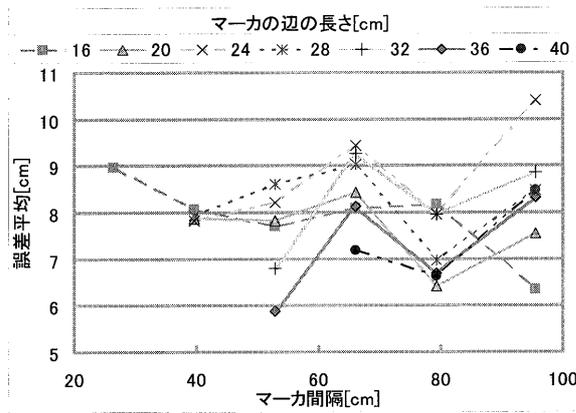
(a) 位置推定誤差 (x)

(a) Errors in estimated position(x)



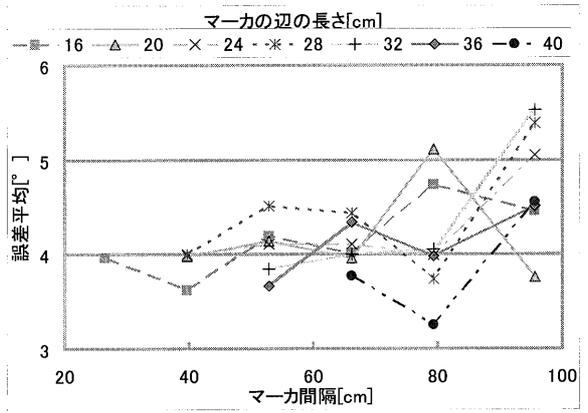
(d) 姿勢推定誤差 (pitch)

(d) Errors in estimated orientation(pitch)



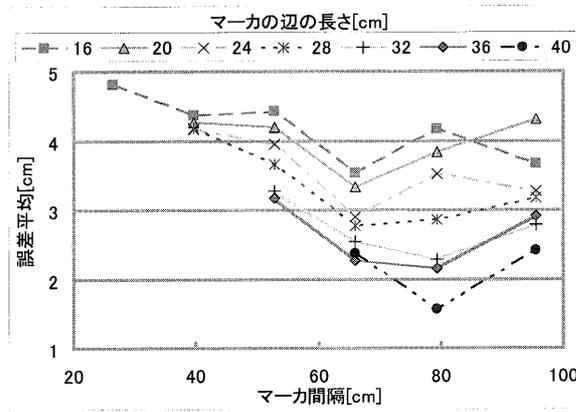
(b) 位置推定誤差 (y)

(b) Errors in estimated position(y)



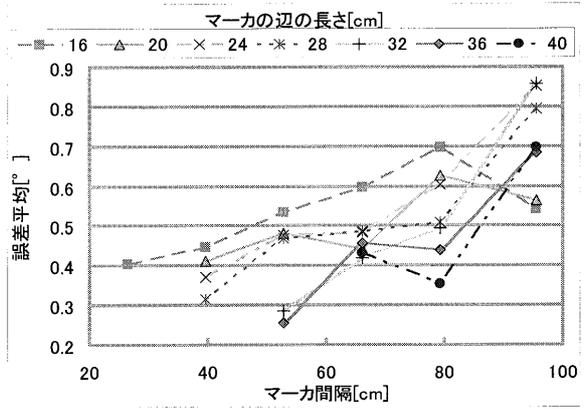
(e) 姿勢推定誤差 (roll)

(e) Errors in estimated orientation(roll)



(c) 位置推定誤差 (z)

(c) Errors in estimated position(z)



(f) 姿勢推定誤差 (yaw)

(f) Errors in estimated orientation(yaw)

図8 マーカの大きさやマーカ間の距離に対する位置・姿勢推定の絶対誤差  
 Fig.8 Absolute errors in estimated position and orientation with respect to marker size and interval in simulation.

### 3.2 マーカ配置の検証

前節ではマーカ配置に関して、図5のように全てのマーカを同じ向きに配置するのではなく、図10のように各マーカを異なる向きで配置し、また、異なる大きさのマーカを組み合わせ使用の方が望ましいと考察した。本節ではそのマーカの配置の妥当性を検証す

るために行ったシミュレーション実験について述べる。

本実験では図10のように、一辺の長さ16cm、内部パターンとして配置する点の大きさが1cm四方のマーカ、および一辺の長さ28cm、内部パターンの点の大きさが2cm四方のマーカ2種類を、角度を60°ずつ変えて天井に配置した。両者とも外枠の幅1cm、格子

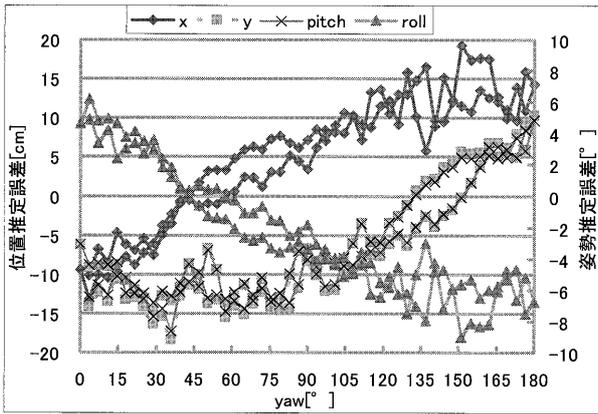


図9 撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差 (マーカー:16cm 四方, 間隔:25cm)

Fig.9 Errors in position and orientation with respect to captured angles (marker size: 16cm, marker interval: 25cm).

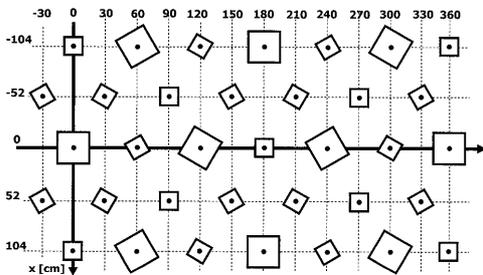


図10 シミュレーション結果に基づいたマーカーの配置図

Fig.10 Layout of markers based on results of simulations.

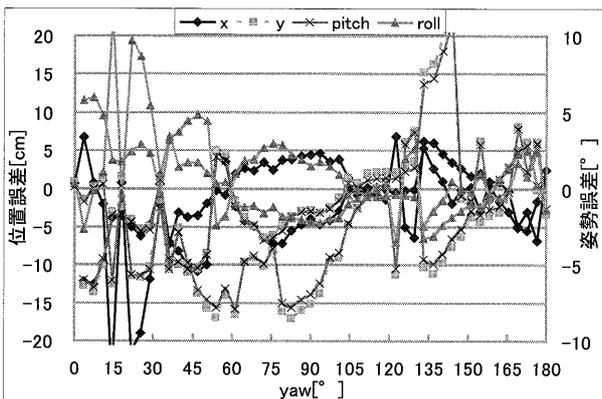


図11 撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差 (マーカー配置:図10)

Fig.11 Errors in position and orientation with respect to captured angles (marker arrangement: Figure. 10).

行数  $N = 4$  とし, マーカーパターンのビットコードに1ビットのパリティビットを付加した. このようなマーカー配置の下で, 前節の実験と同様に, 鉛直上向きのカ

表1 シミュレーションおよび実環境における実験でのカメラの位置・姿勢推定誤差の平均と標準偏差

Table 1 Average and standard deviation of position and orientation errors in simulation and real environments.

		x[cm]	y[cm]	z[cm]
シミュレーション実験	平均	7.9	2.6	3.9
	標準偏差	5.7	2.2	1.7
実環境における実験	平均	7.7	9.2	3.8
	標準偏差	5.0	6.7	2.9
		pitch[°]	roll[°]	yaw[°]
シミュレーション実験	平均	1.2	3.7	0.5
	標準偏差	1.1	2.5	0.4
実環境における実験	平均	4.9	3.9	3.0
	標準偏差	4.5	3.0	2.3

メラが図6で示すような sin カーブを描く経路を 100 フレームで移動するものとする. その際の撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差を図11に示す. この結果と, 図9が示すマーカーが全て同じ角度で配置されている場合の結果を比べると, 図10のように各マーカーを異なる向きで配置した場合に, マーカーの撮影角度による推定位置・姿勢の偏りが軽減されていること確認できる.

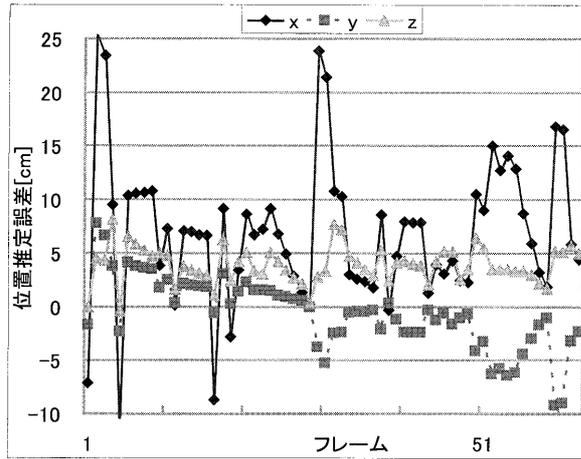
### 3.3 シミュレーション実験と実環境における実験の比較

次に, 実環境においてそのマーカー配置の妥当性を検証するため, シミュレーション環境と実環境において同じマーカー配置の下で実験を行った. 前節と同様のマーカー配置において, 鉛直上向きのカメラを開始点 (60, 20, 120) から終了点 (60, 280, 120) まで (単位 cm) 平行移動させた際の, シミュレーション実験, および実環境における実験でのカメラの位置・姿勢の推定誤差を図12(a)から図12(d)にそれぞれ示す. また両者の誤差の絶対値の平均と標準偏差を表1に示す. なお, 実環境における実験ではカメラを電動車椅子に固定して移動させ, その移動は等速直線運動であったと仮定し, 真値は約 1cm の精度で手動で計測した. このとき認識されたマーカーは各フレーム 4 個程度で, カメラの移動速度は約 2.3km/h であった.

この結果より, シミュレーションにおいても, 実環境においても, マーカーが正しく認識されれば位置に関しては平均 10cm, 最大 20cm 程度, 姿勢に関しては平均 5°, 最大 10° 程度の誤差でカメラ位置を推定できることが分かった.

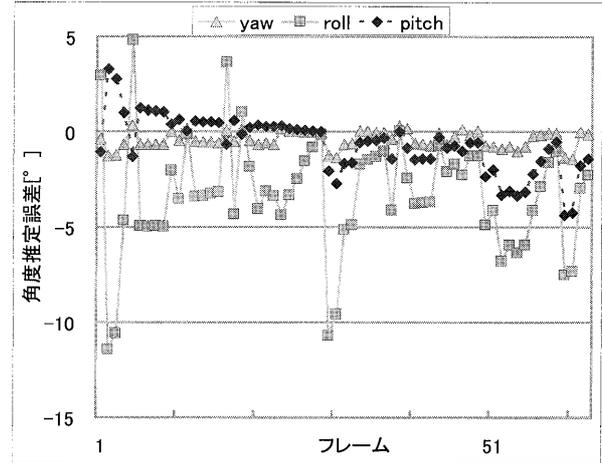
また, 図13に実環境において天井に設置したマーカーを撮影した際のマーカー認識の様子を示す. マーカーに赤外光を照射せずに撮影すると, 図13(a)のように撮影画像にはマーカーは映らない. しかし, 赤外光を照射す

中里・神原・横矢：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



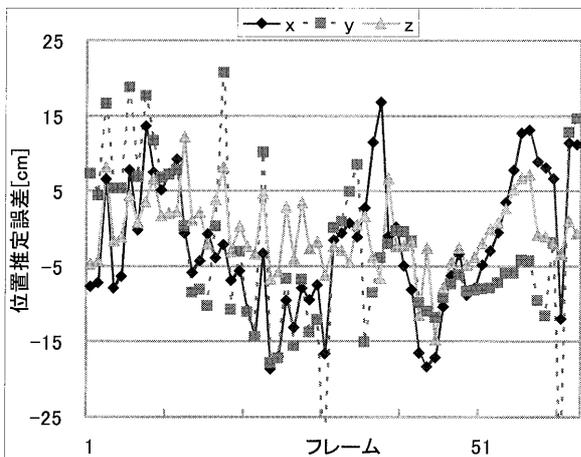
(a) シミュレーション実験でのカメラ位置の推定誤差

(a) Errors in position of camera in simulation environment.



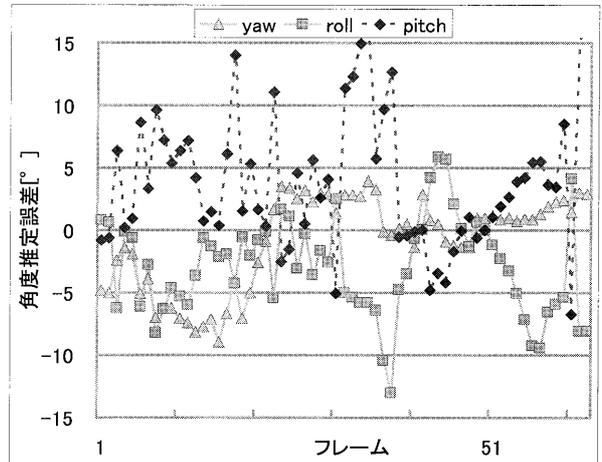
(b) シミュレーション実験でのカメラ姿勢の推定誤差

(b) Errors in orientation of camera in simulation environment.



(c) 実環境における実験でのカメラ位置の推定誤差

(c) Errors in position of camera in real environment.



(d) 実環境における実験でのカメラ姿勢の推定誤差

(d) Errors in position of camera in real environment.

図 12 シミュレーション, および実環境における実験でのカメラ位置・姿勢の推定誤差

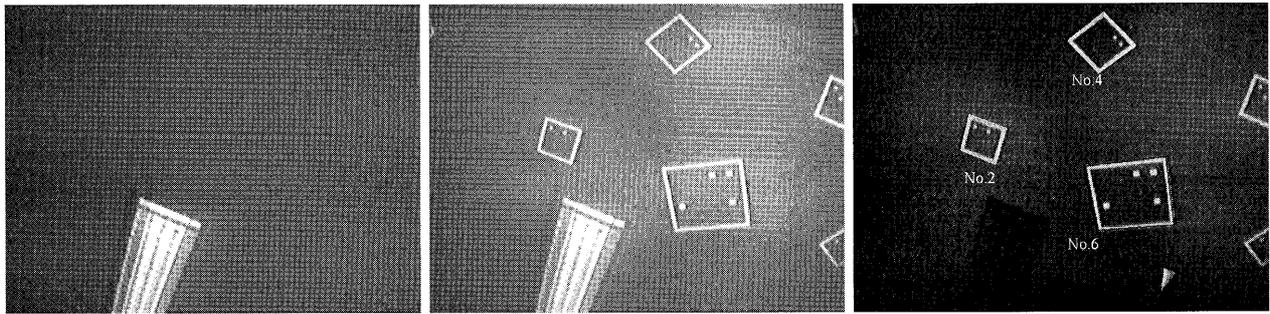
Fig. 12 Error of position and orientation of the camera in the simulation and real environments.

ると図 13(b) のようにマーカは高輝度で撮影することが可能となる。これらの画像の差分画像を利用し、図 13(c) で示すように提案手法によってマーカを認識し ID を取得することができた。また同時に画像上でのマーカの形状からカメラとマーカの相対的な位置姿勢関係を求めることができるため、本実験では図 13(c) のように常に頂点が一定方向を指す矢印を重ねて描画した。赤外光照射前後の 2 枚の画像を取得するため、マーカの認識処理速度は約 15fps であった。次に認識したマーカから推定したカメラの位置・姿勢推定結果を図 14 に示す。図 14 において、四角形が天井に設置したマーカ、四角錐がカメラの位置・姿勢を表す。同図より、推定された位置・姿勢が振動していることが

見てとれる。マーカを基準としたカメラの推定位置は、マーカ姿勢の推定角度の影響を大きく受けるため、カメラとマーカとの距離が大きくなればなるほどその影響が大きくなり、推定位置の誤差が大きくなる。

### 3.4 拡張現実感システムへの応用

提案手法を利用したウェアラブル型拡張現実感システムの構成を図 15 に示す。本システムは、光学スルー型ディスプレイ (ND2000: MICROVISION), および図 3 に示す位置・姿勢計測システムを構成する赤外線 LED 付き赤外線カメラと計算機 (MP-XP7310: JVC) から構成される。赤外線カメラはディスプレイが取り付けられている帽子の上に鉛直上向きに取り付けられており、天井に設置された不可視マーカを撮影する。



(a) 赤外光を照射しないときの撮影画像 (b) 赤外光を照射したときの撮影画像 (c) マーカ認識結果  
 (a) Captured images when infrared LEDs are switch-off. (b) Captured images when infrared LEDs are switch-on. (c) Results of marker recognition.

図 13 マーカ認識の様子

Fig. 13 Images obtained by infrared camera and results of marker recognition.

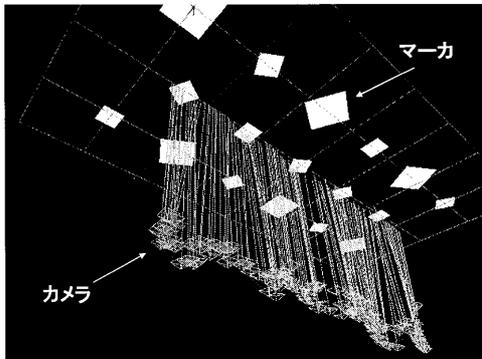


図 14 カメラ位置・姿勢推定結果

Fig. 14 Estimated camera position and orientation.



図 16 ウェアラブル型拡張現実感システムによる注釈提示

Fig. 16 Annotation overlay image.

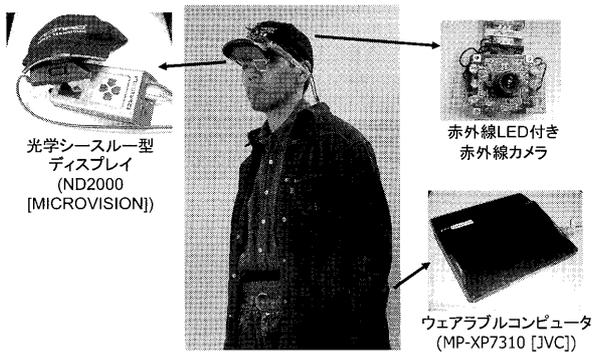


図 15 ウェアラブル型拡張現実感システム

Fig. 15 Wearable augmented reality system.

本システムは、位置・姿勢計測システムから得られたユーザの頭部の位置・姿勢情報と注釈情報の提示位置を用いて、ウェアラブルコンピュータとして利用している PC で注釈提示画像を生成し、ユーザに提示する。

本システムを運用した際に、ユーザに提示された注

釈画像を図 16 に示す。また、このときの実験環境は、前節と同様に、大きさの異なる 2 種類のマーカを、角度を  $60^\circ$  ずつ変えて、図 17 のように実環境の天井約 18m に等間隔に配置した。一方のマーカは一辺の長さを 16cm、内部パターンとして配置する点の大きさを 1cm 四方とし、もう一方は一辺の長さ 28cm、内部パターンの点の大きさを 2cm 四方とした。両者とも外枠の幅は 1cm、格子行数  $N = 4$  とし、マーカパターンのビットコードに 1 ビットのパリティビットを付加した。同図において、x-y 平面が天井面を表し、z 軸は鉛直下向きに対応する。

本実験により、提案した位置・姿勢推定手法をウェアラブル型拡張現実感に利用できることを確認した。しかし、推定された位置・姿勢が量子化誤差等の影響により細かく振動しているため、仮想物体である注釈も振動することが確認された。本システムで得られる

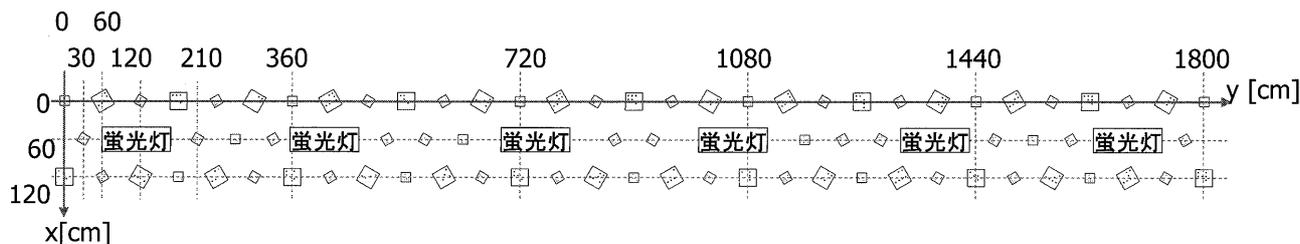


図 17 天井に設置したマーカの配置図  
Fig. 17 Layout of markers on the ceiling.

ユーザの位置・姿勢の精度を考慮すると、5m 前方に、画角 50°, 640 × 480 のディスプレイに仮想物体を重畳表示することを想定した場合、ディスプレイ上では約 40 ピクセルの誤差で仮想物体を提示することになる。よって、推定する位置・姿勢を安定化し、仮想物体の振動を抑制する手法の適用が必要である。

#### 4 まとめ

本論文では、不可視マーカと赤外線カメラを利用した位置・姿勢推定手法を提案し、マーカの配置パターンの検討、実証実験、および本手法を利用したウェアラブル型拡張現実感システムによる注釈提示実験の結果より、提案手法の有効性を確認した。提案手法では、半透明の再帰性反射材からなる不可視マーカに赤外光を点滅照射し、その反射光を撮影することによって位置・姿勢推定を行う。その際、赤外光の点滅照射に同期してマーカを撮影することで、マーカからの反射光以外の赤外光の影響を軽減している。実験を通して、大がかりなインフラが必要なく、かつ景観を損なうことなく、ユーザの位置・姿勢を推定することができることを確認した。シミュレーション実験より、一般的な屋内環境において本システムを運用する場合に、常にユーザの位置を推定し続けるためには、マーカの辺の長さと同距離の和がおおよそ 90cm 以内であることが望ましいことが分かった。加えて、カメラの位置・姿勢の推定精度は撮影される正方形マーカの角度に依存するため、天井に設置する際にマーカの方向が異なるように配置すべきであることが分かった。また、実環境における実験において提案手法を検証し、拡張現実感への応用としてウェアラブル型拡張現実感システムのプロトタイプを構築し、提案手法の有効性を確認した。

今後の課題としては、広域屋内環境における実験や画像上でのマーカの位置を考慮することによる位置・姿勢の推定精度の向上、推定した位置・姿勢情報の安定化などが挙げられる。

謝辞

研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「高度メディア社会の生活情報技術」プログラムの支援による。

#### 参考文献

- [1] Y. Kameda, T. Takemasa and Y. Ohta: "Outdoor see-through vision utilizing surveillance cameras," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 151-160, 2004.
- [2] J. Newman, M. Wagner, M. Bauer, A. MacWilliams, T. Pintaric, D. Beyer, D. Pustka, F. Strasser, D. Schmalstieg and G. Klinker: "Ubiquitous tracking for augmented reality," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 192-201, 2004.
- [3] 小田島太郎, 神原誠之, 横矢直和: "拡張現実感技術を用いた屋外型ウェアラブル注釈提示システム", 画像電子学会誌, Vol. 32, No. 6, pp. 832-840, 2003.
- [4] P. Daehne and J. Karigiannis: "ARCHEOGU-IDE: 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.
- [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] 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.
- [7] 大江統子, 佐藤智和, 横矢直和: "画像特徴点によるランドマークデータベースを用いた動画からのカメラ位置・姿勢推定", 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2004-157, pp. 19-24, 2005.
- [8] R. Tenmoku, M. Kanbara and N. Yokoya: "A wearable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer," Proc. 7th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'03), pp. 110-117, 2003.
- [9] 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.
- [10] M. Maeda, T. Ogawa, K. Kiyokawa and H. Take-

- mura: "Tracking of user position and orientation by stereo measurement of infrared markers and orientation sensing," Proc. 8th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC'04), pp. 77-84, 2004.
- [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. Lnapp, 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] L. Naimark and E. Foxlin: "Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker," Proc. 1st IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), pp. 27-36, 2002.
- [14] P. Malbezin, W. Piekarski and B. H. Thomas: "Measuring ARToolKit accuracy in long distance tracking experiments," Proc. 1st IEEE Int. Augmented Reality Toolkit Workshop (ART'02), 2002.
- [15] D. F. Abawi, J. Bienwald and R. Dörner: "Accuracy in optical tracking with fiducial markers: An accuracy function for artoolkit," Proc. 3rd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 04), pp. 260-261, 2004.
- [16] 羽原寿和, 町田貴史, 清川清, 竹村治雄: "ウェアラブルPCのための画像マーカを用いた広域屋内位置検出機構", 電子情報通信学会 技術研究報告, ITS2003-76, 2004.
- [17] H. Kato and H. Billinghurst: "Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system," Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Workshop on Augmented Reality (IWAR'99), pp. 85-94, 1999.

## 横矢 直和 (正会員)



1979年大阪大学大学院博士後期課程修了。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。工学博士。1986~1987年マッギル大 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年情報処理学会論文賞受賞。電子情報通信学会、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 各会員。

(2005年4月15日受付)

## [著者紹介]

## 中里 祐介 (学生会員)



2005年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。現在、同大学博士後期課程に在学中。ウェアラブルコンピュータを用いた拡張現実感に関する研究に従事。修士(工学)。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。電子情報通信学会、情報処理学会、IEEE 各会員。