



輝度勾配の投影による面型光センサの 3 次元位置計測

3D Position Measurement of Planar Photo Detectors Using Gradient Patterns

小寺達也¹⁾, 杉本麻樹¹⁾

Tatsuya Kodera and Maki Sugimoto

1) 慶應義塾大学 大学院 理工学研究科

(1) 2) 〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, 1) kodera@im-lab.net, 2) sugimoto@ics.keio.ac.jp)

概要: 本研究では複数プロジェクタキャリブレーションのための面型光センサの 3 次元位置計測手法を提案する. プロジェクタなどの画像提示装置を用いて, グレイコードや輝度勾配などを面型光センサに投影し, 面型光センサが取得した光の強さから, その 3 次元位置を推定し, 自動的なプロジェクタキャリブレーションを行う. このことにより, 投影する対象が既知の形状だけではなく未知の形状に対しても画像を提示することができるような空間型拡張現実感のシステムを実現する.

キーワード: 3 次元計測, 光センサ, Display-Based Computing

1. 背景

本研究では, 複数プロジェクタ環境における空間型拡張現実感:Spatial Augmented Reality (SAR) システムのための面型光センサの 3 次元位置計測の手法を提案する. SAR とは, 拡張現実感:Augmented Reality (AR) 技術の一つであり, 実環境に存在している物体に対して, プロジェクタ等を用いて拡張的な情報を付加するという拡張現実の一種である. たとえば, 代表的な研究として, Shader Lamps[1] のように, 静的な物体に対して, プロジェクタから画像を投影することによってよりリアルな質感を表現する研究などが挙げられる.

SAR を実現するためには, Display-Based Computing (DBC) という概念を用いた手法がある. DBC では, 出力装置である画像提示装置を用いて, 画像情報を現実世界に配置している機器に重畳して提示することにより目的を達成する. このことにより, 実世界への影響を与えながら対象との通信, 計測, 制御, また適切な視覚情報の提示を実現している. [2]

また, 複数のプロジェクタを用いることで, 遮蔽の問題やプロジェクタの投影範囲の制限をなくすることができる. [3]

本研究では複数のプロジェクタ環境での自動キャリブレーションを達成するために, 画像提示装置からの画像パターンを用いて, 面型光センサの 3 次元位置計測を行う.

2. 関連研究

SAR のためには, 画像を提示する装置と, 投影される物体との位置合わせが必要であり, これが正確でないと, 画像が歪んで見えたり, ずれてしまったりする.

DBC を基本とした SAR システムの代表的な例として, Lee らの行ったプロジェクタと光センサとを用いたシステム

[4] は, プロジェクタからグレイコードとよばれる特殊なパターン画像を光センサに照射し, その光情報から位置検出するというものがある.

このグレイコードを用いた手法は, その精度が画像の解像度の 1 画素分までであり, それより細かい位置検出が不可能である. プロジェクタの光はプロジェクタから離れるにつれて広がってしまうために, 1 画素の大きさがその分大きくなってしまい, 位置検出の精度が下がってしまう.

この位置検出の精度を上げる手法の一つとして, 面型光センサを用いた SAR の研究について述べる. Ross らが行った手法 [5] では, サブピクセル単位での面型光センサの位置検出が行われている. サブピクセルとは, 1 画素をさらに細かくした単位であるが, これを用いることでより正確なプロジェクタと物体との位置合わせが可能となり, 複数のプロジェクタ画像を正確にあわせることができる.

この手法では, 幅が 1 画素の白線を, プロジェクタから面型光センサの上に照射し, それを時間的に 1 画素ずつ動かしながら光センサの値を読み取ることで, その面型光センサの重心を求めるといった手法である.

しかし, この手法では面型光センサの 2 次元位置までしかわからず, 形状が変わらない既知のオブジェクトに対してしか SAR を実現することができない.

そこで, 本研究では輝度勾配を用いて面型光センサの 3 次元位置検出をする手法を提案する.

3. デバイス

3.1 システム構成

図 1 に本研究のシステム構成を示す. 一般的なコンピュータ, 光検出器, そして画像提示装置としてプロジェクタを用

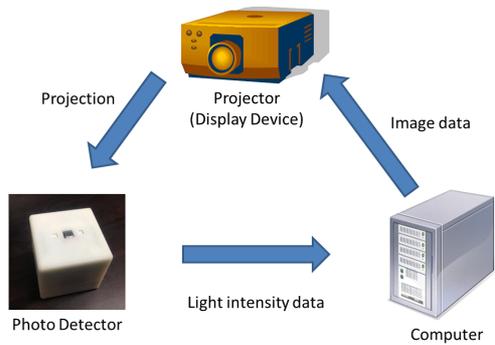


図 1: システム構成

いたシステムで、光検出器がプロジェクタからの投影光を検出しその光の強さをコンピュータに送信する。

3.2 光検出器



図 2: Photo Detector

図 3: Planar Photo Diode

図 2 に光検出器を示す。面型の光センサと電子回路を 3D プリンタで作ったケースに組み込んでいる。図 3 の赤枠内の銀色の部分が光を検出する面型光センサでありこの回路の出力電圧がここで受光する光の強さによって変わる。この部分の面積は $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ である。

4. 輝度勾配に対する面型光センサ受光特性

4.1 面型光センサの水平、垂直方向に対する受光特性

面型光センサの平面上に投影される輝度勾配に対する受光特性を考える。



図 4: 輝度勾配 (右向き)

図 5: 輝度勾配 (左向き)

図 4 は画像の右側の画素にいくほど輝度値が線形に上昇する輝度勾配画像である。同様に、図 5、図 6、図 7 もそれぞれ左側、下側、上側の画素にいくほど輝度値が線形に上昇する輝度勾配画像である。

図 4、図 6 の輝度勾配の画像の式は以下の式 (1) で表すこ



図 6: 輝度勾配 (下向き)

図 7: 輝度勾配 (上向き)

とができる。

$$\text{Output} = \text{Position} \quad (1)$$

”Position”は、1 に正規化した画像平面上の水平、垂直方向の位置、”Output”は、1 に正規化した輝度値である。今回は画像の水平方向の場合、左から右に向かう方向を正の方向、垂直方向の場合、上から下に向かう方向を正の方向とする。

同様に、図 5、図 7 の輝度勾配の画像の式は以下の式 (2) で表すことができる。

$$\text{Output} = (1 - \text{Position}) \quad (2)$$

面型光センサ上に輝度勾配を投影するとき、面型光センサは二次元平面なので、平面に対する光の強さの積分値を検出する。このとき、図 4、図 5 を投影したときの光の検出値の差分値と、図 6、図 7 を投影したときの光の検出値の差分値は、面型光センサの位置の関係は以下のような式 (3) で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{差分値} &= \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \{||x|| - (1 - ||x||)\} dx dy \\ &= \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} (2||x|| - 1) dx dy \\ &= S \times (2||x|| - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $||x||$ は輝度勾配画像の大きさと正規化された画像平面上の水平、あるいは垂直方向の位置である。面型光センサの垂直位置の範囲は、 y_1 から y_2 、水平位置の範囲は x_1 から x_2 とする。また、 S は面型光センサの面積である。

4.2 面型光センサの奥行に対する受光特性

ディスプレイデバイスとの距離によって、面型光センサの輝度勾配に対する受光特性がどう変わるかを考える。この距離が遠くなれば遠くなるほど、式 (3) での S 、輝度勾配画像に対する面積の割合が小さくなっていく。これをモデル化すると以下の式 (4) となる。

$$\text{差分値の変化率} \propto \frac{1}{\text{depth}^2} \quad (4)$$

ここで、 depth はディスプレイデバイスと面型光センサの距離である。このように、 depth によって受光面積が変わることによって、面型光センサの相対的な奥行を推定できる。

5. サブピクセル位置推定と奥行推定

面型光センサのサブピクセル位置の推定と、その奥行推定を輝度勾配を用いて行う。ここで、面型光センサの大きさは、1 画素よりも大きいとする。

5.1 処理手順

図 8 が面型光センサのサブピクセル位置の推定とその奥行推定の処理手順である。

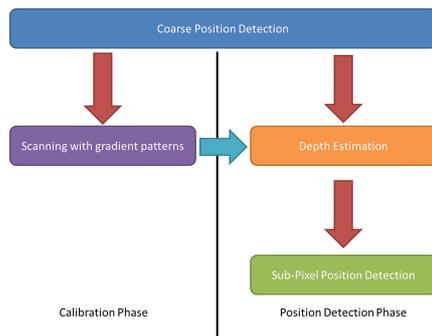


図 8: 処理手順

この手順は大きく二つの段階に分かれており、キャリブレーションする段階と位置検出の段階である。キャリブレーションの段階では、面型光センサの受光特性を得る。位置検出の段階ではキャリブレーションの段階で得られた受光特性をもとに、面型光センサの 3 次元位置を求める。

5.2 粗い位置検出

グレイコードパターンによって水平位置、垂直位置をもとめる。

5.3 キャリブレーション

面型光センサ上で、輝度勾配画像を 1 画素ごとに走査し、受光特性を得る。

図 9 が輝度勾配画像の走査の概要である。

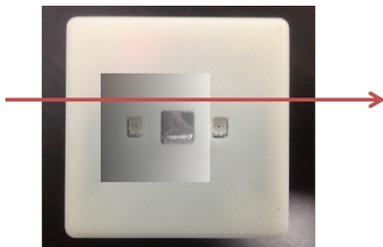


図 9: 輝度勾配画像の走査

図 4, 5 の輝度勾配を画像の水平方向に走査し、同様に、図 6, 7 の輝度勾配を画像の垂直方向に対して走査する。

このキャリブレーションの段階で得られた、受光したそれぞれの輝度勾配の差分値の輝度勾配の投影位置による変化率を最小二乗法によって求め、それを基準の傾き A とする。

5.4 奥行推定

面型光センサの奥行を推定する手法を提案する。式 (4) より、面型光センサとディスプレイデバイスとの距離によって、差分値の変化の割合が変わる。基準の傾き A を使うと、面型光センサの奥行は以下の式 (5) で表すことができる。

$$depth = \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (5)$$

ここで、 B は、ある奥行にある面型光センサが受光した輝度勾配の差分値の輝度勾配の投影位置による変化率である。

B を求めるために、2 つの型の輝度勾配を 2 つの違った場所に投影する。まず、図 4 と図 5 の輝度勾配を面型光センサに投影しその時の光の強さを測定し、その差分値をとる。その後、そこからすこし水平方向にずらした位置に同様にこれら 2 つの輝度勾配を投影し、光の強さを測定し、その差分値をとる。これらの差分値から輝度勾配の投影位置による変化率 B_x を計算する。同様に、図 6 と図 7 を投影し、その後、そこから垂直方向に少しずらした位置に同様に輝度勾配を投影し、輝度勾配の投影位置による変化率 B_y を計算する。これらの変化率の平均を、 B とし、この B と式 (5) を使って、面型光センサの奥行を求める。

5.5 サブピクセル単位での位置検出

サブピクセル単位での位置検出は以下の式 (6) で求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{Sub-Pixel Position } x = x_{left} \\ -Valid\ Width * \frac{Intensity_{left}}{B_x} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Sub-Pixel Position } y = y_{down} \\ -Valid\ Height * \frac{Intensity_{left}}{B_y} \end{aligned} \quad (7)$$

x_{left} は最初に図 4 と図 5 を投影した水平画素位置、 y_{down} は最初に図 6 と図 7 を投影した垂直画素位置である。"Valid Width", "Valid Height" はそれぞれ、キャリブレーションの段階で走査した水平、垂直方向それぞれの画素数である。

6. 実験

6.1 実験環境

以下に示すのが実験環境である。

- プロジェクタの画像サイズ: 1280 × 800 pixels
- CPU: AMD Athlon(TM) II X4 640 Processor 3.00GHz
- メモリサイズ: 4GB
- OS: Windows 7
- Frame rate: 10FPS
- プロジェクタと面型光センサとの距離: 100cm ~ 160cm.
- 面型光センサ上の画像の画素幅: 1.3mm.
- 輝度勾配のサイズ: 32 × 32 pixels
- Valid width: 10 pixels
- Valid height: 10 pixels

6.2 静的な面型光センサの位置検出

6.2.1 実験方法

静的な面型光センサの位置を白線を 1 画素ずつ走査する手法と今回の輝度勾配を用いた手法とで検出し、それらの精度と平均検出時間を比較した。グレイコードによる面型光センサの粗い位置検出し、この位置を基準位置とし、白線あるいは輝度勾配の始点を基準位置から左から右に -5 画素

から+5画素の範囲で動かし位置検出を行った。同様に、垂直方向についても、基準位置から上から下に-5画素から+5画素の範囲で動かし位置検出を行った。

また、白線を操作する範囲は、32×32画素の範囲で行った。

6.2.2 結果・考察

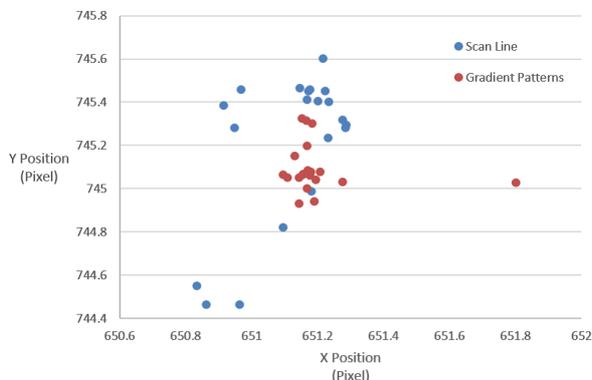


図 10: 静的な面型光センサの位置検出の結果

検出時間は白線の操作を行った場合、平均 8959.8ms であったが、本手法の場合、平均 1731.6ms であった。このように、検出時間は 5 倍ほど速くなったことがわかる。

さらに、白線の操作を行った場合、標準偏差は 0.3351 画素であったのに対し、輝度勾配を用いた本手法の場合、0.1038 画素であった。白線の走査を行った場合、検出時間が長いので、その間に環境光の変化が発生し、その影響が正確性が輝度勾配よりも誤差が大きくなってしまった原因ではないかと考えられる。

6.3 奥行推定についての実験

6.3.1 実験方法

プロジェクトタから 1.3m の位置に面型光センサを置き、この位置でキャリブレーションを行う。そして、プロジェクトタから 1.0m の位置から 1.5m まで 0.05m ずつ変化させ、11 箇所で行行を検出した。

6.3.2 結果・考察

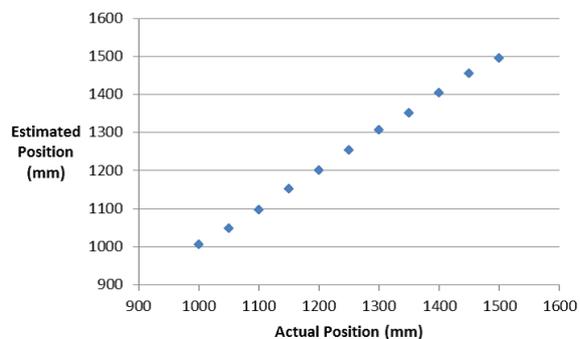


図 11: 奥行推定の結果

この図 11 は、奥行推定をした結果である。このように奥

行を線形に検出できていることがわかる。このときの標準偏差は 6.651mm であった。

7. 今後の展望

本研究では、ディスプレイデバイスの画像平面と面型光センサの受光面は同一平面上になければならないという制限がある。面型光センサの受光面が投影される画像平面に対して傾いている場合、受光する面積が変わってしまうので、差分値の変化率が奥行だけでなく、その傾きに具合にも影響を受けてしまう。このように、検出できる自由度は 3 自由度までなので、姿勢の変化に対する特性の評価と頑健性を改善する手法の検討を行いたい。

8. 結論

本研究では、画像提示装置からの輝度勾配画像を用いて、面型光センサの 3 次元位置計測を行うことが可能となった。謝辞 本研究について、多大な貢献をしてくださった共同研究先の南オーストラリア大学の Bruce H. Thomas 教授、Ross T. Smith 博士、Michael Marner 氏、Guy. Webber 氏に深く感謝します。

参考文献

- [1] R. Raskar, G. Welch, K.L. Low, and D. Bandyopadhyay. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination. In *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pages 89–102. London, UK, 2001.
- [2] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii, and M. Inami. Augmented Coliseum: an augmented game environment with small vehicles. In *Horizontal Interactive Human-Computer Systems, 2006. TableTop 2006. First IEEE International Workshop on*, pages 6–pp. IEEE, 2006.
- [3] Han Chen, Rahul Sukthankar, Grant Wallace, and Kai Li. Scalable alignment of large-format multi-projector displays using camera homography trees. In *Proceedings of the conference on Visualization'02*, pages 339–346. IEEE Computer Society, 2002.
- [4] J.C. Lee, S.E. Hudson, J.W. Summet, and P.H. Dietz. Moveable interactive projected displays using projector based tracking. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 63–72. ACM, 2005.
- [5] Ross T. Smith, Webber Guy, Maki Sugimoto, Michael R. Marner, and Bruce H. Thomas. Automatic sub-pixel projector calibration(to be published). *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 1(3):1–10, 2013.