

基礎論文

画像提示装置で表示した指標画像を用いた位置・姿勢計測

杉本 麻樹^{*1} 小島 稔^{*1} 中村 享大^{*1} 新居 英明^{*1} 稲見 昌彦^{*1*2}

A Display-Based Position and Orientation Measurement System Using Fiducial Images

Maki Sugimoto^{*1}, Minoru Kojima^{*1}, Akihiro Nakamura^{*1}, Hideaki Nii^{*1} and Masahiko Inami^{*1*2}

Abstract — In this paper, we propose a display-based position and orientation measurement system. It consists of a display device and photo sensors that can track multiple receiver positions and orientations simultaneously. A fiducial marker is projected onto the center photo sensor of the receiver. If the movement causes the photo sensors to detect the fiducial marker's position and orientation, the projector moves the fiducial marker to the center of the receiver again canceling the offset between the receiver and the fiducial marker. Many types of projection systems, including displays such as LCDs and desktop monitors can use this tracking technology.

Keywords: Display-Based Computing, Measurement, Tracking, Projector

1. はじめに

近年、プロジェクタなどの画像提示装置を含むホームネットワークシステムをはじめとして、様々な形態のユビキタス環境が提案されている。本論文では、ユビキタス環境において遍在化の進む画像提示装置を主体として、投影面内に配置した受光部の二次元平面における位置・姿勢計測を行うシステムを提案する。

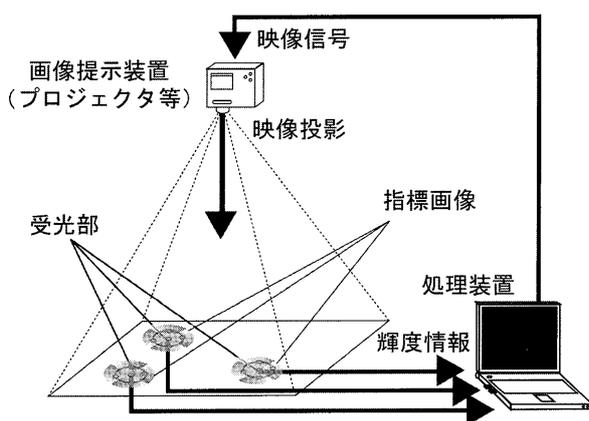


図1 本計測装置の概略

Figure 1: Overview of this system

空間内の離散点で輝度情報を読み取ることの出来る点型受光素子を組み合わせて受光部を構成し、

受光部上に画像提示装置から受光部の配置に合わせて設計した計測のための指標を投影する。このとき受光素子の受け取った輝度情報から、位置・姿勢を検出することを可能とする。図1に本研究で提案する計測システムの概略を示す。

画像提示装置で提示する画像を計測の指標に用いる場合、提示する光学情報を任意に切り替えることができるので、計測対象の形状や必要とされる精度に合わせて適切な指標を選択することが可能である。提案手法は、CCD等の情報量の多い撮像装置を必要とせず、少ない数の点型受光素子と画像提示装置を組み合わせることで実現できる。このため従来の撮像系を用いた計測装置より簡易で高速な情報処理によって位置・姿勢の算出を行える可能性がある。また、投影する画像に基づいて計測を実現するため、画像提示装置のスクリーン座標系での計測を実現できる。このことは、実世界に対してプロジェクタなどの画像提示装置による映像投影を行っている Augmented Reality(AR)環境などにおいて実物体との位置合わせを行う上での大きな利点となると考えられる。

2. Display-Based Computing

本論文は、Display-Based Computing(DBC)の一環として、画像提示装置を用いた計測の可能性を示すものである。DBCとは、筆者らが提唱する画像提示装置を主体として通信や計測、制御、また適切な視覚情報の提示などを実現する概念である。

*1: 電気通信大学大学院 電気通信学研究所

*2: 科学技術振興機構 さきがけ

*1: Graduate School of Electro-Communications, The University of Electro-Communications

*2: Japan Science and Technology Agency

そもそも、カメラが空間の光線情報を取得しているのに対して、プロジェクタが空間に光線情報を提示していることから容易に推察できる様に、撮像装置と画像提示装置は対をなす装置である。撮像装置を用いた研究としては、従来から Computer Vision(CV)の研究が精力的に進められて来ている。CVが実世界の情報を撮像装置によってコンピュータに取り込み処理を行うのに対して、DBCは、画像提示装置を用いることによって、実世界へ情報を重畳して出力することで処理を実現する。DBCに関連した研究としては、LEDを用いた超高速プロジェクタの研究[1]や、撮影防止技術の研究[2]などがある。また、画像提示装置を主体的に利用していることから、DBCを Head Mounted Projector(HMP)[3][4]を利用したAR環境[5]や、同じくHMPを利用した Retro-reflective Projection Technologyの研究としての光学迷彩[6]などと統合することも可能であると考えられる。カメラが単に光学情報を鑑賞目的で記録・再生する装置の一部としてのみ用いられるのではなく画像情報に基づいた計測や制御に用いられるのと同様に、DBCにおいても画像提示装置が、計測や制御のための情報提示装置として利用できると考えられる。

3. 関連研究

画像提示装置の映像投影面内での計測を必要とするアプリケーションの一例としては、Luminous Room[7]や、Shader Lamps[8]などのような、実世界の実物体に直接CGを投影するAR(Spatially-Augmented Reality: SAR[9])の研究があげられる。ARの研究の主流であるビデオカメラと Head Mounted Display(HMD)を用いる Video See-Through型のAR(VST-AR)は、基本的にはHMDを装着した個人が体験できるAR環境であることに対して、SARは、プロジェクタなどの画像提示装置を用いることによって実空間に映像を投影し同時に複数人が体験できるAR環境を提案したものである。VST-ARの研究においては、カメラ映像内でマーカの位置・姿勢の認識を行うARToolKit[10]を使用したシステムが、優れた特性を示している。これは、VST-ARシステムへの入力であるカメラ映像の中でマーカの認識を行い、その認識結果を利用したCGを、カメラ映像の上に重ねて出力しているため、入力と出力の座標系が一致しているためであると考えられる。一方、SARの研究においては、実物体の位置・姿勢を計測した結果を入力として、そのデータを利用したCGをプロジェクタなどで実世界の上に重ねて出力している。

実物体の位置・姿勢の計測方法としては、光学センサや磁気センサを利用する研究[11]、カメラ画像の認識を用いる研究[12]、RFIDアンテナアレイを利用する研究[13]などが行われている。この様な計測方法を用いた場合、入力と出力の座標系と出力の画像提示装置の座標系が異なること、磁気センサには金属等の外乱による磁場の歪み、カメラ画像にはレンズの歪みなどが顕著に現れることから、グリッド線などを用いてパラメータを取得し、座標系を一致させる補正処理を行うことが必須とされていた。このとき、実空間に映像投影をしているプロジェクタなどの画像提示装置自体を利用した計測を行えば、入力と出力の座標系が一致するため、位置合わせの精度を著しく向上させることができると考えられる。プロジェクタを用いて投影面内での計測を行う研究としては、DLPプロジェクタを用いて光学センサを備えたRFIDタグの位置検出を行う研究[14]や、投影面内に埋め込んだセンサの位置を計測してセンサ配置に合わせた映像投影を行う研究[15]、手に持ったセンサの位置を割り出す研究[16]などが進められている。これらの研究では、複数のフレームにわたってバイナリパターンの画像を切り替えて表示して位置を割り出しているため、原理上では毎フレームの位置計測を行うことができない。また、移動している計測対象に対応することが難しい。DLPでは、専用の開発キットを利用して素子を直接駆動することでフレームレートを高め、この問題を軽減することが可能であるが、根本的な解決が行えていない。そこで、本研究では、位置に応じて輝度に変化する指標画像を投影し、移動する計測対象についても位置・姿勢計測を行える手法を提案する。また、この手法が一般に市販されている画像提示装置で汎用的に使用できることを実証するために、LCDを用いた実装を行う。

4. 指標画像を用いた位置・姿勢の計測

本論文では、受光部の位置・姿勢計測を行うために画像提示装置を利用して投影する光学情報を指標画像と呼称する。本論文の提案する手法では受光部で取得した指標画像の情報を元に位置・姿勢の検出を実現する。なお、位置・姿勢計測のために複数の指標画像の提示が必要とされる場合がある。このような場合には、一般的には、波長分割と時間分割などによる指標画像の多重化が可能である。毎フレームの計測が可能なシステムを前提とすると、波長分割多重が有効な手段となると考えられる。波長分割多重化の一例としては、通常市販されているプロジェクタなどを用いて投影パターンをRGBの

各チャンネルで異なるものにし、指標画像の多重化を実現する方法があげられる。また、画像提示装置自体の開発を行えば、紫外や赤外領域も使用することも可能である。この他、偏光フィルタを用いることによっても指標画像の多重化を行える。

ここでは、いくつかの計測のための指標画像と手法について記述するが、画像提示装置を利用して計測を行う場合には指標画像と計測手法は対象や環境に合わせて任意に選択が可能である。受光素子の数や配置、計測する項目を変えることによって、本稿で示した以外にも様々な指標が考案できる。このように様々なデザインの指標画像を任意に切り替えて使用できることが、DBC を用いて計測を行うことの大きな利点である。

4.1 動的画像提示による静止対象の位置検出

受光部の出力と投影映像の時間関係が既知である場合に、図 2(a)に示すように縦一列の輝度変化と横一列の輝度変化で投影面上を走査し、受光部の出力を計測することによって、位置を求めることができる。走査以外の方法としては、図 2(b)に示す様に提示映像を明暗に二分割して、受光部が明暗の何れに含まれているかを再帰的に判定することで位置を求めることも可能である。

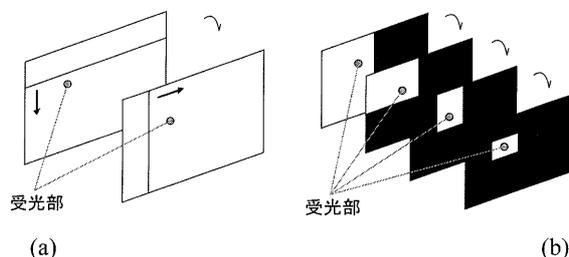


図 2 静止している受光部に対応する検出方法

Figure 2: Detection methods for a static target

4.2 静的画像提示による移動対象の位置検出

輝度の正確な計測が可能であれば投影面全体に波長分割等の方法で、図 3 に示す 2 つの画像を多重化して示すことでも位置計測を行える。受光素子の出力が輝度に対して線形である場合、位置 x と位置 y は、それぞれ、式(1)と式(2)によって求めることが可能である。この時、 a_1 は図 3(a)のパターンを受光した受光素子の出力、 a_2 は図 3(b)のパターンを受光した受光素子の出力であるとする。

$$x \propto a_1 \quad (1)$$

$$y \propto a_2 \quad (2)$$

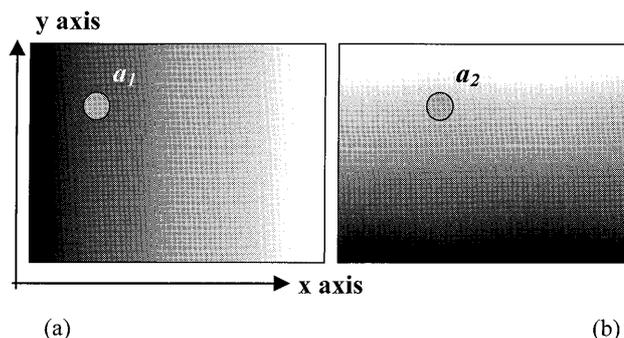


図 3 移動している受光部に対応する指標画像

Figure 3: Static fiducial images for a dynamic target

しかしながら、この手法を広い範囲に適用すると、解像度が画像提示装置の輝度分解能に依存してしまうことと、環境光や外乱の影響が大きく現れることのため実用上は問題がある。同一の条件下では指標画像の明暗の広がりや計測精度にトレードオフが存在すると考えられる。このことを考慮すると、静的画像提示によって位置計測を行う場合、図 4 に示すような複数の領域に分割した明暗を用いる指標画像も有効であると考えられる。

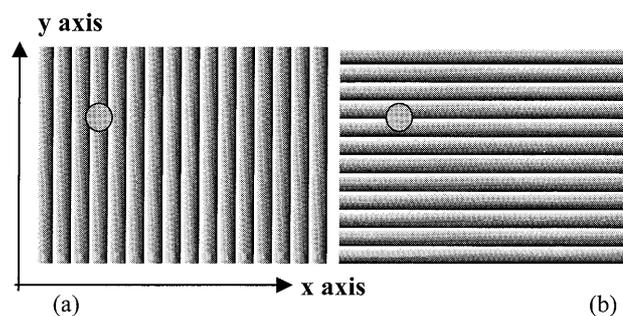


図 4 領域分割した指標画像

Figure 4: Static fiducial images spatially divided

この指標画像を用いる場合、輝度を計測することによって領域内の位置を算出することが可能である。絶対座標を計測するためには、どの領域に受光部があるかを保持しておくことが必要である。

4.3 動的画像提示による移動対象の位置・姿勢個別検出

静的画像提示の項で述べたトレードオフを前提とすると局所的に指標画像を提示することが計測精度向上の一助になると考えられる。このことを考慮して、受光部の位置に合わせて局所的に指標画像を提示し、図 5 に示すように追従計測を行う方法を提案する。この手法では、局所的に指標画像を提示しているので、常に背景には任意の映像を提示することが可能である。

計測方法としては、初期位置検出が終了した後

に、受光部位置を目標に指標画像を提示する。このとき、受光素子から輝度情報を取得することで、受光部と指標画像の相対位置・姿勢を算出できる。受光部のスクリーン上での絶対位置・姿勢は、受光部と指標画像の相対位置・姿勢に指標画像の位置・姿勢を加味することで容易に求められる。以上の指標画像の提示と位置・姿勢算出を繰り返すことで追従計測が行える。この計測の手順を図6に示す。

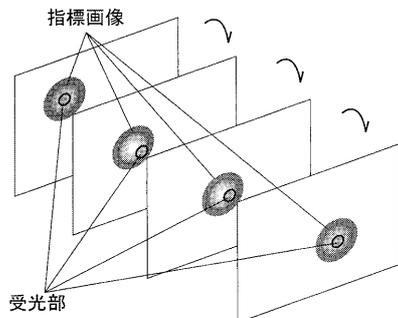


図5 追従計測の概略

Figure 5: Overview of the tracking measurement

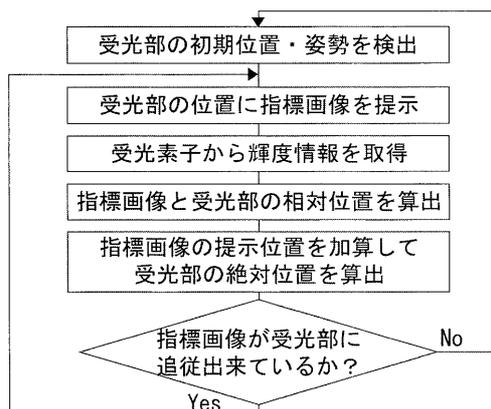


図6 追従計測の手順

Figure 6: Sequence of the tracking measurement

受光部が指標画像を受光できていれば、指標画像の提示位置と受光部の中心位置がずれていたとしても、相対位置・姿勢の計測は可能であるため、指標画像の提示位置を加味すれば常に受光部の絶対位置・姿勢を算出できる。一方、受光部が指標画像を受光できていない場合には、適切な相対位置・姿勢の計測が行えないため、追従計測は失敗してしまう。

指標画像と受光部の相対位置・姿勢は、受光部の情報に簡単な演算を行うことにより求められる。図7(a)に示す位置検出指標では、式(3)、式(4)によって受光部との位置 x, y を求めることができる。これに対して、図7(b)に示す姿勢検出指標では受光部との姿勢 θ を、式(5)で求めることができる。位置検出と姿勢検出では、それぞれ指標画像が違うため、

式(5)に代入される x, y は、位置検出の場合とは別に算出する必要がある。図7では、試作システムに合わせて5個の点型受光素子を記載しているが、実際には、受光素子の数は任意である。

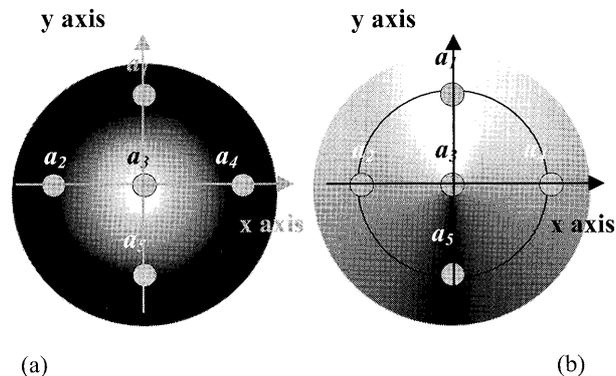


図7 個別位置・姿勢検出に対応する指標画像

Figure 7: Individual fiducial markers for the position and orientation measurement

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \times x_i)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (3)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \times y_i)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (4)$$

$$\theta = \arg(x + jy) \quad (5)$$

このとき式中の x_i, y_i は各受光素子の位置、 n は受光素子の個数、 j は複素数記号である。

4.4 動的画像提示による移動対象の位置・姿勢同時検出

図7で示した位置・姿勢計測指標の場合、位置と姿勢の計測は個別にしか行えない。両方を求めたい場合、指標画像の多重化を行う必要がある。そこで、一つの指標画像で、位置・姿勢の検出を実現するために、図8に示す位置・姿勢同時検出指標を提案する。この指標画像では、 x 軸と y 軸に沿って明暗を変化させていることによって、位置を線形に算出できるようにしている。姿勢の算出には逆正弦関数を用いる。

受光素子 a_1, a_2, a_4, a_5 の出力値から受光素子 a_3 の出力値を引いた値を a'_1, a'_2, a'_4, a'_5 としたとき、位置 x, y と姿勢 θ は、式(6),(7),(8)に示す関係となる。あらかじめ受光素子の出力値は線形に補正してあるとする。

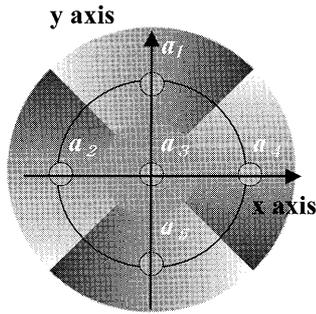


図 8 同時位置・姿勢検出に対応する指標画像

Figure 8: Simultaneous fiducial marker for the position and orientation measurement

$$x \propto a'_1 - a'_5 \quad (6)$$

$$y \propto a'_2 - a'_4 \quad (7)$$

$$\sin \theta \propto a'_1 + a'_2 + a'_4 + a'_5 \quad (8)$$

この指標画像を用いることで位置と姿勢を独立して計測することが可能である. 独立性を確認するため, 図 9 に例を示す.

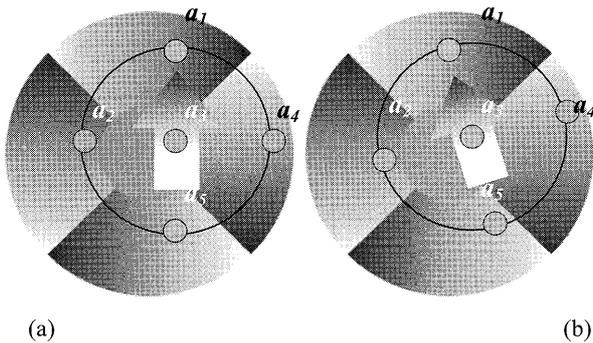


図 9 位置と姿勢の独立性

Figure 9: Isolation between the position measurement and the orientation measurement

図中の矢印は受光部の姿勢を示している. 図 9(a)では, 受光部と指標画像が位置ずれを起こしている. このときの位置は, a'_1 と a'_5 , a'_2 と a'_4 の差分として求まり, 姿勢は a'_1 と a'_5 , a'_2 と a'_4 の領域で明暗が対称になっているため, それぞれ加算すると打ち消しあう. 図 9(b)には, 図 9(a)の受光部に回転を加えた例を示す. 位置を算出する a'_1 と a'_5 , a'_2 と a'_4 , それぞれの差分は図 9(a)の時の値を基準として, 互いに打ち消し合うため, 姿勢に影響されることなく位置の算出値は同じである. これに対して, 姿勢は図 9(a)における均衡を基準に原点で回転しているときと全く同一の割合で変化していくため, 位置に影響されることなく求めることができる.

この指標画像の難点としては, 一回の計測間隔

において 45(deg)以上の姿勢変化がおきた場合は, 正しい計測を行えない点あげられる. しかしながら, 検出範囲内では位置と姿勢は独立性を保っていて正しく求められる.

5. 試作システム

提案手法で位置・角度の計測が可能であることを実証するために, 画像提示装置としてプロジェクタを用いたシステムと, デスクトップモニタを用いたシステムを構築した. 図 10 に, プロジェクタを用いた試作システムで, 4 個の受光部を同時に追従計測している場面を示す.

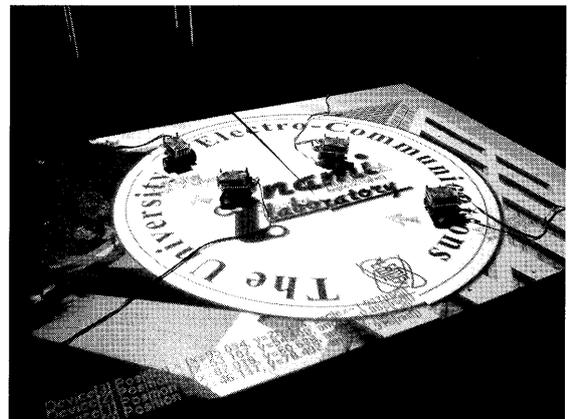


図 10 プロジェクタを用いた試作システム

Figure 10: Snapshot of the experimental system using a projector

図 11 には, デスクトップモニタを用いた試作システムで姿勢検出を行っている場面を示す.



図 11 デスクトップモニタを用いた試作システム

Figure 11: Snapshot of the experimental system using a desktop monitor

5.1 試作システムで用いる位置・姿勢計測方法

試作システムにおいては, 位置・姿勢検出方法の項で示した手法から次のものを採用した.

- ・ 図 2(b)に示す明暗分割による初期位置検出
- ・ 図 7(b)に示す指標画像による初期姿勢検出
- ・ 図 8 に示す指標画像による位置・姿勢の追従計測

まず、画面内を再帰的に明暗分割することにより、受光部の初期位置を求め、次に姿勢検出指標を用いて初期姿勢を算出する。この結果を踏まえて位置・姿勢同時検出指標を用いて、位置・姿勢を追従計測するという手順をとる。図 12 には、プロジェクタを用いた試作システムで、初期位置検出をしている場面を示す。

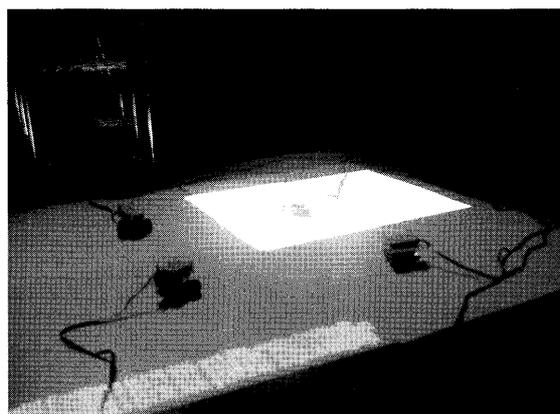


図 12 領域分割による初期位置検出

Figure 12: Initial position detection using the space division method

5.2 画像提示装置

プロジェクタ型の画像提示装置としては、NEC ビューテクノロジー VT770J を用いた。このプロジェクタのスペックは、輝度 3,000ANSI ルーメン、LCD パネル解像度 1024 x768(pixels)である。デスクトップモニタ型の画像提示装置としては、DELL UltraSharp 2001FP を用いた。VT770J の映像を受光した素子の出力波形を確認すると、一定の輝度を投影している場合に、5[ms]間隔で 0.5[ms]程度のパルス状の変化が観測された。素子の出力波形例を図 13 に示す。

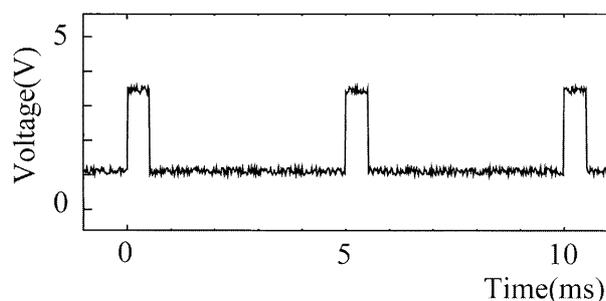


図 13 一定の輝度の映像を受光した素子の出力波形

Figure 13: Example of the sensor output at constant brightness

パルス状の輝度変化を受光すると受光素子の出力も著しく変化する。受光部では、この影響を低減するために受光情報の補正の項に示す処理を行う。画像提示装置の映像情報を制御する PC 側のプログラムは、CG 描画ライブラリとして、OpenGL を使用した。ディスプレイドライバの設定によりリフレッシュレートを 60Hz に設定し、垂直同期信号に合わせて、このプログラム上で提示画像の描画と位置・姿勢の計測を行うこととした。

5.3 受光部

点型の受光素子を組み合わせて二つの異なった大きさの受光部を製作した。外観を図 14 に示す。大型の受光部では各軸の最も離れた素子同士の距離が 76(mm)、小型の受光部では 36(mm)である。受光部を取り替えた場合には、指標画像の大きさも、受光素子間距離にあわせて切り替えることとした。

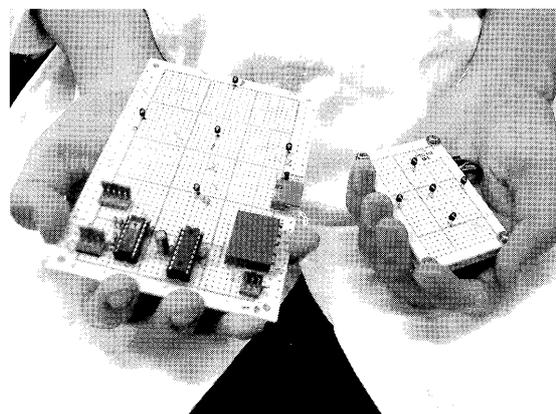


図 14 受光部外観

Figure 14: Exteriors of receivers

受光部には、受光素子としてフォトトランジスタ 東芝 TPS603A を図 15 に示すように配置している。受光部を制御している Micro Controller Unit(MCU) Microchip PIC 16F88 で各受光素子について 10bit の AD 変換を行い、補正した計測結果を RS-232C で PC 側に送信している。

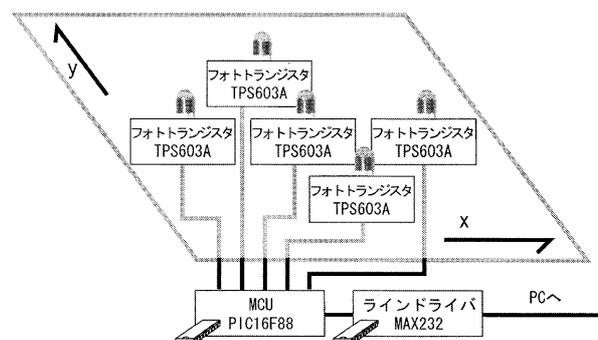


図 15 受光部概要

Figure 15: Overview of the receiver

5.4 受光情報の補正

MCU 側での補正としては、図 13 に示したパルス状の輝度変化による計測への影響を排除するため 0.5[ms]間隔で受光素子毎に 3 回の AD 変換を行い、最も低い値を計測結果とすることとした。

PC 側での補正としては、プログラム起動時にパラメータを取得し、ガンマ補正を行うこととした。ガンマ補正により、提示画像の輝度に対して受光部の出力を線形にすることが出来るため、位置・姿勢の計測を正確に行えるようになる。提示画像の輝度と PC 側での補正前の受光部の出力特性を測定したところ図 16 に破線で示すような結果が得られた。横軸が提示画像の輝度値で、プロジェクタの最小輝度：RGB(0,0,0)の状態を 0，最大輝度：RGB(255,255,255)の状態を 1 として正規化を行ったデータである。縦軸は同じく正規化した受光部の出力である。

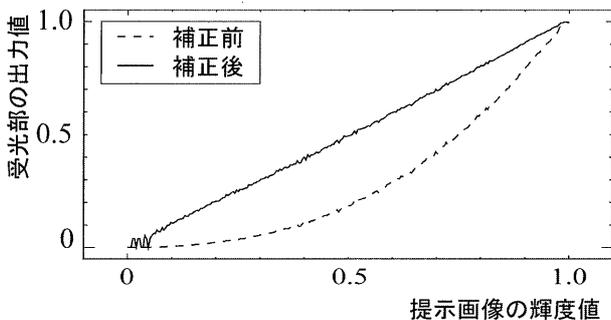


図 16 受光部の出力特性

Figure 16: Characteristics of the receiver

補正前のデータを元に最小自乗法でガンマを算出し、PC 側で補正を行った例を図 16 に実線として示す。補正後は、位置・姿勢同時検出指標において重要となる 0.5 付近において、ほぼ直線となる特性を得ることができた。

6. 実験

試作した画像提示装置を用いた位置・姿勢計測システムで実際に計測が行えることを確認するために、プロジェクタを使用した試作システム上で実験を行った。この実験では、初期位置検出を行った後の位置・姿勢同時検出指標を用いた追従計測について評価を行った。実験環境としては、天井にプロジェクタを固定し、レンズから 2.3(m)下方の受光部の高さにおいて 1.4 x 1.1(m)の投影面を作った。動的な状態における評価を行うため、回転台を用意し、受光部を回転中心から 0.4(m)の距離に固定した。

6.1 受光部が静止している状態における評価

大型の受光部を回転台の上に静止させ、環境光を切り替えて、本システムの計測精度を確認した。環境光のパラメータとしては、室内の光源をすべて消灯し暗闇とした 2(lux)程度の状態、白熱球のライトを点灯した 20(lux)程度の状態、天井に設置された蛍光灯を点灯した 400(lux)程度の状態を用意した。照度の測定は、プロジェクタの電源を落とし、照度計 SANWA LX2 の受光部を投影面の中央に置いて行った。表 1 に 5,000 回のサンプリング結果に基づく実験結果を示す。表中の位置・姿勢の平均値は最も暗い条件を基準として相対値としている。

表 1 静止状態における計測結果

Table 1: Results of the measurement

		Darkness: 2 (lux)	Incandescent light: 20 (lux)	Fluorescent light: 400 (lux)
x(mm)	Average	0.0	-3.1	-1.4
	Standard deviation	0.2	0.5	1.2
y(mm)	Average	0.0	3.9	0.6
	Standard deviation	0.1	0.7	1.8
θ (deg)	Average	0.0	-8.4	-1.7
	Standard deviation	0.4	0.9	0.7

6.2 受光部が移動している状態における評価

環境光をできるだけ排除した投影面中心の照度 2(lux)程度において、受光部が移動している場合の計測精度を確認するために回転台を角速度 3.7(deg/sec)で回転させ、受光部の軌跡を計測した。図 17(a)に大型の受光部を用いた軌跡、図 17(b)に小型の受光部を用いた軌跡を示す。

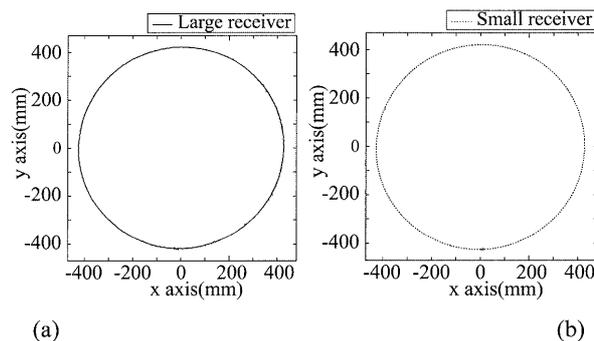


図 17 受光部の軌跡

Figure 17: Trajectories of the receivers

図 18 には、この実験における回転中心からの距離の誤差の分布を示す。この図は、約 5700 回の計測データに基づいている。明るい灰色は大型の受光部のデータ、暗い灰色は小型の受光部のデータを示す。大型の受光部では標準偏差 3.0(mm)、小型の受光部では標準偏差 2.8(mm)であった。

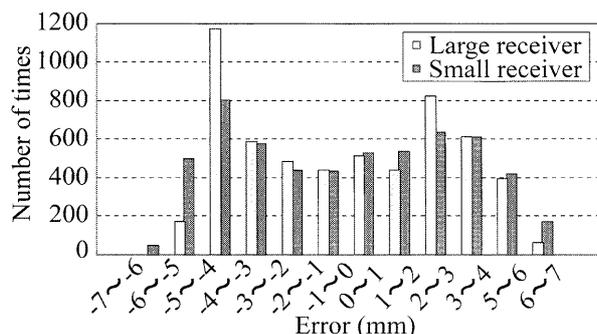


図 18 距離の誤差の分布

Figure 18: Distribution chart of the distance error

次に、受光部の大きさによる追従性能の差を評価するため、同様の環境において、角速度を変化させ、指標画像が受光部に追従できているかを目視で確認した。角速度を上げていったところ、小型の受光部では角速度 15.2(deg/sec) : 受光部の速度 106(mm/sec) まで、大型の受光部では角速度 19.9(deg/sec) : 受光部の速度 139(mm/sec) までの追従を確認できた。

7. 考察

実験においては、受光部が静止している状態の精度と、移動している状態の精度と追従性能の評価を行った。

受光部が静止している状態における計測精度の評価では、2(lux)程度のほぼ暗闇の状態標準偏差 $x: 0.2(\text{mm})$, $y: 0.1(\text{mm})$, $\theta: 0.4(\text{deg})$ の結果が得られた。蛍光灯を点灯して環境光を 400(lux)程度としたときにも、標準偏差は $x: 1.2(\text{mm})$, $y: 1.8(\text{mm})$, $\theta: 0.7(\text{deg})$ であった。試作システムは、暗闇では非常に精度が高く、蛍光灯を使用した屋内光のなかでも使用することができた。このシステムでは、複数の受光素子の出力を演算しているため、すべての受光素子に均一な影響を与えると考えられる面光源型の環境光には頑強性を示したと思われる。一方、白熱球による 20(lux)程度の条件下では、位置・姿勢の標準偏差は蛍光灯下と比べてさほど大きくはなっていないが、平均値が大きく変化した。特に、姿勢は、暗闇の時の値に対して、 $-8.4(\text{deg})$ もの変化を示した。この姿勢の変化の原因は各受光素子に偏って入射する光や陰影に由来すると考えられる。点光源型の環境光がある場合には、本システムの性能は大きく低下することが確認できた。

受光部が移動している状態の実験においては、提案手法で、移動する対象を追従計測することに成功した。計測結果として図 17 に示すように、回転台に固定した受光部の歪みの少ない軌跡を得るこ

とができた。もともとプロジェクタなどの画像提示はカメラなどの撮像系に比べて、大型の光学系やデバイスを用いているため、歪みの少ない軌跡を得やすいと考えられる。また、回転中心からの距離の標準偏差も 3(mm)程度であり、高い精度で計測が行えていたと考えられる。

追従限界を確認する実験においては、大型の受光部が小型の受光部より高い追従性能を示した。これは、大型の受光部の場合、受光部の大きさに合わせて指標画像も大きくなっているため、受光部が大きく動いても指標画像の範囲内に収まったからであると推察される。受光部と指標画像が大きいほど高速な物体を追従可能であるが、投影面に占める受光部と指標画像の割合も大きくなるため、背景映像の投影可能な面積が小さくなる。必要な追従速度と受光部、指標画像の大きさを勘案して、適切な大きさを選択する必要がある。

一方、本システムの汎用性について考えると、一般に普及している画像提示装置に用いられている表示デバイスとしては、LCD が最も低速なデバイスである。LCD に適応できた本システムは輝度検出部分の改良のみで DLP や PDP など他の表示デバイスにも適応可能であると考えられる。

8. 今後の検討課題

提案手法では、受光部周辺に指標画像を提示する必要がある。このため、指標画像がアプリケーションの妨げになることが考えられるが、背面投影型の環境では、指標画像を受光部で隠すことが可能であり、問題を軽減できる。背面投影型のシステムの構築および評価は今後の課題の一つとなる。また、指標画像の不可視化を試みる場合には、フレーム間の差分を用いて指標を提示することも検討に値する。

試作システムでは、画像提示装置の更新周期に合わせた指標画像の描画と計測を行った。一方、画像提示装置の更新周期と比較して点型の受光素子を用いた輝度計測は非常に速く行える。指標画像の描画と計測を切り離して、高速な計測を実現することも今後の課題である。高速な計測によって受光部の速度を算出できれば指標画像の追従性を大きく向上させることも可能である。

本論文で提案する計測方法は、実験で使用したプロジェクタのみでなくデスクトップモニタ型の画像提示装置にも適応可能であった。提案手法をはじめとする画像提示装置を用いた計測技術を発展させていくことで、CRT に代わる LCD などの普及で使用されなくなったライトペン[17]型のデバイ

スの代用になる入力デバイスを実現できる可能性がある。

また、本論文では計測のみについて述べたが、受光部側に何らかの動力装置がある場合には、画像提示装置の出力する指標を目標として受光部側を動かすことによって、受光部側の位置・姿勢の制御を実現することが可能である。この方法は例えば顕微鏡下で作業をするマイクロロボットを制御するような場面において有効であると考えられる。今後は、このような画像提示装置を用いた制御についても検討していきたい。

9. おわりに

画像提示装置を用いて受光部上に指標画像を提示して計測を行う手法を提案した。試作システムとして、位置・姿勢を計測するシステムを製作し、実験により性能を検証した。提案手法と市販されているLCDプロジェクタやLCDモニタを利用して移動している受光部に対する追従計測を実現できた。本論文の提案と試作、実験によって指標画像を用いた計測が実用可能な手法であることを示せたと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業さきがけプログラム「情報基盤と利用環境」領域の助成により行われた。

参考文献

- [1] 稲見,新居,杉本,再帰性光通信技術の研究(第三報)ー超高速LEDプロジェクタの試験的実装, 第28回ヒューマンインタフェース学会研究会「人工現実感」, ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.6 No.3,pp77-80,2004
- [2] 新居,杉本,稲見,再帰性光通信技術の研究(第四報)ーLED照明によるビデオ撮影妨害技術, 第28回ヒューマンインタフェース学会研究会「人工現実感」, ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.6 No.3,pp81-84,2004
- [3]M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi, Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000, pp.233-240, 2000.
- [4]H. Hua, A. Girardot, C. Gao, and J. P. Rolland, Engineering of head-mounted projective displays, Applied Optics 39(22), pp.3814-3824, 2000.
- [5]A. State, M. Livingston, W. Garrett, G. Hirota, M. Whitton, E. Pisano, H.Fuchs, Technologies for augmented-reality systems: realizing ultrasound-guided needle biopsies. Proc. SIGGRAPH '96, pp.439-446, 10, 1996
- [6]M. Inami, N. Kawakami and S. Tachi, Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology, IEEE / ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003), pp.348-349, 2003
- [7]J. Underkoffler, B. Ullmer, and H. Ishii. Emancipated pixels: real-world graphics in the luminous room. Proc. of SIGGRAPH'98, pp.385-392, 1999
- [8]R. Raskar, G. Welch, K.-L. Low, and D. Bandyopadhyay. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination, In Eurographics Rendering Workshop 2001, pp 89 - 102, 2001
- [9] R. Raskar, G. Welch, and H. Fuchs. Spatially augmented reality. In First IEEE Workshop on Augmented Reality, pp.11-20, 1998
- [10]H. Kato and M. Billinghurst, Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, In 2nd Int'l Workshop on Augmented Reality, pp 85-94, 1999
- [11]D. Bandyopadhyay, R. Raskar, H. Fuchs, Dynamic Shader Lamps:Painting on Real Objects, The Second IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.207-216, 2001
- [12]永井, 向川, 大田, 動的シーンに対する仮想光学パターンの投影, 第3回情報科学技術フォーラム FIT 2004, Vol.3, pp.179-182, 2004
- [13]F. Kusunoki, M. Sugimoto, H. Hashizume, A system for Supporting Group Learning that Enhances Interactions, Proc.of Computer Support for Collaborative Learning '99, pp.323-327, 1999
- [14] R. Raskar, P. Beardsley, J.V. 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 Transactions on Graphics, Vol. 23, Issue 3, pp. 406-415, 2004
- [15] J. C. Lee, P. H. Dietz, D. M. Aminzade, R. Raskar, and S. Hudson, Automatic Projector Calibration with Embedded Light Sensors, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2004.
- [16]J. Summet and R. Sukthankar. Tracking Locations of Moving Hand-held Displays Using Projected Light, Pervasive 2005, Munich, Germany. Springer-Verlag LNCS No. 3468. pp. 37-46, 2005
- [17]Sutherland and I. Edward, Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System, AFIPS Spring Joint Computer Conference, pp.329-346, 1963

(2005年7月19日受付)

[著者紹介]

杉本 麻樹

(学生会員)



2000年 千葉工業大学工学部電子工学科卒業。2002年 同大学大学院工学研究科博士前期課程情報工学専攻修了。同年から2003年まで科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「協調と制御」領域グループメンバーとして、東京大学大学院情報学環研究補佐員を経て日本電信電話株式会社NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部客員研究員。2003年10月から電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻在籍。非言語情報を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。日本学術振興会特別研究員。

Best Paper Award, ICAT Best Paper Award, ACM ACE Excellent Paper Prize 等受賞, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE Computer Society, ヒューマンインタフェース学会, 日本ロボット学会等各会員。

小島 稔

(学生会員)



2005年 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。現在、同大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻在籍。画像提示装置と小型ロボットを用いた拡張現実感技術の研究に従事。

中村 享大

(学生会員)



2004年 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。現在、同大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻在籍。画像提示装置を用いた計測の研究に従事。

新居 英明

(学生会員)



1993年 東京工業大学制御工学科卒業。1995年 東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程制御工学専攻修了。同年株式会社トキメック入社。2003年4月 同社退社。2003年10月から電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻在籍。情報投影技術を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。

稲見 昌彦

(正会員)



1999年 東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト, 同大学助手, 電気通信大学講師, マサチューセッツ工科大学コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者を経て現在, 電気通信大学知能機械工学科助教授。科学技術振興機構さきがけ研究者を兼任。ロボット, バーチャルリアリティ等インタラクティブ技術に関する研究に従事。情報処理学会山下記念研究賞, 同学会論文賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞, 同学会論文賞, IEEE Virtual Reality