

# 不可視マーカを用いた位置・姿勢推定システムの構築および評価

中里 祐介<sup>†</sup> 神原 誠之<sup>†</sup> 横矢 直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{yuusu-n,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

**あらまし** ウェアラブルコンピュータを用いた拡張現実感 (AR) ではユーザの位置・姿勢を正確に計測する必要がある。そこで我々は再帰性反射材からなる不可視マーカ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画像マーカを環境中に設置し、ユーザの位置・姿勢を推定する手法を提案している。このような手法で精度良くユーザの位置・姿勢を推定するためには、あらかじめ位置を計測した画像マーカを環境中に多数配置する必要がある。しかしながら、実際に広範囲においてマーカを多数設置し、その位置を精度良く計測するには多大な労力を要する。そこで本研究では、あらかじめ不可視マーカが密に印刷された壁紙を利用し、位置・姿勢推定可能な環境を構築することにより、ユーザの位置・姿勢を推定するシステムを提案する。また、提案システムの実証実験として解像度の異なる 2 種類の赤外線カメラを用いて、それぞれの精度を評価する。

**キーワード** 不可視マーカ, 位置・姿勢推定, 拡張現実感, ウェアラブルコンピュータ

## Evaluation of Localization System Using Invisible Visual Markers

Yusuke NAKAZATO<sup>†</sup>, Masayuki KANBARA<sup>†</sup>, and Naokazu YOKOYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192, Japan

E-mail: †{yuusu-n,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

**Abstract** It is necessary to precisely measure position and orientation of a user in order to realize an augmented reality (AR) system with a wearable computer. We have proposed a method of measurement user's position and orientation for wearable AR without undesirable visual effects in indoor environments. The method can estimate the user's position and orientation by recognizing invisible visual markers pasted up on the ceilings or walls using an infrared camera. To realize this method, exact 3D position information of visual markers is required in advance. However, much cost is necessary to set up and calibrate the markers on the ceiling in a wide environment. In this paper, we propose a localization system which can estimate the user's position and orientation with high accuracy by using marshaled invisible visual markers printed on wallpapers. In an experiment, the accuracy of two types infrared cameras' position and orientation is evaluated.

**Key words** invisible visual marker, localization, augmented reality, wearable computer

### 1. はじめに

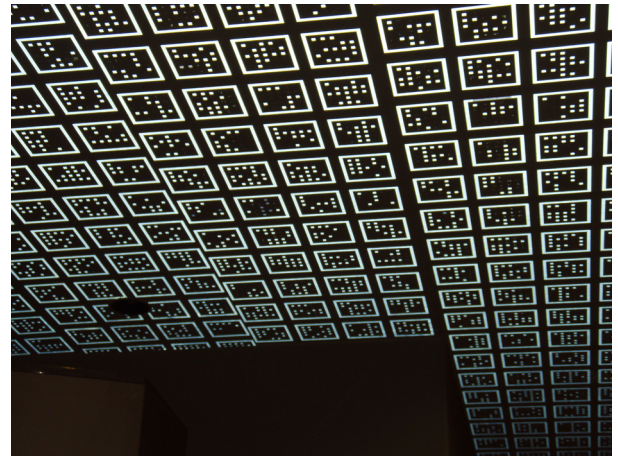
近年、携帯電話をはじめとして計算機の小型化、高性能化、省電力化がめざましく、ウェアラブルコンピュータが現実の物となってきた。それを受けて、ウェアラブルコンピュータやモバイル端末を用いた拡張現実感 (Augmented Reality:AR) に関する研究が盛んに行われている [1], [2]。ユーザのいる場所に合った情報を直感的に提示可能なウェアラブル拡張現実感システムでは、現実世界と仮想世界の座標系の位置合せを行うために、

ユーザの正確な位置・姿勢情報が必要となる。従来、屋外においては、広範囲で位置計測を行うことが可能な GPS とジャイロセンサの組み合わせが多く利用されている [3], [4]。一方屋内では、GPS が利用できないため、さまざまな位置推定手法が提案されている [5], [6]。

その中の一つとして、実環境に位置・形状・色が既知の画像マーカを多数配置し、それらをユーザの視点付近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 [7]~[10]。特に我々は再帰性反射材からなる



(a) フラッシュ無しで撮影



(b) フラッシュ有りで撮影

図1 天井に設置した不可視マーカ壁紙

不可視マーカを利用することにより、景観を損ねることなく屋内の広範囲に多数の画像マーカを設置し、ユーザの位置・姿勢を推定する手法を提案している [11]. このような手法はインフラに電源が不要で、計算量が少なく実時間でユーザの正確な位置・姿勢を推定することが可能である. しかし、位置・姿勢推定のためには、あらかじめ設置した画像マーカの正確な三次元位置を計測する必要がある. そのため、広い範囲で利用しようとすればするほど、画像マーカの設置や三次元位置の計測のために多大な労力を必要とする.

そこでマーカを撮影した画像を用いてマーカの位置を計測する手法 [12], [13] が提案されており、我々も高解像度なデジタルカメラで撮影した画像からオフラインで精度良くマーカの位置をキャリブレーションするシステムを提案している [14].

そこで本研究では、あらかじめ不可視マーカが印刷された壁紙を環境中の天井などに設置し、精度良くユーザの位置・姿勢を推定するシステムを提案する. 不可視マーカが印刷された壁紙を利用することにより多数のマーカを密に設置することが可能となり、精度良くユーザの位置・姿勢を計測することが可能となる. また、マーカの大きさや間隔などの壁紙の設計情報を利用することでマーカの位置計測の負荷を軽減する.

以下、2章では、本研究で提案する不可視マーカを用いた位置・姿勢推定システムについて詳述する. 3章では提案システムの位置・姿勢推定計測精度を評価するために行った実験について述べる. 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・姿勢推定システム

### 2.1 不可視マーカ壁紙

図1に天井に設置した不可視マーカが印刷された壁紙の様子を示す. 本研究では環境中に設置するマーカとして、半透明の再帰性反射材からなる不可視マーカを壁紙に印刷して利用する. マーカには ARToolKit [15] などに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、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



図2 不可視マーカを用いた位置・姿勢推定システム

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つだけに常に点を配置し、残り3つには点を配置しない. このビットコードには 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IDの誤認識に対応する. 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をマーカに割り当てることができる.

今回試作した不可視マーカ壁紙では、約80cm四方に16cm四方のマーカを16個配置し、そのパターンには格子行数  $N = 5$ , CRCチェックビット数  $C = 3$  でランダムにID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10000 $m^2$ 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.

### 2.2 カメラ位置・姿勢推定

本システムでは、図2に示すように、天井などに配置した位置が既知の不可視マーカをユーザが装着した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. 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は高輝度で撮影することができる. 以下では図3に示すカメラ位置・姿勢推定処理の詳細に

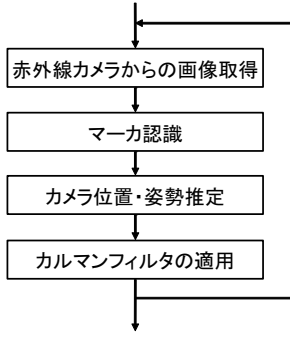


図3 カメラ位置・姿勢推定処理の流れ

ついて述べる。

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からIDを認識する。ここでは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う。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、認識した全マーカの特徴点の再投影誤差(特徴点の画像上での座標と特徴点の三次元座標を画像上に投影した座標との距離の二乗誤差)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、すなわちカメラの位置・姿勢を推定する。ここでは出口らの手法[16]を利用し、線型最小自乗法によってカメラパラメータの初期値を算出した後、Levenberg-Marquardt法[17]にて非線型最適化を行うことにより変換行列を推定する。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できれば、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[18]の一種であるSRCDKF(Square Root Central Difference Kalman filter)[19]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。本システムでは状態ベクトル $\mathbf{x}_k$ を式(1)のように定義し、状態方程式(式(2))には速度一定の運動モデルを適用する。

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_k \\ \mathbf{R}_k \\ \mathbf{P}'_k \\ \mathbf{R}'_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_k \\ \mathbf{R}_k \\ \mathbf{P}'_k \\ \mathbf{R}'_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{P}'_k \\ \mathbf{R}'_k \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_k + \mathbf{V}_k t \\ \mathbf{V}_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{P}_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ ,  $\mathbf{R}_k = [r_{xk}, r_{yk}, r_{zk}]^T$ はそれぞれカメラ位置、姿勢を表し、 $\mathbf{P}'_k = [x'_k, y'_k, z'_k]^T$ ,  $\mathbf{R}'_k = [r'_{xk}, r'_{yk}, r'_{zk}]^T$ は位置、姿勢に関する速度を表す。また、 $t$ は前回の位置計測時刻と現在の位置計測時刻との差分、 $\mathbf{M}_k = [m_{xk}, m_{yk}, m_{zk}, m_{r_{xk}}, m_{r_{yk}}, m_{r_{zk}}]^T$ ,  $\mathbf{V}_k = [v_{xk}, v_{yk}, v_{zk}, v_{r_{xk}}, v_{r_{yk}}, v_{r_{zk}}]^T$ は位置・姿勢に関する

表1 赤外線カメラの仕様

	赤外線カメラ A	赤外線カメラ B
外形寸法 [mm]	75 × 55 × 47	65 × 60 × 20
本体重量 [g]	115	20
解像度 [画素]	1024 × 768	640 × 480
水平画角 [度]	110	70
画像更新速度 [fps]	29.12	30
撮像素子	CCD	CMOS
LED 数	12	6
インタフェース	USB2.0 (×2)	USB2.0



(a) 赤外線カメラ A



(b) 赤外線カメラ B

図4 赤外線カメラ

る外乱、位置・姿勢の速度に関する外乱をそれぞれ表す。また、観測ベクトル $\mathbf{y}_k$ は推定した位置・姿勢に対応する6次元ベクトル(式(3))、観測モデルは位置・姿勢に外乱 $\mathbf{N}_k = [n_{xk}, n_{yk}, n_{zk}, n_{r_{xk}}, n_{r_{yk}}, n_{r_{zk}}]^T$ が加わったモデル(式(4))とする。

$$\mathbf{y}_k = [y_{xk}, y_{yk}, y_{zk}, y_{r_{xk}}, y_{r_{yk}}, y_{r_{zk}}] \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{y}_k + \mathbf{N}_k \quad (4)$$

### 3. 実験

#### 3.1 位置・姿勢計測精度の評価

本システムの精度を評価するため、2種類の赤外線カメラを利用して位置・姿勢推定を行った。実験に使用した赤外線カメラの仕様を表1に、その外観を図4に示す。赤外線カメラAは寸法は大きい画角が広く解像度の高いカメラ、Bは解像度は低い寸法が小さいカメラである。なお、カメラAにはビデオシースルー型ARシステムなどで利用するための前方撮影用カメラも付いているが、本実験では使用しない。また、コンピュータにはlenovo製ThinkPad X60 (CPU: Intel Core2Duo T7200, メモリ: 2GB)を使用した。

本実験では、カメラ位置・姿勢の真値を得るため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の手法[20]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(TOPCON GPT-9005A)を用いて計測した。マーカは約4cm間隔で1列4個ずつマーカが配置された壁紙を3枚組み合わせ、約1.7m

表 2 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 (カメラ A)

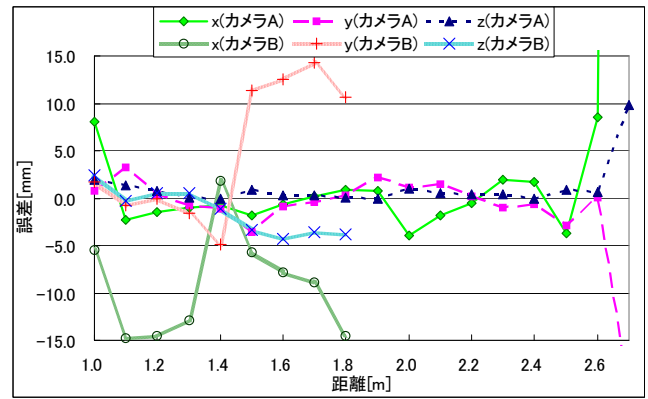
距離 [m]	位置 [mm]		姿勢 [°]		平均認識 マーカ数
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
1.0	8.8	3.1	0.69	0.17	22
1.1	4.3	1.0	0.18	0.07	32
1.2	2.2	1.0	0.09	0.04	39
1.3	2.3	0.8	0.14	0.04	42
1.4	2.3	1.0	0.20	0.05	49
1.5	4.4	1.1	0.17	0.04	56
1.6	1.9	0.8	0.13	0.03	60
1.7	1.8	1.0	0.08	0.03	66
1.8	1.1	0.9	0.05	0.02	69
1.9	2.6	1.2	0.13	0.04	71
2.0	4.4	1.5	0.20	0.02	71
2.1	2.6	0.6	0.16	0.03	70
2.2	2.0	0.5	0.09	0.03	66
2.3	2.6	1.4	0.13	0.03	56
2.4	3.5	1.8	0.12	0.04	39
2.5	10.1	5.0	0.23	0.11	15
2.6	37.8	18.4	0.81	0.38	4
2.7	466.8	305.5	9.76	6.38	2

表 3 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 (カメラ B)

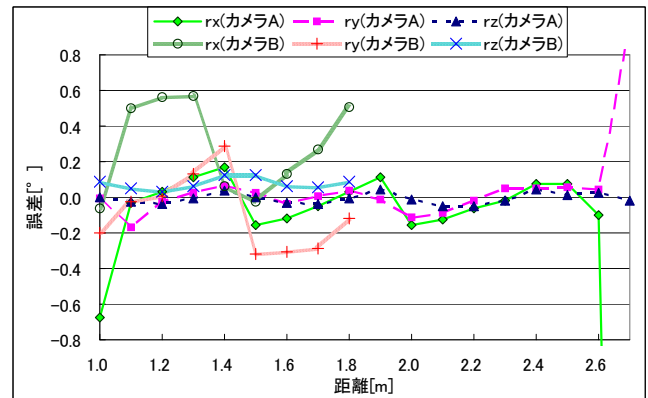
距離 [m]	位置 [mm]		姿勢 [°]		平均認識 マーカ数
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
1.0	6.2	0.2	0.23	0.01	13
1.1	14.8	0.9	0.51	0.05	18
1.2	14.6	1.2	0.57	0.05	22
1.3	13.1	0.8	0.59	0.03	23
1.4	5.9	2.4	0.33	0.14	26
1.5	13.2	2.0	0.35	0.08	35
1.6	15.4	1.0	0.34	0.03	43
1.7	17.2	2.2	0.40	0.09	46
1.8	18.5	1.0	0.53	0.01	50

× 2.4m 四方の範囲に縦 7, 横 12 個の格子状にマーカを配置した。各マーカの大きさは 16cm, マーカの内部パターンは 5 × 5 の格子状の点から構成される。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 A に関しては 10 回、カメラ B は 3 回の試行を行った。なお、本実験ではカルマンフィルタは適用していない。表 2,3 にカメラ A,B 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分散を、その変化の様子を図 5 に示す。また、図 6 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。これらの結果において、 $x, y$  平面がマーカ面に一致し、 $z$  がマーカ面に対して垂直な軸である。また、 $r_x, r_y, r_z$  がそれぞれ  $x, y, z$  軸に対する回転角度である。

表 2,3 より、カメラ A はマーカ面からカメラまでの距離が 1.1m から 2.4m, カメラ B では 1.0m から 1.8m の間でそれぞ



(a) 位置誤差の変化



(b) 姿勢誤差の変化

図 5 カメラとマーカ面との距離を変化させたときの位置・姿勢の誤差の様子

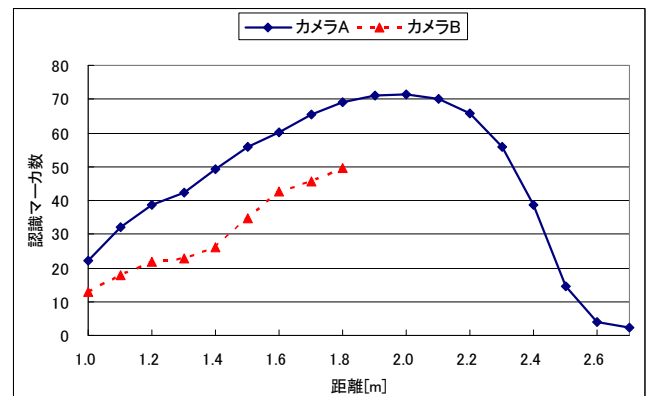


図 6 カメラとマーカ面との距離を変化させたときの認識マーカ数の様子

れ良好に位置推定が可能であることが確認できた。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 ~ 1.5m) で位置・姿勢が推定できている。

図 6 を見て分かる通り、カメラとマーカ面が近い場合は個々

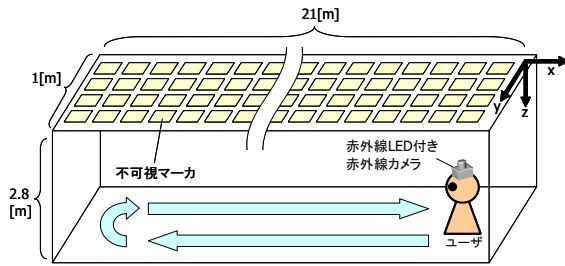


図7 ユーザ位置・姿勢推定実験の環境

のマークが大きく撮影されるため、認識マーク数が少ない。逆にカメラとマーク面が離れるとマークパターンが潰れてしまうため、かつ赤外線 LED からマークに入る赤外光が少なくなるために、認識マーク数が少なくなる。特にカメラ B は小型化した反面、赤外線 LED の輝度が低いため、カメラからマーク面までの距離が 1.8m を超えるとマークが認識できなかった。

カメラ A に関しては、マークが 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・姿勢が推定できた。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。カメラ B は解像度が 640×480 とカメラ A よりも解像度が低いため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。

### 3.2 ユーザ位置・姿勢推定実験

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、環境中の天井に不可視マーク壁紙を設置し、実験を行った。本実験では 101 × 4 個のマークが印刷された壁紙を 21m × 1m の本学廊下の天井に設置し、マークの三次元位置には壁紙の設計情報(マークの配置位置, 大きさ)を利用した。ユーザは解像度の高い赤外線カメラ A を頭部に装着し、図 7 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タ(外乱の分散等)は AR 画像を生成した際にジッターが起こらないように経験的に決定した。また、計算機には lenovo 製 ThinkPad X60 (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 8 に示す。これらの図において、 $x, y, z$  がカルマンフィルタを適用しない場合の推定されたユーザ位置、 $x', y', z'$  がカルマンフィルタを適用した場合のユーザ位置である。同様に  $r_x, r_y, r_z$  がカルマンフィルタを適用しない場合の各軸に対するユーザの姿勢であり、 $r'_x, r'_y, r'_z$  がカルマンフィルタを適用した場合のユーザ姿勢である。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・姿勢が確認できる。カルマンフィルタを適用した結果に関しては、滑らかさを重視したパラメタを用いたため、動きの大きな箇所では 1,2 フレーム程度の遅延が見られる。特にそのような箇所では速度一定の運動モデルから外れている場合が多く、その解決のためにより人の動きのモデルに近い加速度一定のモデルを用いることが考えられる。また、このときの位置・姿勢推定のフ

レームレートは約 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。

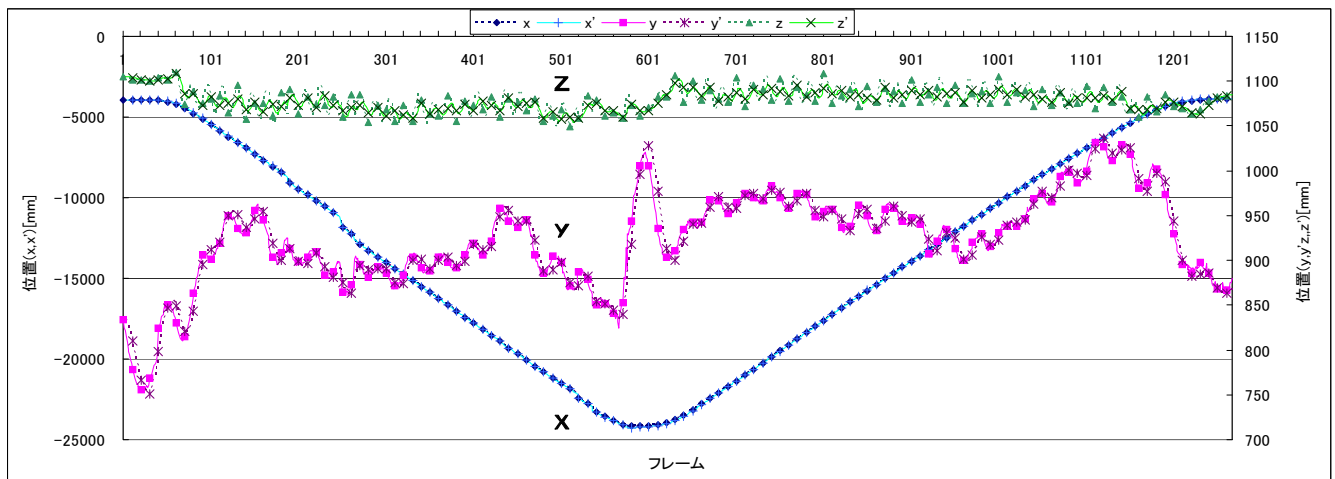
## 4. まとめ

本稿では、不可視マークが印刷された壁紙を用いて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提案し、その精度を評価した。不可視マークが印刷された壁紙を利用することにより、景観を損ねることなく多数のマークを密に設置することができ、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。実験では解像度の高い赤外線カメラ A と小型の赤外線カメラ B に関してそれぞれ評価を行い、A に関してはマーク面とカメラ間の距離が 1.1m から 2.4m の間で位置に関して約 5mm、姿勢に関して約 0.2° の誤差で計測が可能だった。カメラ B に関しては 1.0m から 1.8m の間で位置 15mm、姿勢 0.5° 程度の誤差で計測が可能であることを確認した。また、実際の環境における実験でも、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、不可視マーク壁紙のキャリブレーションツールの作成や、より広範囲な環境での実証実験などが挙げられる。

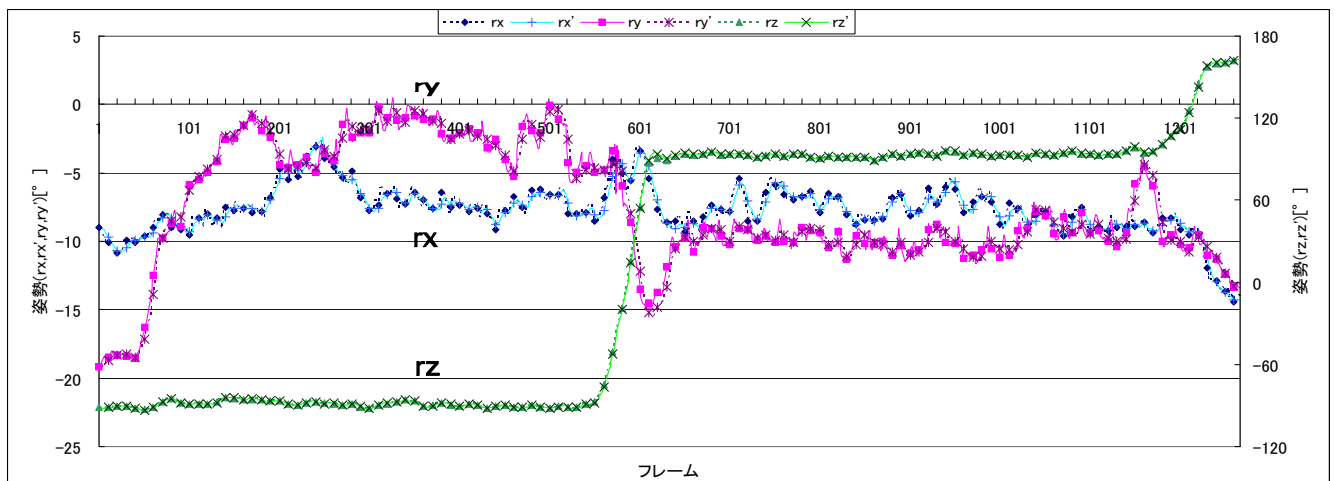
**謝辞** 本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)「ネットワークを介して人間の日常活動と情報・体験共有を支援する複合現実情報環境」プログラムの支援による。

## 文 献

- [1] A. Henrysson, M. Billinghurst and M. Ollila: "Face to face collaborative AR on mobile phones," Proc. 4th IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 05), pp. 80–89, 2005.
- [2] J. Platonov, H. Heibel, P. Meier and B. Grollmann: "A mobile markerless AR system for maintenance and repair," Proc. 5th IEEE/ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 06), pp. 105–108, 2006.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: "PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤", インターネットコンファレンス 2006, pp. 95–104, 2006.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.



(a) ユーザ位置推定結果



(b) ユーザ姿勢推定結果

図 8 ユーザ位置・姿勢推定結果

- [10] G. Thomas: "Mixed reality techniques for TV and their application for on-set/pre-visualisation in film production," Proc. Int. Workshop on Mixed Reality Technology for Film-making, pp. 31-36, 2006.
- [11] 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.
- [12] G. Barattoff, 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.
- [13] 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, pp. 77-82, 2004.
- [14] Y. Nakazato, M. Kanbara and N. Yokoya: "An initialization tool for installing visual markers in wearable augmented reality," Proc. 16th Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2006), pp. 228-238, 2006.
- [15] H. Kato and M. 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.
- [16] 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.
- [17] J. J. Moré: "The levenberg-marquardt algorithm: Implementation and theory," Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics 630, Springer Verlag, pp. 105-116, 1978.
- [18] G. Welch and G. Bishop: "An introduction to the kalman filter," SIGGRAPH 2001 Course 8, 2001.
- [19] 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.
- [20] 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.