

NAIST-IS-MT0351088

## 修士論文

不可視マーカと赤外線カメラを用いた  
ユーザの位置・姿勢同定

中里 祐介

2005年 3月 10日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

中里 祐介

審査委員： 横矢 直和 教授  
木戸出 正繼 教授  
山澤 一誠 助教授

# 不可視マーカと赤外線カメラを用いた ユーザの位置・姿勢同定\*

中里 祐介

## 内容梗概

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．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せを行うために，ユーザの正確な位置・姿勢情報が必要となる．

従来，実環境に多数のマーカを配置し，それらをユーザの装着したカメラで撮影することで，ユーザの位置・姿勢を求める手法が提案されている．しかし，実環境に多くのマーカを配置する必要があるため，景観を損ねるという問題があった．そこで本論文では実環境に配置した半透明の再帰性反射材からなる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，マーカからの反射光以外の赤外光の影響を取り除くために赤外線 LED の発光，消灯を繰り返し，それに同期してマーカを撮影する．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・姿勢を同定するシステムの実現が可能である．実験では，まずシミュレーションによってマーカの配置について検討する．次にシミュレーション結果に基づいて，実際の屋内環境におけるユーザの位置・姿勢推定実験を行い，提案手法の有効性を示す．

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0351088, 2005年3月10日.

## キーワード

不可視マーカ, 位置・姿勢同定, 再帰性反射材, 赤外線カメラ, ウェアラブルコンピュータ, 拡張現実感

# User Localization

## Using Invisible Visual Markers and an Infrared Camera\*

Yusuke Nakazato

### Abstract

This paper describes a new localization method in indoor environments. Since computers have made remarkable progress in recent years, a wearable computer can be realized. In applications of wearable computers like a wearable augmented reality (AR) system, the exact position and orientation of a user are required for location-based information presentation. One of the methods estimates the user's position and orientation by recognizing the visual markers which are pasted up on the ceilings or walls. However, the method has problems concerning undesirable visual effects. In order to avoid the problems, this paper proposes a new localization method which is based on using an infrared camera and invisible visual markers consisting of translucent retro-reflectors. In the proposed method, to stably extract the regions of the markers from the captured images, the camera captures the reflection of infrared LEDs that are flashed on and off continuously. This paper describes the quantitative evaluation in computer simulation to decide the alignment of markers in real environments. This study then carries out the localization experiments using a prototype system in real environments in which the markers are installed based on the marker alignment decided based on the simulation.

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0351088, March 10, 2005.

**Keywords:**

Invisible Visual Marker, Localization, Retro-reflector, Infrared Camera, Wearable Computer, Augmented Reality

# 目次

1. はじめに	1
2. 屋内における位置・姿勢同定手法に関する従来研究と本研究の位置付け	3
2.1 ユーザの位置・姿勢同定に関する従来手法	3
2.2 マーカやセンサをインフラとして用いた位置・姿勢同定手法	4
2.2.1 赤外線マーカを用いた位置・姿勢同定	5
2.2.2 画像マーカを用いた位置・姿勢同定	6
2.3 本研究の位置付けと方針	9
3. 不可視マーカと赤外線カメラによる位置・姿勢同定	11
3.1 位置・姿勢同定システムの概要	11
3.2 不可視マーカ	11
3.2.1 再帰性反射材を用いたマーカ	12
3.2.2 マーカのパターン	14
3.3 赤外線 LED 付き赤外線カメラ	15
3.4 ARToolkit を用いた位置・姿勢同定	17
4. 実験	19
4.1 マーカ配置決定のためのシミュレーション実験	19
4.1.1 シミュレーション実験環境	19
4.1.2 実験結果とマーカ配置に関する考察	20
4.2 実環境における実験	25
4.2.1 位置・姿勢同定システムの機器構成	25
4.2.2 シミュレーション実験と実環境における実験の比較	27
4.2.3 位置・姿勢同定実験結果とその考察	29
5. まとめ	35
謝辞	36



## 目 次

1	MIThril 2003	1
2	QBIC	1
3	IS-600 Mark2	4
4	AirLocation	5
5	Hallaway らの赤外線受光体	6
6	神原らの赤外線受光体	6
7	HiBall	7
8	Baratoff らのマーカ配置	8
9	羽原らのマーカ	8
10	Naiamrk らのマーカ	9
11	システムの概要	12
12	再帰性反射材の原理	13
13	再帰性反射材が貼られた力覚提示装置	13
14	光学迷彩	13
15	インフラに設置される画像マーカ	14
16	マーカのデザイン例 ( $N = 4$ ) (黒い部分が再帰性反射材)	15
17	赤外線 LED 付き赤外線カメラ	15
18	赤外線カメラによる不可視マーカの撮影画像	16
19	赤外線 LED の点滅によるマーカ抽出処理の流れ	16
20	マーカ識別と位置・姿勢推定処理の流れ	17
21	シミュレーション画像例	20
22	カメラの移動経路 ( $z=120[\text{cm}]$ )	21
23	マーカの配置に対するマーカ認識可能フレームの割合	21
24	マーカの大きさとマーカ間の距離に対する位置・姿勢推定誤差	22
25	マーカ:16cm 四方, 間隔:26.5cm の際の撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差	24
26	位置・姿勢同定システムの機器構成	26
27	シミュレーション結果に基づいたマーカの配置図	27

28	シミュレーション実験でのカメラ位置・姿勢の推定誤差 . . . . .	28
29	実環境における実験でのカメラ位置・姿勢の推定誤差 . . . . .	28
30	天井に設置したマーカの配置図 . . . . .	30
31	マーカ認識の様子 . . . . .	31
32	カメラ位置・姿勢推定結果 . . . . .	32
33	平行移動するカメラの位置推定誤差 . . . . .	33
34	平行移動するカメラの姿勢推定誤差 . . . . .	33

## 表 目 次

1	シミュレーションおよび実環境における実験での平行移動するカメラの位置・姿勢推定誤差 . . . . .	29
2	平行移動するカメラの位置・姿勢推定誤差 . . . . .	32

## 1. はじめに

近年の計算機の小型化，高性能化に伴い，図 1, 2 のような装着することで自由に移動しながら利用することができるウェアラブルコンピュータが開発され [1, 2]，市販もされている．現在，ウェアラブルコンピュータはプラントの現場や物流倉庫などで作業指示や在庫管理に利用され始めており，その普及が期待されている．このようなことを背景に，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 [3, 4]．一方，コンピュータグラフィクス (CG) で描いた仮想物体を現実環境に重畳表示することにより情報を提示する拡張現実感 (Augmented Reality:AR) の研究もさかんに行われている [5, 6]．さらに，両者を組み合わせて利用することで，ユーザの位置に応じて直感的に情報を提供するウェアラブル型拡張現実感システムも開発されており [7, 8]，ユーザのナビゲーションや観光案内などへの利用が考えられている．

ウェアラブル型拡張現実感システムを実現するためには，現実世界と仮想世界の座標系の位置合せが必要となり，正確にユーザの位置と姿勢を推定する必要がある．従来，屋外環境では，広範囲で位置計測が行える GPS を利用することが一般的である．一方，屋内環境では，GPS が利用できないため，さまざまな位置同定手法が提案されているが，高価なインフラを必要としたり，景観を損ねるといった問題がある．そこで本論文では，半透明の再帰性反射材を利用した不可視の画像マーカを用いてユーザの位置検出を行う方法を提案する．提案手法では，半透明の再帰性反射材を用いたマーカを実環境に配置し，赤外光をマーカに照射して，その反射を赤外線カメラで撮影することで，ユーザの位置・姿勢を推定する．その際，マーカからの反射光以外の赤外光の影響を取り除くために赤外線 LED の



図 1 MIThril 2003 [1]



図 2 QBIC [2]

発光，消灯を繰り返し，それに同期してマーカを撮影する．これによりインフラに電源を必要とせず，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可能となる．

以降 2 章では，屋内における位置・姿勢同定手法に関する従来研究と本研究の位置付けについて，3 章では不可視マーカを用いた位置・姿勢同定手法について述べる．4 章では提案する位置・姿勢同定手法の有効性を検証するための実験について詳述し，5 章では本論文のまとめと今後の展望について述べる．

## 2. 屋内における位置・姿勢同定手法に関する従来研究 と本研究の位置付け

本章では、本研究に関連する屋内における位置・姿勢同定手法についての従来研究および本研究の位置付けについて述べる。2.1 節では屋内におけるユーザの位置・姿勢同定に関する従来研究について述べ、その中でもインフラとしてマーカを用いた位置・姿勢同定手法について 2.2 節で詳述する。最後に 2.3 節において本研究の目的および位置付けについて述べる。

### 2.1 ユーザの位置・姿勢同定に関する従来手法

拡張現実感技術をウェアラブルコンピュータ上で実現するためには、移動するユーザの位置と姿勢を実時間で計測する必要がある。従来、姿勢に関してはジャイロセンサを利用して計測することが一般的である。位置に関しては、屋外環境においては、広範囲で位置計測を行うことが可能な GPS が多く利用されている [9, 10]。一方、本研究で対象とする屋内環境では、GPS が利用できないため、さまざまな位置同定手法が提案されている。屋内での位置・姿勢同定手法を大別すると次の二つに分けられる。一つはあらかじめ撮影しておいた環境中の画像とウェアラブルコンピュータユーザが身につけているカメラからの画像との比較を行うことにより、ユーザの位置・姿勢を推定する手法である。もう一方は環境中にマーカやセンサを設置し、それらを利用してユーザの位置・姿勢を推定する手法である。

前者の手法を利用したウェアラブル型拡張現実感システムの一つとして興梠らは Weavy[11] を提案している。このシステムでは、あらかじめ撮影しておいたパノラマ画像群とユーザが装着したカメラからの画像との位置合わせ結果から得られる絶対的な位置・姿勢情報と、加速度計、およびジャイロセンサからの情報を組み合わせることにより、ユーザの位置・姿勢を推定している。また、Vacchettiらは、現実物体表面の特徴点とエッジ情報を利用した位置合わせ手法 [12] を提案しており、あらかじめ構築しておいた現実環境のモデルとユーザが装着したカメ



図 3 IS-600 Mark2[InterSense] [13]

ラからの画像を用いて，ユーザの位置・姿勢を推定している．このような自然特徴点を利用した手法は，実環境の景観を損ねることはないが，見え方の変化に影響を受けやすく，計算量が大きいといった問題がある．後者の手法については次節で詳述する．

## 2.2 マーカやセンサをインフラとして用いた位置・姿勢同定手法

本節では環境中にマーカやセンサを設置し，それらを利用してユーザの位置・姿勢を推定する手法について述べる．環境中に特殊なセンサを設置する手法には，超音波や電波等を利用した手法がある．例えば，図 3 に示す InterSense 社の IS-600 Mark2[13] では，環境中に設置した複数の超音波センサで，ユーザが装着する超音波ビーコンからの超音波の走行時間を計測することによって，ユーザの位置を計測している．また，図 4 に示す日立の AirLocation[14] では，複数のの基地局と無線 LAN 端末の間を伝播する無線 LAN 信号を利用して三辺測量を行うことにより，端末位置を検知する．このようなシステムでは，インフラに電源が必要で高価な装置を設置する必要があり，景観を損ねる場合がある．また，環境側に設置したセンサでユーザの位置を同定するため，実時間でユーザの位置・姿勢情報を獲得する必要があるウェアラブル型拡張現実感システムへの利用は，通信遅延等の問題が発生する場合があり，望ましくないと考えられる．

そこで環境側に位置同定のためのインフラとしてマーカを設置する手法がある．



図 4 AirLocation[日立] [14]

マーカとしては人には見ることができない赤外光を発する LED や、幾何学的な画像マーカが利用されることが多く、マーカの特徴に特化したマーカ抽出処理が可能であるため、マーカ等の人工物を用いない手法に比べて位置検出が容易であるという特徴がある。以下に赤外線マーカおよび画像マーカを用いた位置・姿勢同定手法について詳述する。

### 2.2.1 赤外線マーカを用いた位置・姿勢同定

ここで赤外線マーカとは、赤外線 LED や、IrDA 等の赤外線信号を発信する赤外線ビーコンを指す。これら赤外線マーカは赤外線カメラや IrDA 受信機で捉えることが可能である。このような赤外線マーカを利用した位置・姿勢同定手法では、環境中に設置した赤外線マーカに位置 ID を対応付け、その信号を受信することにより絶対位置を取得する。天目らはさらにコンパスと加速度センサを組み合わせることにより、マーカ位置からの相対的な移動位置を推定し、ジャイロセンサで姿勢を計測している [15]。また Hallaway らは、複数の赤外線受光体を図 5 のように同一平面上に配置し、それを装着したユーザの 2 次元位置と方位角度の推定を行っている [16]。神原らは図 6 のように、信号の受信範囲が半球をカバーす



図 5 Hallaway ら [16] の赤外線受光体

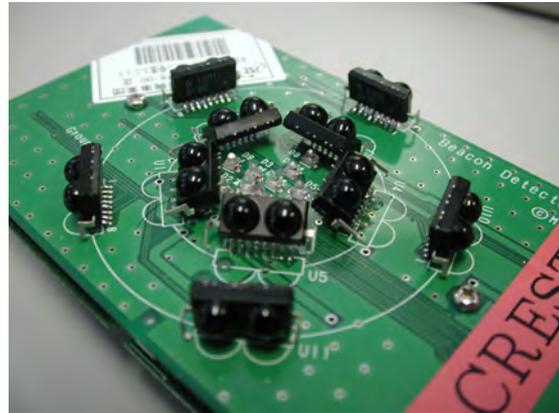


図 6 神原ら [17] の赤外線受光体

るよう 10 個の赤外光受光体を 3 次元的に配置することでユーザの 3 次元位置・姿勢を推定している [17]。前田らは赤外線マーカをユーザの頭部に装着したステレオカメラを用いて撮影し，同じく頭部に装着したジャイロセンサからの情報と組み合わせることにより，より正確なユーザの位置・姿勢情報を推定している [18]。Welch らの HiBall[19] では，図 7 に示すような 6 面のフォトダイオードからなるセンサを用いて，環境に設置した多数の赤外線 LED を，その発光と同期して撮影することによって，ユーザの位置・姿勢の推定を可能としている。

以上の手法では赤外線信号を受信するため安定した位置検出が行えるが，電源を必要とする赤外線マーカを環境中にインフラとして設置する必要があり，またマーカとして設置する赤外線ビーコンが景観を損ねてしまうという問題がある。

### 2.2.2 画像マーカを用いた位置・姿勢同定

上述のマーカを用いた位置・姿勢同定手法のように電源が必要なインフラを設置できない場合や，インフラの設置コストを安価に抑えたい場合，画像マーカを利用することが考えられる [20, 21]。画像マーカを利用した手法では，実環境に位置・形状・色が既知の画像マーカを多数配置し，ユーザが装着したカメラによる撮影画像からそれらを抽出し，ユーザの位置・姿勢を推定する。Baratoff ら [22] や羽原ら [23] は図 8,9 に示すように，正方形のマーカを実環境中に配置すること

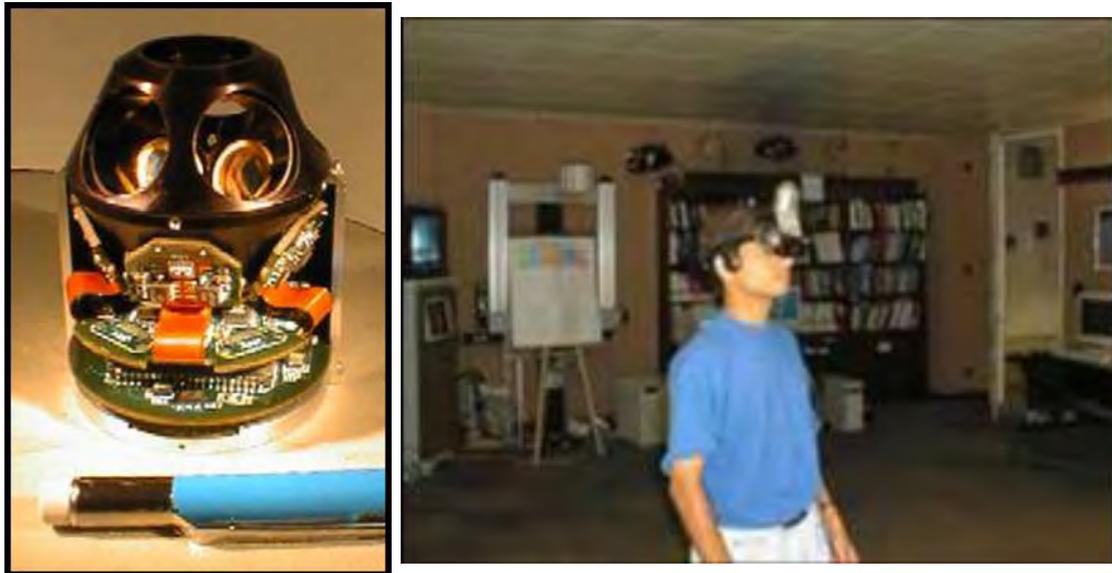


図 7 HiBall [19]

によってユーザの位置同定を行っている．Baratoff らの手法はマーカの検出と同定に ARToolKit[24] を利用している．ARToolKit は画像マーカが撮影された際の形状の歪みから，カメラに対するマーカの相対的な位置を推定し，CG で描かれた仮想物体を撮影画像に重畳表示するシステムを容易に構築できるライブラリである．しかし，マーカの同定にパターンマッチングを行っているため，マーカの種類が増えると，処理時間とマッチングの失敗率が共に増加するという問題がある．そこで羽原らはマーカのパターンから一意に ID を決定できるマーカを提案し，ユーザの位置・姿勢同定に利用している．また，Naimark ら [25] は，図 10 のような数万種類の ID が生成可能な円形のマーカを提案し，それと加速度センサを融合することで，安定して位置同定可能なシステムを開発した．

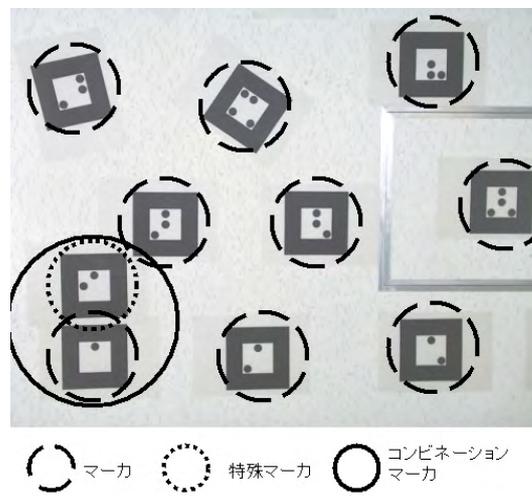
このような画像マーカを通常のカメラで撮影する手法は，安価でかつインフラに電源を必要としないという利点があるが，図 8,9,10 から明らかなように，実環境の景観を損ねてしまうという問題がある．



図 8 Baratoff ら [22] のマーカ配置



(a) 羽原らのマーカ配置



(b) 羽原らの正方形マーカ

図 9 羽原ら [23] のマーカ



(a) Naimark らのマーカ配置



(b) Naimark らの円形マーカ

図 10 Naimark ら [25] のマーカ

### 2.3 本研究の位置付けと方針

ウェアラブル拡張現実感システムにおいては、ユーザの位置・姿勢を同定する必要がある。前述のように GPS を使うことができない屋内での位置・姿勢検出手法が既に数多く提案されている。しかし、赤外線マーカや超音波などを利用するシステムでは、位置検出精度は優れているが、インフラに電源が必要で設置コストが高いという問題がある。インフラのための電源工事ができない場合や、その設置コストを低く抑えたい場合に適用できる手法として、画像マーカを利用する手法がある。マーカを利用する手法を用いて、実際に屋内の広い範囲でユーザの位置・姿勢を同定し続けるためには、数多くのマーカを環境中に設置する必要がある。しかし通常のカメラを用いたシステムが認識しやすい画像マーカは、人間にも認識しやすく、図 8,9,10 から明らかなように、非常に目立ってしまうため、実環境の景観を損ねてしまうという問題がある。

そこで本研究では、半透明の再帰性反射材を利用した不可視の画像マーカを用いてユーザの位置・姿勢を同定する方法を提案する [26, 27, 28]。提案手法では、半透明の再帰性反射材からなるマーカを実環境に配置し、赤外光をマーカに照射して、その反射を赤外線カメラで撮影することで、ユーザの位置検出を行う。そ

の際、マーカからの反射光以外の赤外光の影響を取り除くために、赤外線 LED の発光、消灯を繰り返し、それに同期してマーカを撮影する。これによりインフラに電源を必要とせず、かつ景観を損なうことなくユーザの位置・姿勢を同定することを可能にする。

### 3. 不可視マーカと赤外線カメラによる位置・姿勢同定

本章では、提案する不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢同定手法について述べる。3.1 節では提案手法の概要を、3.2 節では使用する不可視マーカについて述べる。次に3.3 節では実際に試作した赤外線 LED 付き赤外線カメラについて述べ、3.4 節で位置・姿勢同定の処理について述べる。

#### 3.1 位置・姿勢同定システムの概要

提案システムの概要を図 11 に示す。まず環境中の天井などの平面に半透明の再帰性反射材からなる不可視マーカを設置する。これらのマーカの位置は他のセンサ等を用いてあらかじめ計測しておき、その位置と大きさ、およびパターンは既知とする。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、画像にはマーカからの反射光だけではなく環境中にある赤外光を含む蛍光灯や太陽光の照り返しなども撮影される。そこで、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。次に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。最後に、撮影したマーカに割り当てた ID パターンを識別することにより、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 隅の点に分かるので、その形状の歪みからマーカに対するカメラの相対的な位置・姿勢を求めることができる [24]。

#### 3.2 不可視マーカ

本節では提案手法で用いる不可視マーカについて詳述する。

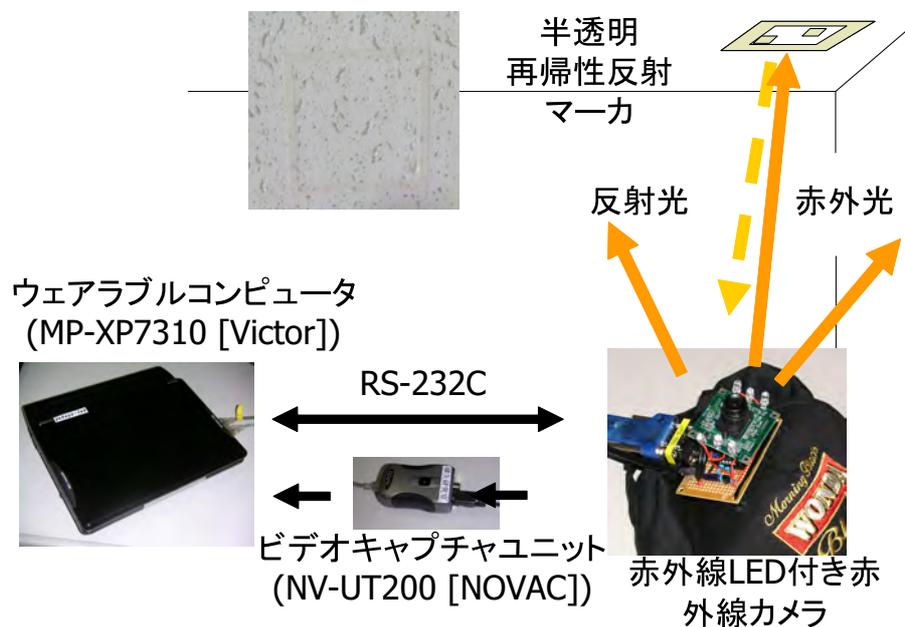


図 11 システムの概要

### 3.2.1 再帰性反射材を用いたマーカ

提案手法で用いる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．再帰性反射材では，図 12 のように，素材表面に球状のレンズを敷き詰めることによって，光の入射角と出射角を等しくしている．この特性を利用して再帰性反射材は道路標識や警備員の作業着などに利用されており，自動車の運転者はヘッドライトを反射したこれらの再帰性反射材を遠距離から認識することができる．また，稲見らは力覚提示装置の表面に再帰性反射材を貼り，ユーザの視点付近からプロジェクタにより CG で描かれた仮想物体を投影することにより，図 13 のように力覚提示装置を隠蔽している [29]．同様に光学迷彩 [30] では，表面が再帰性反射材で構成される服を着た人の背後で撮影した映像を，観測者の視点付近から再帰性反射材の服に投影することで，図 14 のように背後が透けて見える服を実現している．

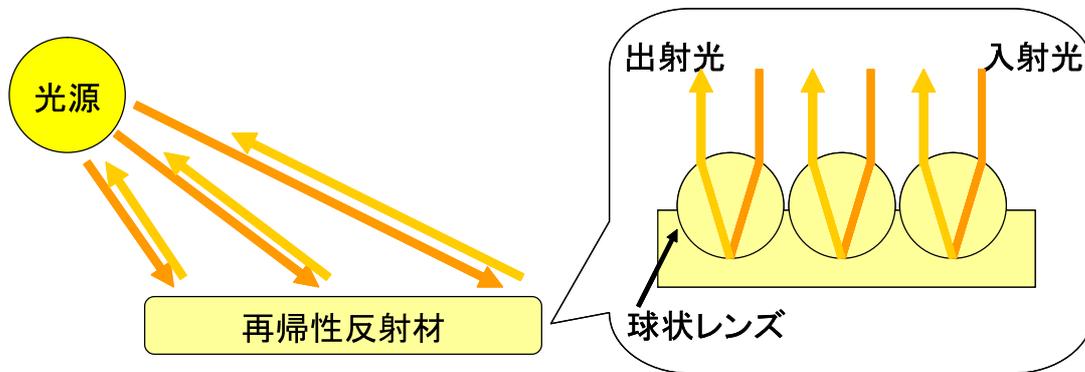


図 12 再帰性反射材の原理



図 13 再帰性反射材が貼られた力覚提示装置 [29]



図 14 光学迷彩 [30]



(a) 通常の画像マーカ      (b) 半透明再帰性反射マーカ      (c) 半透明再帰性反射マーカ  
(フラッシュ有り)

図 15 インフラに設置される画像マーカ

通常の画像マーカを天井に設置した場合，図 15(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用いると，図 15(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 15(c) のようにマーカを鮮明に捉えることができる．

### 3.2.2 マーカのパターン

本研究で提案するマーカの例を図 16 に示す．この図において黒色の部分が再帰性反射材に対応する．マーカの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．よってそのパターンには  $2^{N^2-4}$  通りの ID を割り当てられる．図 16 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．

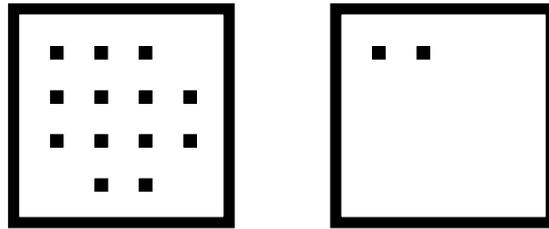


図 16 マーカのデザイン例 ( $N = 4$ ) (黒い部分が再帰性反射材)

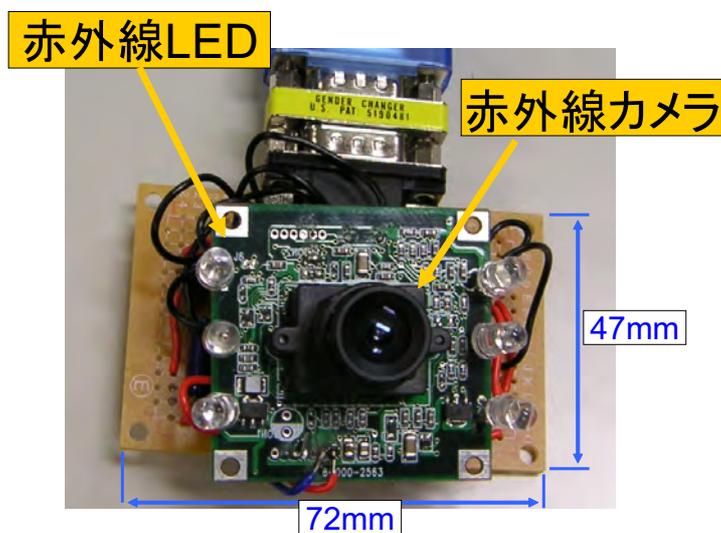


図 17 赤外線 LED 付き赤外線カメラ

### 3.3 赤外線 LED 付き赤外線カメラ

図 17 に本研究で試作した赤外線 LED 付き赤外線カメラのプロトタイプを示す。このカメラの画角は  $92.6^\circ$  で、カメラの周囲に赤外線投光器として 6 つの赤外線 LED が取り付けられている。取り付けられた赤外線 LED は RS-232C 接続を用いて接続した計算機からの信号により、その点灯が制御される。これにより赤外線 LED を点灯させた際の赤外線カメラの撮影画像と、赤外線 LED を消灯させた際の撮影画像を任意に取得することができる。

画像には図 18 のようにマーカの反射光だけではなく環境中にある赤外光を含

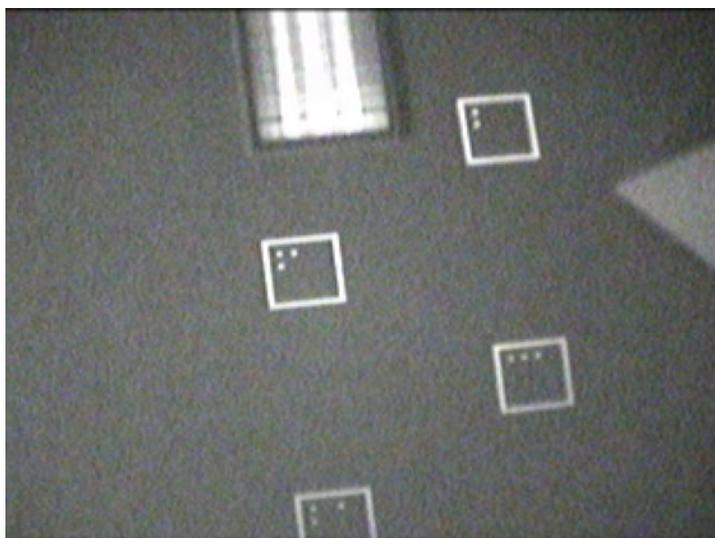


図 18 赤外線カメラによる不可視マーカの撮影画像

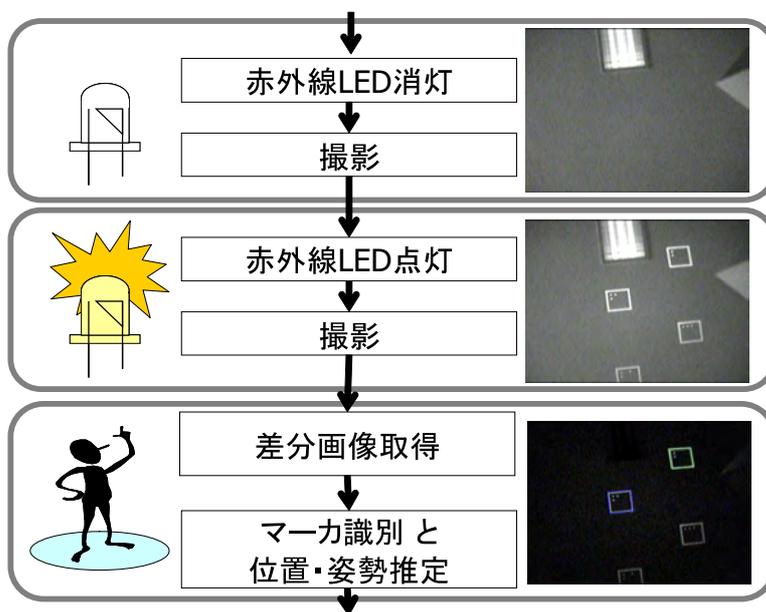


図 19 赤外線 LED の点滅によるマーカ抽出処理の流れ

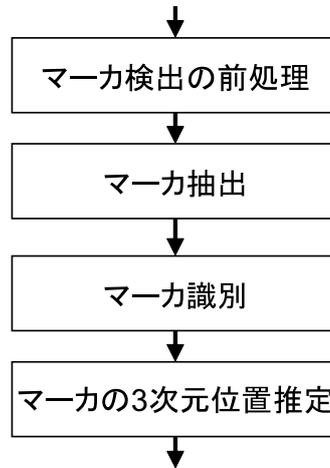


図 20 マーカ識別と位置・姿勢推定処理の流れ

む蛍光灯や太陽光の照り返しなども撮影される．このようなマーカ以外の赤外光の影響を減らすために，計算機からの制御により赤外線 LED 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により，赤外光の照射前後の差分画像を取得する．その処理の流れを図 19 に示す．赤外線 LED を消灯させた際に撮影した画像には再帰性反射マーカは映らない．一方，赤外線カメラの周囲に取り付けた赤外線 LED を点灯させた際は，再帰性反射材が赤外光をカメラ方向に反射するために，再帰性反射マーカは鮮明に撮影される．よって両者の差分をとることにより，再帰性反射マーカのみを抽出することができる．

### 3.4 ARToolkit を用いた位置・姿勢同定

前節で述べた処理により得られる差分画像には，再帰性反射マーカのみが撮影される．この画像から正方形のマーカを抽出し，マーカが割り当てられた ID を決定する．実環境でのマーカの 3 次元位置および大きさは既知であるため，マーカの正方形の 4 隅の点を用いてマーカに対するカメラの相対的な位置・姿勢を推定する．本研究ではこれらの処理の多くに ARToolKit[24] を利用している．これらの処理の流れを図 20 に示す．以下，各処理について説明する．

1. マーカ検出の前処理 差分画像に対して，固定閾値による二値化，連結領域ごとの面積・外接長方形計算を行う．
2. マーカ抽出 面積値の巨大領域と微小領域，外接長方形が画像境界に接する連結領域を除外する．残った連結領域に対して輪郭線追跡を行い，輪郭線上の画素位置を記憶する．輪郭線データに対して直線近似を行い，4本の線分によって十分な精度で近似された連結領域をマーカ候補とし，4つの線分の交点の座標値を記憶する．
3. マーカ識別 抽出した四角形領域の内部を  $N \times N$  の格子状に分け，各格子の2値化を行い，マーカIDとしてのビットコードを決定する．
4. マーカの3次元位置・姿勢推定 マーカ抽出の際に記憶した四角形領域の4つの頂点の座標値を利用し，マーカ座標系からカメラ座標系への変換行列を推定する．複数のマーカが検出された場合は，画像上に映った領域が最大であるマーカから推定した変換行列を初期値として，全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再度推定する．これにより，カメラとマーカの3次元での相対位置関係が把握できる．

## 4. 実験

前章で述べた提案手法を実装したプロトタイプシステムを構築し，マーカ配置の検討，およびプロトタイプシステムに関する評価実験を行った．4.1 節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について，4.2 節ではシミュレーション結果に基づいて決定したマーカ配置による実環境における実験について述べる．

### 4.1 マーカ配置決定のためのシミュレーション実験

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った．

#### 4.1.1 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・姿勢の推定を行った．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[24] を利用した．また，生成した画像には本研究で試作した図 17 の赤外線 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 21 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，隣り合うマーカ間の距離が同じになるようにマーカを正六角形状に配置した．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，および，マーカ間の間隔を 20cm から 140cm 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．カメラは鉛直上向きに天井と正対して，図 22 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．この図において，原点はマーカを設置する天井にあり，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

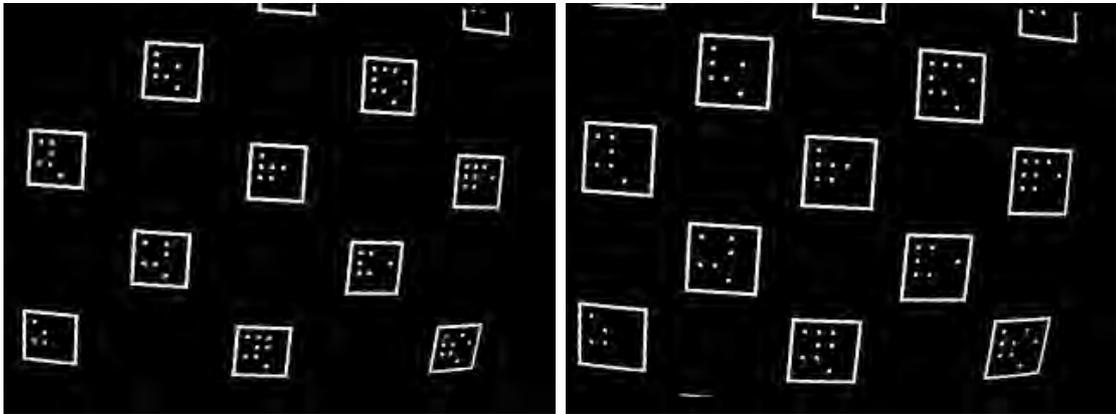


図 21 シミュレーション画像例

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。

#### 4.1.2 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、マーカを認識してカメラの位置・姿勢を推定することができたフレームの割合を図 23 に示す。マーカ間の距離を大きくすると、マーカが画像内に納まらない場合や撮影領域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ある。常にユーザの位置・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領域内に入り続けなければならないため、マーカ認識可能フレームの割合が 98% 以上の結果に注目すると、本システムを一般の屋内環境で用いる場合、マーカの間隔はマーカの辺の長さでマーカ間の距離の和が 90cm 以内であることが望ましいということが分かった。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・姿勢を推定するため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すべきである。

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 ( $x, y, z, pitch, roll, yaw$ ) の平均誤差を図 24 に示す。ここでマーカを設置した天井面を  $x-y$  平面、鉛直下向を  $z$  方向とし、 $pitch, roll, yaw$  はそれぞれ

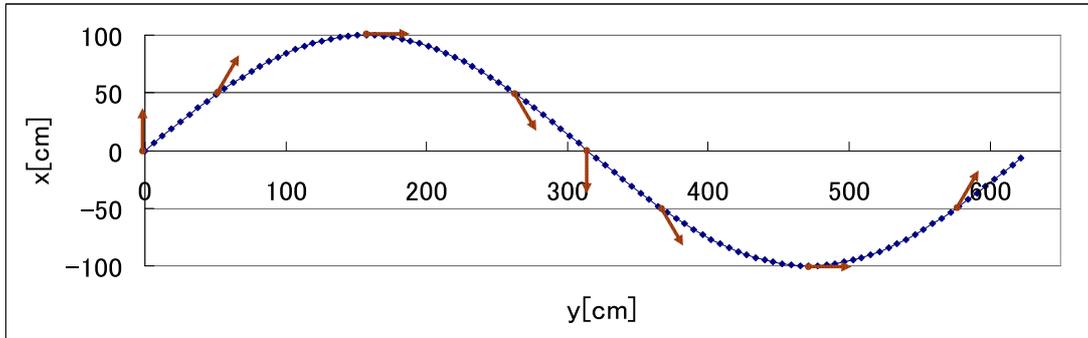


図 22 カメラの移動経路 ( $z=120[\text{cm}]$ )

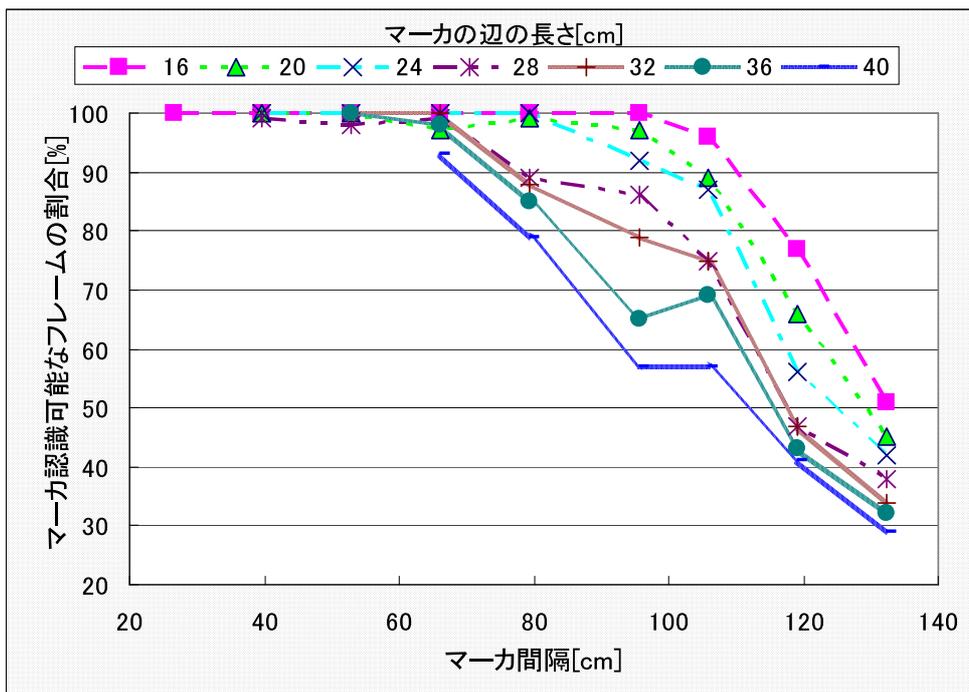
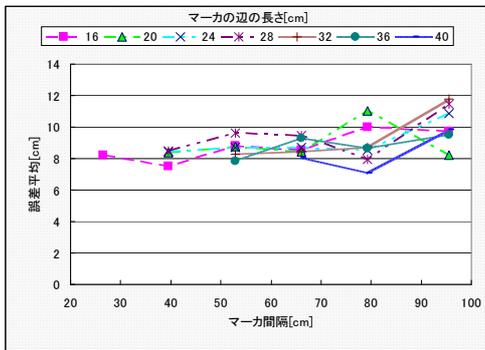
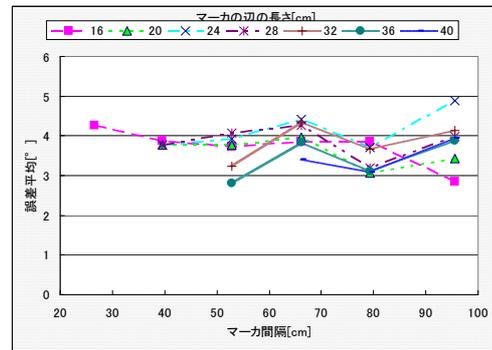


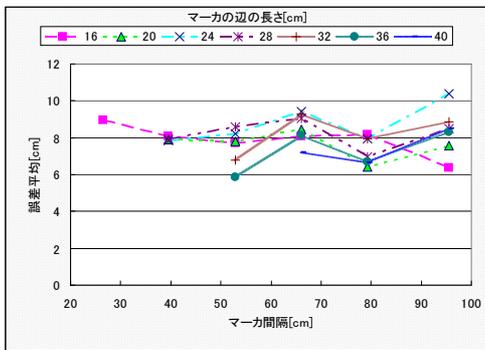
図 23 マーカの配置に対するマーカ認識可能フレームの割合



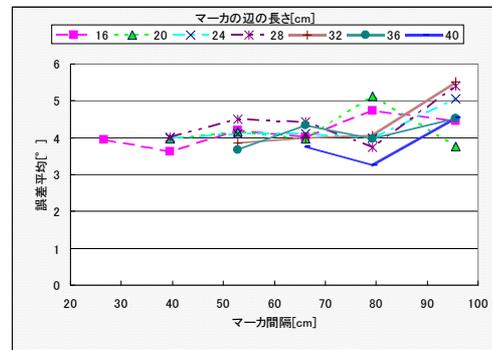
(a) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する位置推定誤差 ( $x$ )



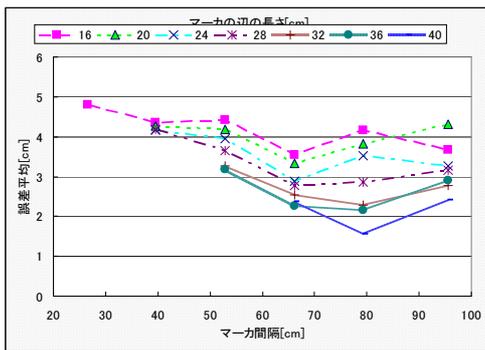
(d) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する姿勢推定誤差 ( $pitch$ )



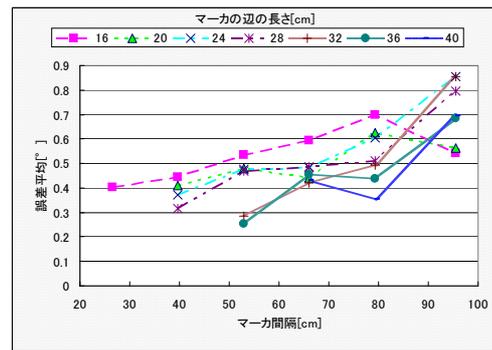
(b) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する位置推定誤差 ( $y$ )



(e) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する姿勢推定誤差 ( $roll$ )



(c) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する位置推定誤差 ( $z$ )



(f) マーカの大きさとマーカ間の距離に対する姿勢推定誤差 ( $yaw$ )

図 24 マーカの大きさとマーカ間の距離に対する位置・姿勢推定誤差

$x, y, z$  軸に対するカメラの回転角度を表す。

図 24 (f) より,  $yaw$  角に関しては画像マーカの特性により誤差  $1^\circ$  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ってい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。

さらに図 24 より, マーカ間の配置間隔が同じであればマーカが大きいほど誤差が小さくなっていることが分かる。しかしながら, マーカを大きくすると, フレーム内で認識可能なマーカ数が減るため, 連続して位置・姿勢を推定し続けることは困難であると考えられる。よって異なる大きさのマーカを組み合わせで使用した方が安定して良い精度が得られるのではないかと考えられる。

図 24 (a) と (e), (b) と (d) をそれぞれ比較すると,  $x$  方向の位置推定誤差と  $roll$  角の推定誤差,  $y$  方向の位置推定誤差と  $pitch$  角の推定誤差には相関関係があることが確認できる。さらに, マーカ:16cm 四方, 間隔:26.5cm の際の, 撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差を示した図 25 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。また, 図 25 より,  $pitch$  角,  $roll$  角の誤差はマーカを撮影した角度に依存しており, 正方形マーカを  $45^\circ$  の角度から撮影した場合に誤差が小さくなっている。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, 異なる向きでマーカを設置することが望ましいと考えられる。

マーカとカメラの距離が変化した場合, 推定精度は画像上でのマーカの大きさに依存するため, 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。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, おおよそ  $h/120$  倍の大きさのマーカを使用すればよいと考えられる。

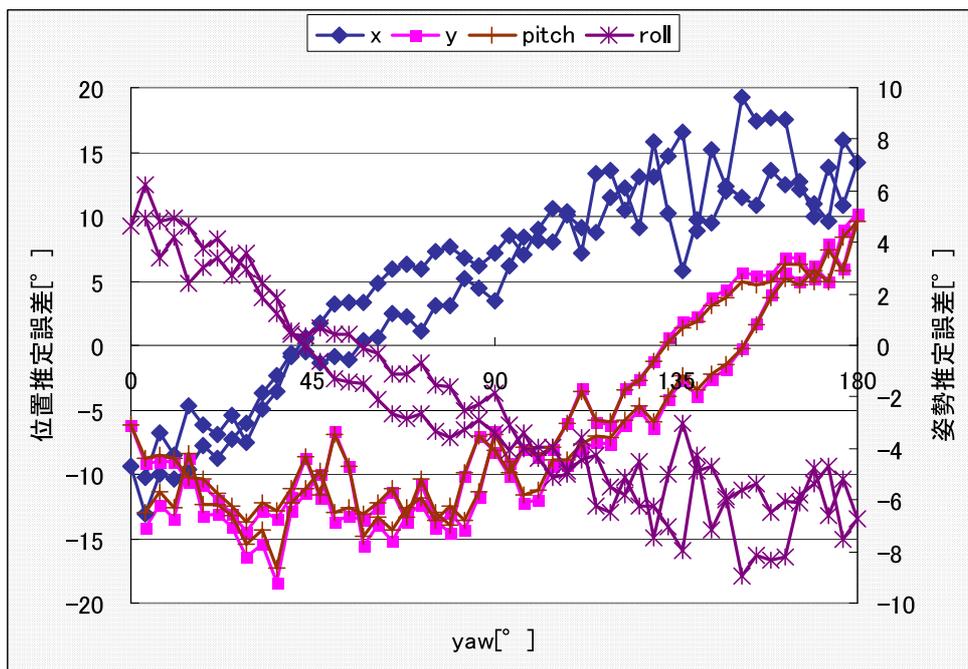


図 25 マーカ:16cm 四方 , 間隔:26.5cm の際の撮影角度に対する位置・姿勢推定誤差

## 4.2 実環境における実験

前節で述べたシミュレーション結果に基づいてマーカを配置し、実環境において実験を行った。

### 4.2.1 位置・姿勢同定システムの機器構成

本実験で使用した位置・姿勢同定システムの機器構成を図 26 に示す。本システムのユーザはウェアラブルコンピュータとしてノート PC を装着し、天井のマーカを撮影するため、鉛直上向きの赤外線 LED 付き赤外線カメラを頭部に装着する。赤外線 LED は RS-232C 接続したウェアラブルコンピュータによってその点灯を制御される。撮影された映像はビデオキャプチャユニットを通してウェアラブルコンピュータに取り込まれ、ユーザの位置・姿勢推定に用いられる。以下に、システムを構成する各機器について述べる。

赤外線 LED 付き赤外線カメラ 画角  $92.6^\circ$  , 画素数:542(H) $\times$  492 (V) , 出力 NTSC ビデオ信号。カメラ周囲に赤外線投光器として 6 つの赤外線 LED が取り付けられており、自作した制御回路によりその点灯が制御される。制御回路は計算機と RS-232C 接続を用いて接続し、計算機から LED の点灯命令、または消灯命令を受信すると、LED の点灯、消灯をそれぞれ行う。

ノート PC: Inter Link MP-XP7310 [Victor] , CPU PentiumM 1GHz , メモリ 768 Mbytes。カメラのキャプチャタイミングに同期して、赤外線 LED 制御回路に RS-232C 接続を通して赤外線 LED の点灯命令、および消灯命令を送信する。また、キャプチャした赤外線カメラの映像を用いて、カメラの位置・姿勢を推定する。

ビデオキャプチャユニット NV-UT200 [NOVAC] , 最大解像度  $720 \times 480$ pixel , 最大フレームレート 30fps。計算機と USB 接続し、赤外線カメラからの NTSC ビデオ信号を撮影する。本実験では  $320 \times 240$ pixel の画像を 30fps で撮影した。

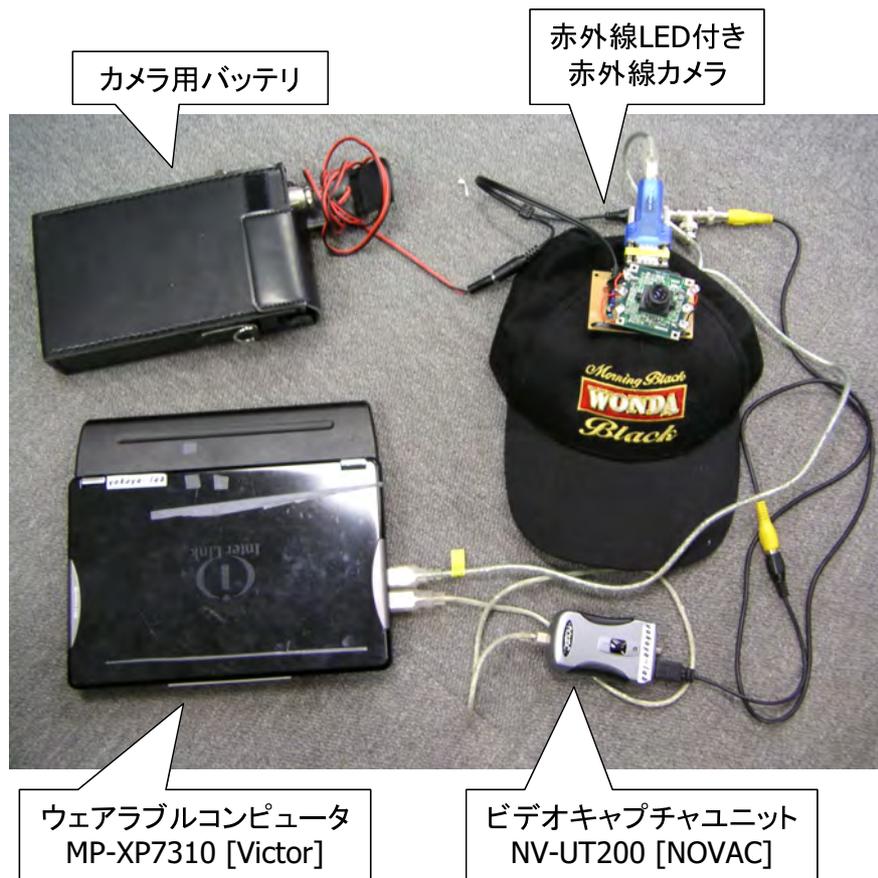


図 26 位置・姿勢同定システムの機器構成

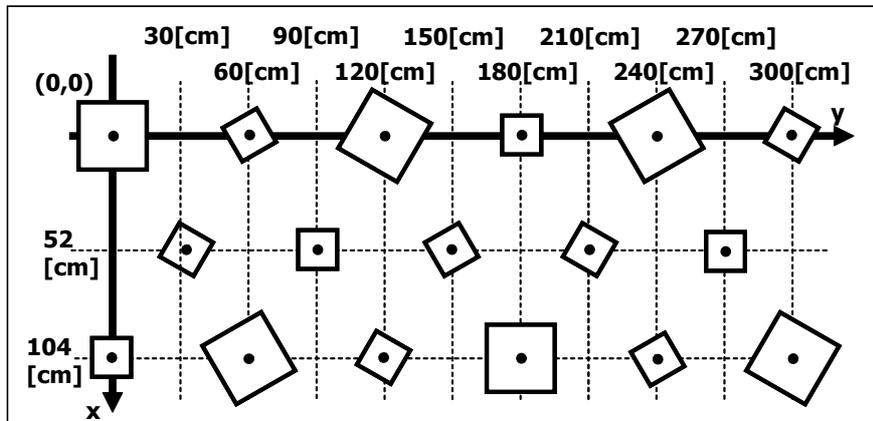


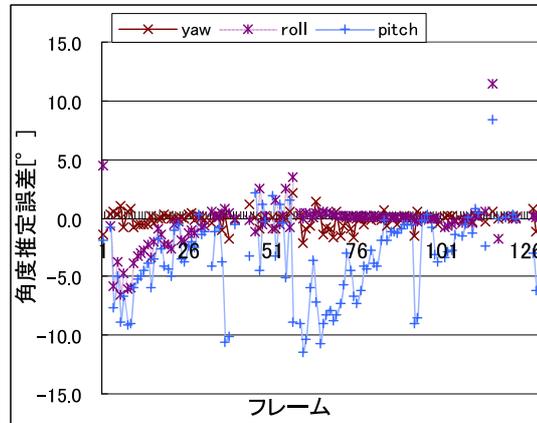
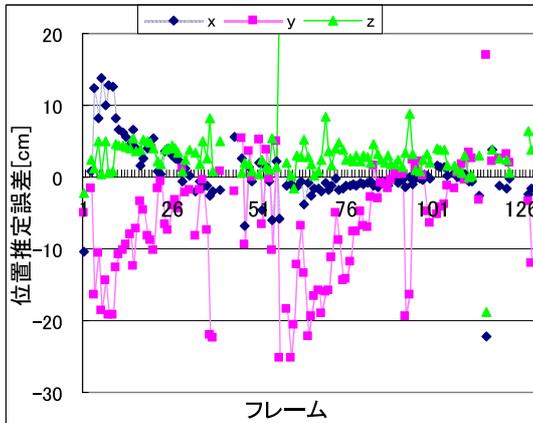
図 27 シミュレーション結果に基づいたマーカの配置図

#### 4.2.2 シミュレーション実験と実環境における実験の比較

シミュレーション実験の結果に基づいたマーカの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の両者において同じマーカ配置で実験を行った。シミュレーション結果に基づき、図 27 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  $60^\circ$  ずつ変えて天井に配置した。両者とも外枠の幅 1cm、格子行数  $N = 4$  とした。図 27 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。

鉛直上向きのカメラを開始点 (60, 20, 120) から終了点 (60, 300, 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 28 と 29 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。実環境における実験ではカメラを電動車椅子に固定し移動させ、その移動は等速直線運動であったと仮定している。このとき認識されたマーカは各フレーム 4 個程度であった。

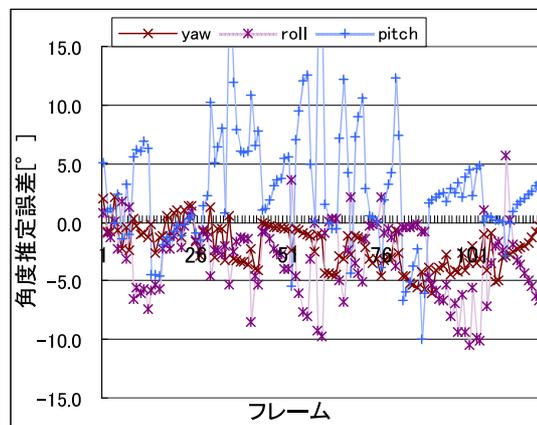
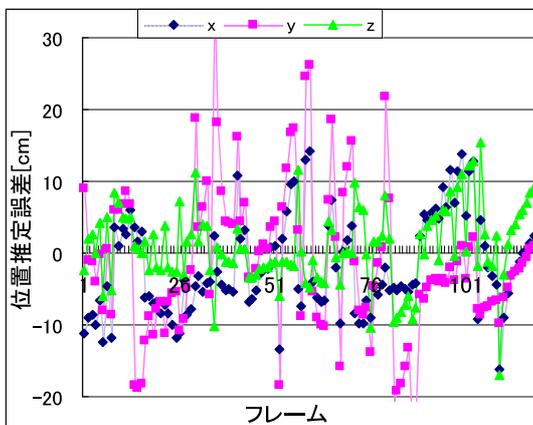
この結果より、シミュレーションにおいても、実環境においても、マーカが全て同じ角度で配置されている場合と比べて、マーカの撮影角度による影響が軽減されていることがわかる。また、実環境において、移動時のカメラ位置の乱れを考慮しても、マーカが正しく認識されれば位置に関しては平均 10cm、最大 20cm



(a) シミュレーション実験でのカメラ位置の推定誤差

(b) シミュレーション実験でのカメラ姿勢の推定誤差

図 28 シミュレーション実験でのカメラ位置・姿勢の推定誤差



(a) 実環境における実験でのカメラ位置の推定誤差

(b) 実環境における実験でのカメラ姿勢の推定誤差

図 29 実環境における実験でのカメラ位置・姿勢の推定誤差

表 1 シミュレーションおよび実環境における実験での平行移動するカメラの位置・姿勢推定誤差

		x[cm]	y[cm]	z[cm]	pitch[°]	roll[°]	yaw[°]
シミュレーション実験	平均	2.7	7.6	3.4	3.8	1.2	0.4
	標準偏差	3.5	6.7	3.5	3.1	1.9	0.5
実環境における実験	平均	5.9	8.2	4.2	4.2	3.5	2.3
	標準偏差	3.5	6.7	3.5	3.9	2.8	1.5

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。

#### 4.2.3 位置・姿勢同定実験結果とその考察

前節の結果に基づき，安定してかつ精度よくカメラ位置を推定するために，実環境の約 18m に渡って，前項と同様に，大きさの異なる 2 種類のマーカを，角度を 60° ずつ変えて，図 30 のように天井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が 2cm 四方とした．両者とも外枠の幅は 1cm，格子行数  $N = 4$  とした．図 30 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．

鉛直上向きのカメラを開始点 (50, 1800, 120) から終了点 (50, 0, 120) まで (単位 cm) 平行移動した．カメラは電動車椅子に固定し移動させ，その移動は等速直線運動であったと仮定する．図 31 に天井に設置したマーカを撮影した際のマーカ認識の様子を示す．

マーカに赤外光を照射せずに撮影すると，図 31(a) のように撮影画像にはマーカは映らない．しかし，赤外光を照射すると図 31(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 31(c) で示す

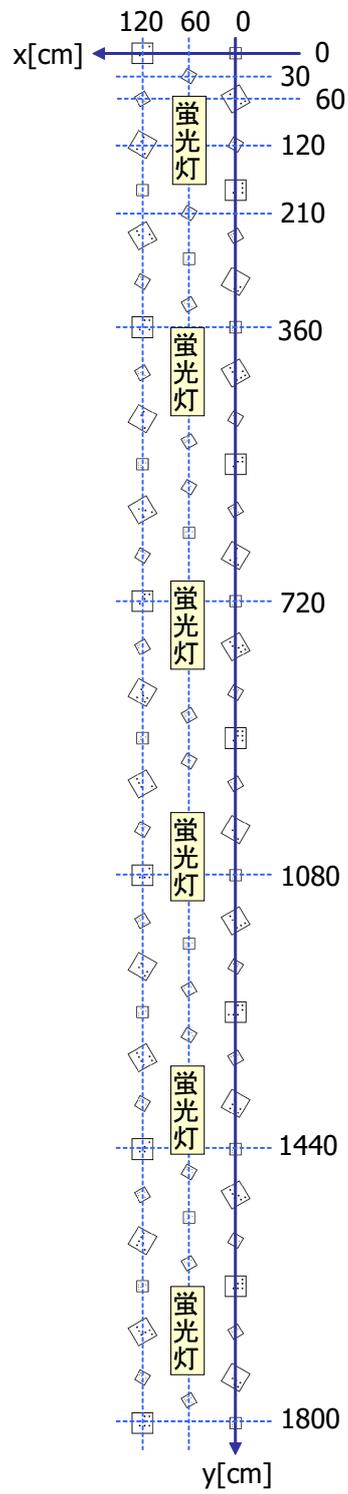
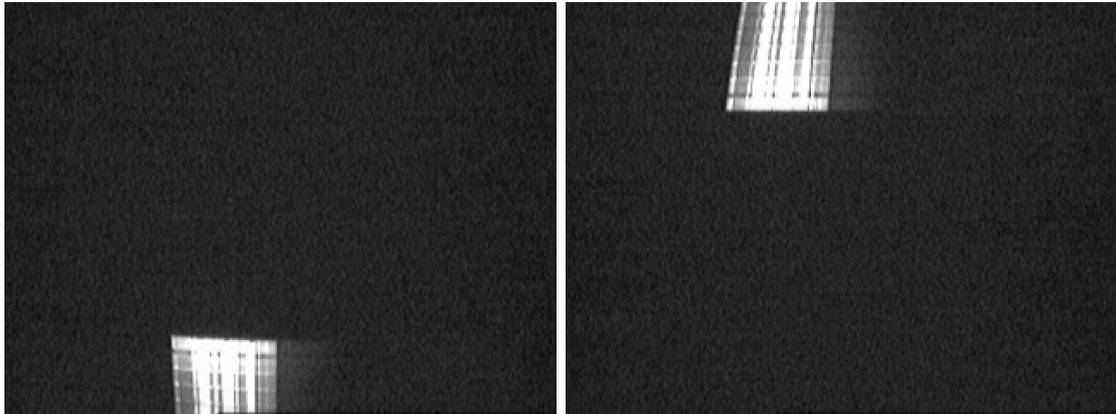
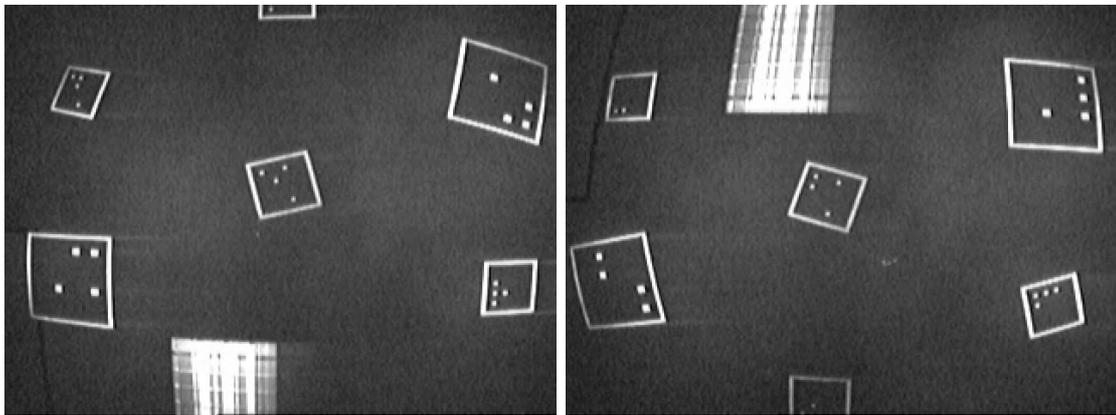


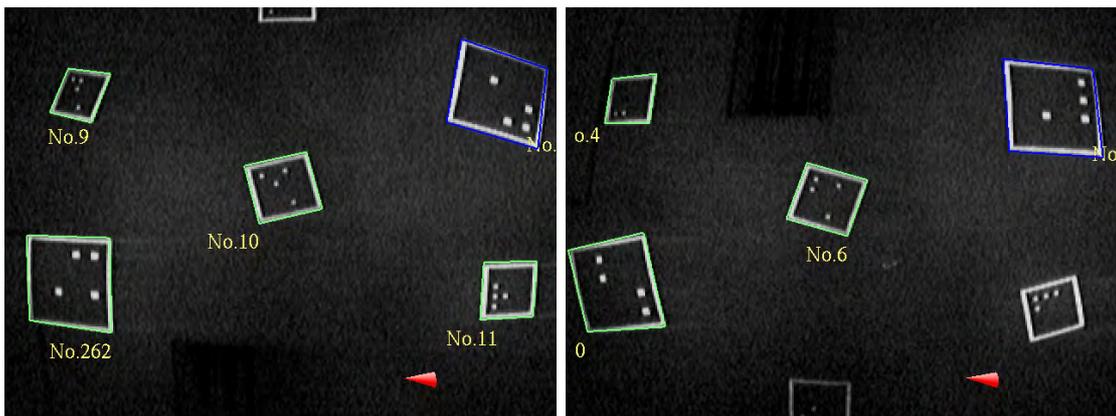
図 30 天井に設置したマーカの配置図



(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

図 31 マーカ認識の様子

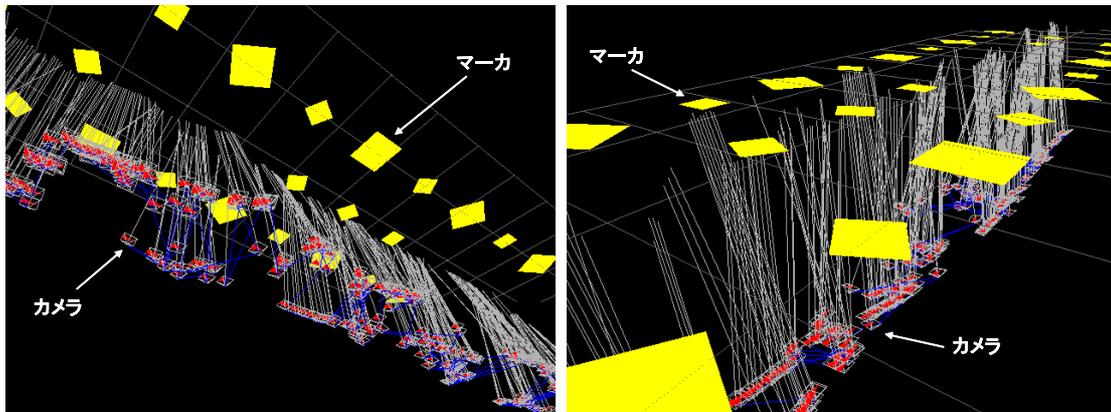


図 32 カメラ位置・姿勢推定結果

表 2 平行移動するカメラの位置・姿勢推定誤差

	x[cm]	y[cm]	z[cm]	pitch[°]	roll[°]	yaw[°]
平均	14	15	7.5	5.2	8.5	6.5
標準偏差	8.9	13	5.4	5.1	5.8	5.6

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 31(c) のように常に頂点が一定方向を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 32 に示す．図 32 において，黄色の四角形が天井に設置したマーカ，白色の四角錐がカメラの位置・姿勢を表す．また，図 33, 34 に位置・姿勢の推定誤差をそれぞれ示し，誤差の絶対値の平均と標準偏差を表 2 に示す．このとき認識されたマーカは，蛍光灯がありマーカが設置できなかった場所を撮影した際には各フレーム 2 個程度，それ以外の場合では 4 個程度であった．

カメラの推定位置は推定角度の誤差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

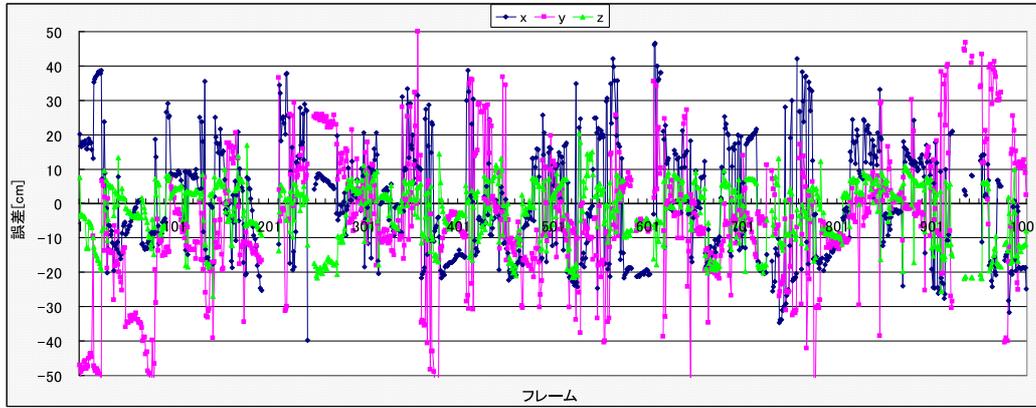


図 33 平行移動するカメラの位置推定誤差

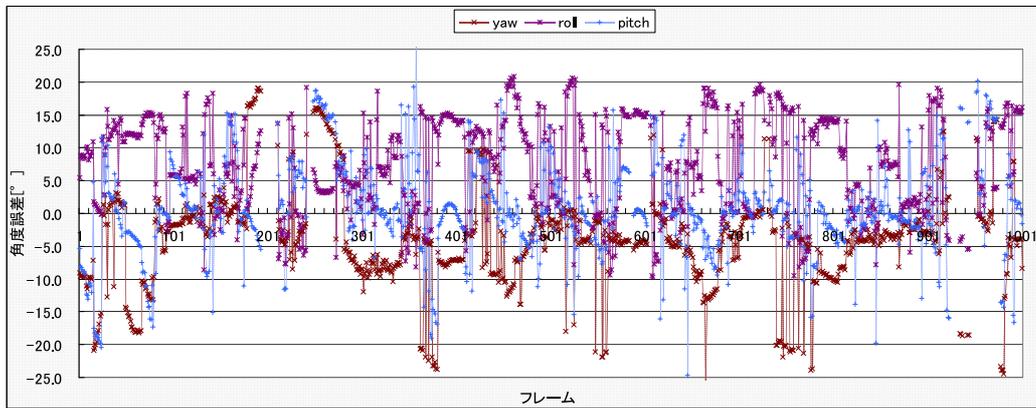


図 34 平行移動するカメラの姿勢推定誤差

大きくなってしまふ．カメラとマーカの間距離は 120cm である場合，移動時のカメラ位置の乱れを考慮しても，位置に関しては平均 15cm，最大 30cm 程度，姿勢に関しては平均  $8^\circ$ ，最大  $15^\circ$  程度の誤差でカメラ位置を推定できることがわかった．前節の結果より，誤差が大きくなっているのは，蛍光灯などの障害物によりマーカが設置できない場所があったためと考えられる．また，図 32 から分かるように推定された位置・姿勢は量子化誤差の影響などにより細かく振動しているため，拡張現実感を行うためには，仮想物体の振動を抑制する手法を適用する必要がある．

## 5. まとめ

本論文では、不可視の画像マーカとして半透明の再帰性反射材を利用することにより、景観を損なうことがなく、かつインフラに電源が不要なウェアラブルコンピュータユーザのための位置・姿勢同定システムを提案した。さらに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した。一般的な屋内環境において現在の機器構成で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定マーカ間の距離の和がおよそ 90cm 以内であることが望ましいことが分かった。また、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、シミュレーション結果を基にしてマーカ配置を決定し、実環境における実験を行い、マーカ配置の有用性を確認した。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、マーカ ID を認識し、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。

今後の課題としては、本学内を対象とした広域屋内環境における位置・姿勢同定実験や、ウェアラブル型拡張現実感を利用したナビゲーションシステム等の具体的なアプリケーションの開発が挙げられる。また、拡張現実感を行うためには、位置・姿勢の安定・平滑化を行う必要がある。さらに位置・姿勢の推定精度の向上のために、画像上でのマーカの位置の信頼度を考慮すること、およびマーカのパターンを構成する点を位置・姿勢推定に利用することなどが考えられる。

## 謝辞

本研究の全過程を通して，御懇篤なる御指導，御鞭撻を賜りました視覚情報メディア講座 横矢直和 教授に心より深謝致します．

本研究の遂行にあたり，有益なる御指摘，御助言を頂いた知能情報処理学講座 木戸出正繼 教授，ならびに視覚情報メディア講座 山澤一誠 助教授に厚く御礼申し上げます．

また，視覚情報メディア講座 神原誠之 助手には，研究の全過程を通じて直接懇切丁寧な御指導，御助言を賜りました．ここに心より深謝申し上げます．

本研究に関する貴重な御助言や御指摘を頂きました視覚情報メディア講座 佐藤智和 助手に深く感謝致します．

日頃から多岐にわたる御支援を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に感謝致します．

最後に日々の研究活動を支えて頂いた，視覚情報メディア講座 守屋知代 女史に深く感謝致します．

## 参考文献

- [1] R. DeVaul, M. Sung, J. Gips and A. Pentland: “Mithril 2003: Applications and architecture,” Proc. 7th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC’03), pp. 4–11, 2003.
- [2] O. Amft, M. Lauffer, S. Ossevoort, F. Macaluso, P. Lukowicz and G. Tröster: “Design of the qbic wearable computing platform,” Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP 2004), pp. 398–410, 2004.
- [3] 上岡隆弘, 河村竜幸, 河野恭之, 木戸出正繼: “I’m here! : 物探しを効率化するウェアラブルシステム”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 6, No. 3, pp. 19–30, 2004.
- [4] M. Miyamae, T. Terada, M. Tsukamoto and S. Nishio: “An event-driven wearable system for supporting motorbike racing teams,” Proc. 8th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC’04), pp. 70–76, 2004.
- [5] R. Azuma: “A survey of augmented reality,” Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [6] M. Kanbara, T. Okuma, H. Takemura and N. Yokoya: “A stereoscopic video see-through augmented reality system based on real-time vision-based registration,” Proc. IEEE Int. Conf. on Virtual Reality 2000, pp. 255–262, 2000.
- [7] R. Tenmoku, Y. Nakazato, A. Anabuki, M. Kanbara and N. Yokoya: “Nara palace site navigator: Device-independent human navigation using a networked shared database,” Proc.10th Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2004), pp. 1234–1242, 2004.
- [8] 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.
- [9] P. Daehne and J. 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.
- [10] 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.
- [11] M. Kouroggi 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.
- [12] 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.
- [13] “INTERSENSE IS-600 Mark2,” <http://www.isense.com/products/prec/is600/>.
- [14] “無線 LAN 位置検知システム「日立 AirLocation(TM)」”, <http://www.hitachi.co.jp/Prod/vims/solutions/ssup/airlocation/>.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 神原誠之, 横矢直和: “複数の赤外線受光体を利用した位置姿勢センサの試作”, 2004年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No.A-16-7, 2004.

- [18] M. Maeda, T. Ogawa, K. Kiyokawa and H. Takemura: “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.
- [19] 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.
- [20] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. D. Bondi, M. Morris and W. Piekarski: “Arquake: An outdoor/indoor augmented reality first person application,” Proc. 4th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC2000), pp. 139–146, 2000.
- [21] 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.
- [22] G. Baratoff, A. Neubeck and H. Regenbrecht: “Interactive multi-marker calibration for augmented reality applications,” Proc. 1st IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002), pp. 107–116, 2002.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: “再帰性反射マーカと赤外線カメラを用いたユーザの位置姿勢同定”, 電子情報通信学会 技術研究報告, IE2004-24, pp. 25–28, 2004.
- [27] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: “不可視マーカを用いたウェアラブル AR システムの実環境における実証実験”, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2004-135, pp. 7–12, 2004.
- [28] Y. Nakazato, M. Kanbara and N. Yokoya: “Discreet markers for user localization,” Proc. 8th IEEE Int. Symp. on Wearable Computers (ISWC’04), pp. 177–173, 2004.
- [29] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi: “Visuo-haptic display using head-mounted projector,” Proc. IEEE Int. Conf. on Virtual Reality 2000, pp. 233–240, 2000.
- [30] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi: “Optical camouflage using retro-reflective projection technology,” Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 03), pp. 348–349, 2003.