

モバイルプロジェクタカメラを用いた 投影面の傾斜に応じた視覚情報提示

Visual Information Display Responding to the Projection Surface Orientation with a Mobile Projector-Camera System

○今井博之*, 鏡慎吾**, 橋本浩一**

○Hiroyuki Imai*, Shingo Kagami**, Koichi Hashimoto**

* 東北大学工学部

** 東北大学大学院情報科学研究科

*School of Engineering, Tohoku University

**Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード: プロジェクタカメラ系 (projector-camera systems), モバイルプロジェクタ (mobile projector), 加速度センサ (accelerometer), 三次元計測 (3D-measurement)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻 橋本・荒井研究室 / 鏡研究室 今井博之,

Tel.: (022)795-7020, Fax.: (022)795-7020, E-mail: hiroyuki@ic.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年, プロジェクタは技術革新により, 小型化, 省電力化, 高輝度化が進み, 設置して用いる従来の方法に加えて, モバイルデバイスとしての現実味を帯びてきた. これに伴い, モバイルプロジェクタの利用を主眼に置いた研究が活発に進められている. プロジェクタはカメラとあわせることで, ステレオカメラと同様に三次元計測を行うことが可能である. 従って, これらをあわせたモバイルプロジェクタカメラは, 持ち運び, 三次元計測, 投影表示が可能なデバイスとして注目されている.

モバイルプロジェクタカメラを用いると, 投影対象を任意の位置から三次元計測することができ, これに基づいた何らかの視覚情報を提示

することが可能である. ここで, 任意の位置から投影対象を三次元計測する際に得られる情報は, プロジェクタカメラと投影対象の相対的な位置姿勢であることに注意する. 言い換えると, ワールド座標系でのプロジェクタカメラや投影対象の位置姿勢は未知である. 従って, ワールド座標系での位置や方向を加味した視覚情報の提示を実現することはできない. 例えば, 投影対象平面の傾斜が急峻になるにつれてより赤い色を投影することなどは不可能である.

本研究では, ワールド座標系とカメラ座標系の関係の一部を加速度センサを用いて決定することを考える. モバイルプロジェクタカメラに加速度センサを設置することで, カメラ座標系でのワールド座標系の重力方向が既知となる.

これにより、投影対象の相対的な位置姿勢に加えて、重力方向を加味した視覚情報の提示が可能となる。今回は投影対象を任意の曲面ではなく平面と仮定して、投影面の傾斜に応じた視覚情報を提示することを目標とする。これにより、先に述べた例のような視覚情報の投影表示が可能となる。

関連研究としては Raskar らの RFIG Lamps¹⁾ が挙げられる。Raskar らは、プロジェクタカメラと傾斜センサを用いて、プロジェクタを動かしても投影像の形や大きさが不変でかつ投影像の水平が保たれるシステムを開発した。Raskar らのシステムは、投影面として鉛直面を想定している。これに対し本論文の提案システムは、任意の姿勢の平面を想定している。また、Raskar らのシステムはコンピュータの GUI 画面を投影することによるユーザインタフェースの提供を目的としているのに対し、提案システムは投影面の傾斜に応じた視覚情報の提示を目的としている。

2. 原理

本稿で提案するシステムでは、投影面の法線と重力ベクトルのなす角を求めることで、地面に対する投影面の傾斜を求める。投影面の法線ベクトルを求めるにあたり、まず面上に二つの一次独立なベクトルを作ることを考える。これには全てが一直線上にない面上の三点の三次元座標が必要である。提案システムでは、プロジェクタから面上に白色の長方形を投影し、カメラでその頂点を三つ検出する。その後、ステレオ法を用いて各点の三次元座標を求め、所望の二つのベクトルを得た後、これらの外積を計算することでこの面の法線ベクトルを得る。最後にこれと重力方向ベクトルのなす角を求め、投影面の傾斜を得る。

ステレオ法を用いる際、プロジェクタとカメラの位置関係、すなわち並進と回転が既知であ

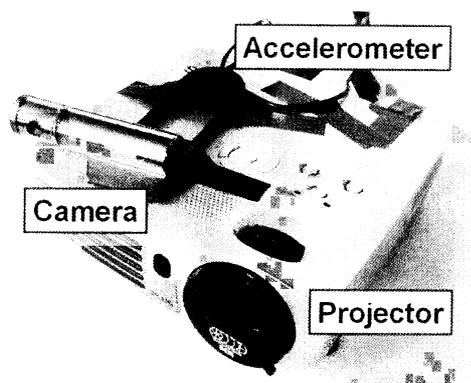


Fig. 1 システムの構成

る必要がある。また、プロジェクタとカメラの内部パラメータも必要である。したがって、プロジェクタとカメラにはあらかじめキャリブレーションを施し、これらのパラメータを取得しておく。

3. システムの構成

本実験では、プロジェクタとして加賀コンポネント社製 PLUS V-339 を用いた。パネル画素数は 1024×768 pixels である。カメラとしては、BUFFALO 社製 BSW20K04 を用いた。30 fps で動作させた場合の有効画素数は 640×480 pixels である。加速度センサとしては、ATR-Promotions 社製 WAA006 を用いた。加速度の最大計測範囲は ± 2 G と ± 4 G で選択可能であり、本実験ではこれを ± 2 G として使用した。

Fig. 1 は、以上で述べたプロジェクタ、カメラ、加速度センサの構成を示したものである。実験を行う際は、運動加速度の影響を排除して重力加速度のみを考慮するため、装置を三脚に固定した。また、プロジェクタの排熱機の振動による加速度センサへの影響を低減するため、プロジェクタと加速度の間には約 $40 \times 150 \times \text{mm}^3$ の気泡緩衝材を折り畳んではさんだ。プロジェクタカメラのキャリブレーションには、Audet らの ProCamCalib²⁾ を用いた。キャリブレーションの精度を示す再投影誤差は 0.78 pixels であった。

4. 実験

4.1 平面の傾斜計測精度評価実験

提案システムを用いた傾斜角度計測結果の精度を調べるため、実験を行った。以下に実験に用いた機材、実験の手順、結果と考察を述べる。

4.1.1 機材

実験機材として、プロジェクタカメラ及び加速度センサから成る提案システムの他に、ホワイトボード、三脚、水平器及び分度器を用いた。水平器は水平の基準を求めるために、分度器はホワイトボードの角度を測るために用いた。実験中は、ホワイトボード表面の鏡面反射による影響を低減するため、白紙を固定した。また、運動加速度の影響を排除して重力加速度のみを考慮するため、装置を三脚に固定した。

4.1.2 手順

実験の手順を以下に示す。平面の角度を示す度数は、地面と平行のとき 90° で、真上を向いたときに 0° 、真下を向いたときに 180° である。

- (i) ホワイトボードの角度を 90° に設定する。
- (ii) 提案システムのプロジェクタカメラをランダムな位置に固定する。
- (iii) 固定した位置から 50 回計測する。

(ii), (iii) を計 5 回繰り返すことで、合計 250 回の計測値が得られる。これを、ホワイトボードの角度が 70° 、 110° のときについても同様に行うことで、合計 750 回の計測値が得られる。

4.1.3 結果と考察

Table 1 に結果を示す。ホワイトボードの角度が 70° 、 110° のときは 90° のときに比べて精度が劣ることがわかる。プロジェクタから像を投

影したとき、焦点面から外れた部分は像がぼけ、カメラから頂点を検出する精度が落ちる。ホワイトボードの角度が 70° 、 110° のときは 90° のときに比べてこのぼけが起こりやすく、点の検出精度が落ち、角度の測定精度が落ちたものと考えられる。また、ホワイトボードの角度がどの場合でも約 2° の標準偏差を持つ。この原因としては、第一に、プロジェクタの排熱機の振動により、加速度センサが重力方向を正確に取得できていないことが考えられる。第二に、プロジェクタから投影した長方形の四頂点をカメラから検出する際に、サブピクセル精度での検出を行っていないことによる量子化誤差の影響が考えられる。

Table 1 平面の傾斜計測精度評価実験結果

Angle (ground truth) [deg]	Angle measurements	
	μ [deg]	σ [deg]
70	68.99	2.21
90	89.40	1.87
110	107.93	2.52

4.2 排熱機の振動が傾斜測定結果に与える影響の評価実験

プロジェクタの排熱機の振動による加速度センサの振動が平面の傾斜の計測値の標準偏差に与える影響を評価するため、実験を行った。以下に実験方法、結果と考察を述べる。

4.2.1 実験方法

次の三種類の条件のもとで、三脚に固定したプロジェクタから鉛直面をそれぞれ 50 回計測し、合計 150 回の計測値を得る。

- (i) 加速度センサとプロジェクタカメラの間の気泡緩衝材を取り外す。

(ii) 加速度センサとプロジェクタカメラの間に気泡緩衝材を取り付ける。

(iii) プロジェクタカメラから加速度センサを取り外し、加速度センサをできるだけ振動の少ない面に安置する。

(iii) において、加速度センサの姿勢とプロジェクタカメラの姿勢とが無関係であるため、計測した面の傾斜と真値との差は意味を持たないことに注意が必要である。

4.2.2 結果と考察

結果を Table 2 に示す。プロジェクタカメラと加速度センサを直接貼りつけた場合に比べ、気泡緩衝材をはさんだ場合の方が標準偏差の値が小さいことがわかる。また、プロジェクタカメラから加速度センサを取り外した場合では、気泡緩衝材をはさんで貼りつけた場合に比べて、標準偏差が小さいことがわかる。以上より、Table 1 で認められた約 2 deg の標準偏差の約 85 % は、プロジェクタカメラの排熱機の振動が原因であることが確かめられた。なお、(ii) の手法は、前述の精度検証実験の条件と同等であるため、標準偏差の値は 2 deg 程度になるはずであるが、Table 2 では 1.1 deg となっている。これは実験に用いた気泡緩衝材が異なるためと考えられる。

Table 2 排熱機の振動が傾斜測定結果に与える影響の評価実験結果

Method	σ [deg]
(i) attached without bubble wrap	2.74
(ii) attached with bubble wrap	1.14
(iii) not attached	0.35

5. アプリケーション例

5.1 平面の傾斜表示

提案システムを用いた例として、平面の傾斜を表示するアプリケーションを開発した。Fig. 2 に動作の様子を示す。このアプリケーションでは、プロジェクタから表示する長方形の内部に数字を表示している。カメラ画像上から投影された長方形の四頂点の点を検出する際、数字の一部など、長方形の頂点以外の点を検出すると装置が正常に動作しない。このため、あるフレームの頂点探索は、前フレームに検出した頂点に中心を持つ 40×40 pixels の矩形領域内でのみ行っている。初期処理として、操作者はプログラムが長方形の頂点を正確に検出していることを判断しなければならない。



Fig. 2 平面の傾斜を表示するアプリケーション

5.2 平面の最大傾斜方向表示

提案システムを用いた例として、平面の最大傾斜方向を矢印で表示するアプリケーションを開発した。Fig. 3 に動作の様子を示す。投影対象平面を π_A 、平面の法線ベクトルと重力ベクトルの張る平面を π_B とする。本アプリケーションでは、 π_A と π_B の交線が最大傾斜方向に等しいことを用いている。また、長方形の頂点を取

得するときの探索範囲と初期処理は、平面の傾斜を表示するアプリケーションと同様のものを用いている。

将来的には、平面の姿勢のみでなく、曲面の形状を三次元計測することにより、曲面の多数の点の最大傾斜方向を矢印や色を用いて表示できるようにになると考えられる。

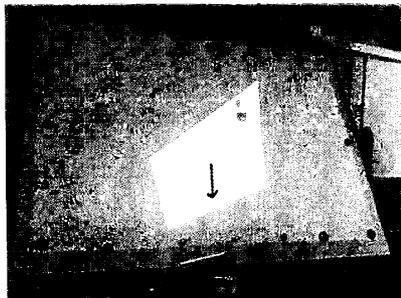


Fig. 3 平面の最大傾斜方向を表示するアプリケーション

6. 結言

本稿では、モバイルプロジェクタカメラと加速度センサを用いて、平面の傾斜に応じた視覚情報を提示するシステムを提案した。またその原理を説明し、実験について述べた後、提案システムを用いたアプリケーションを二例紹介した。

プロジェクタの排熱機の振動により計測値の標準偏差が大きくなる問題については、加速度情報の高周波成分を取り除くことで改善できると考えられる。現在はプロジェクタカメラと加速度センサの接合部に気泡緩衝材を挿入しており、これを物理的なローパスフィルタとして機能させている。しかし実験の結果、これが排熱機の振動を取り除くのに不十分であることが判明したので、気泡緩衝材の変更や、ソフトウェア的なローパスフィルタの導入が必要であると考えられる。また、市販のモバイルプロジェクタでは送風型の排熱機を用いない製品が多くなってきており、振動の問題は起きにくくなっている。

プロジェクタから投影した長方形の頂点をカメラから検出する際の量子化誤差については、

サブピクセル精度での検出が可能な手法を用いることにより、この影響を低減することができると考えられる。

提案システムは無地の平面を対象としており、テクスチャのある平面には適用できない。これはテクスチャのある平面に比べ、無地の平面の方がプロジェクタから投影した長方形の頂点を検出するのが容易なためである。プロジェクタから投影する図形を工夫したり、点の検出方法を変更することで、模様のある平面を対象とすることも可能になると考えられる。

現段階では、平面の傾斜に即した情報提示を行うシステムに留まっている。今後は、これを拡張して平面ではなく任意の曲面の形状に即した情報提示を行うシステムを開発することで、より有益なアプリケーションの実現が期待される。

また、現段階ではワールド座標系の特定方向にあたる重力方向を加速度センサにより既知とした状態である。しかし、カメラから取得した映像などを用いてプロジェクタカメラの自己位置姿勢をワールド座標系で推定することで、ワールド座標系における位置姿勢を全て既知とすることが理論上可能である。これにより、さらに高度な視覚情報提示の実現が期待される。

参考文献

- 1) R. Raskar, P. Beardsley, J. Van Baar, Y. Wang, P. Dietz, J. Lee, D. Leigh and T. Willwacher: RFIG lamps: interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, ACM Trans. Graph., 23, 406/415 (2004)
- 2) S. Audet and M. Okutomi: A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems, in IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (2009)