

パターン埋め込みによる動的シーンへの適応的投影

永井 悠文[†] 向川 康博^{†, ††} 大田 友一^{†, †††}

[†]筑波大学大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{††}先端学際領域研究センター, ^{†††}計算科学研究センター

E-mail: nagai@image.esys.tsukuba.ac.jp, mukaigaw@ieee.org, ohta@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし プロジェクタ型複合現実感において、スクリーンとなるシーンの変化への対応は、インタラクティブなコンテンツ制作のために欠かせない要素である。本研究では、シーンへの画像投影とスクリーン物体の追跡が同時に行えるシステムを、カメラ1台・プロジェクタ1台というシンプルな機器構成で実現した。人間には見えづらくカメラからは認識が可能なパターンをプロジェクタ投影画像に埋め込み、シーンの3次元計測を行うことでスクリーン物体を追跡する手法を提案する。パターンの埋め込みには、カメラと人間の視覚の感度特性の違いを利用し、プロジェクタからの投影色・カメラ観測色・人間の心理物理色の3つの色空間のキャリブレーションにより色座標の相互変換を可能とした。提案手法により、スクリーン物体の追跡を行い、シーンの変化に追従して投影を行うシステムを構築した。

キーワード プロジェクタ, 複合現実感, 物体追跡, 不可視情報

Adaptive Image Projection onto Dynamic Scene by Pattern Embedding

Hirobumi NAGAI[†] Yasuhiro MUKAIGAWA^{†, ††} Yuichi OHTA^{†, †††}

[†]Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

^{††}Center for Tsukuba Advanced Research Alliance, ^{†††}Center for Computational Sciences

E-mail: nagai@image.esys.tsukuba.ac.jp, mukaigaw@ieee.org, ohta@iit.tsukuba.ac.jp

Abstract In Projector-Based Mixed Reality, a method to deal with dynamic scenes is considered as an important factor to achieve interactive systems. We have developed a simple system which consists only of a camera and a projector to track the screen object and to project images onto the object. We propose a method for tracking the screen object based on the pattern embedding technique. This embedded pattern can be well recognized by the camera, despite it is invisible to human eyes. The embedded pattern is extracted from captured images and used for 3-D tracking of the object. Our method utilizes the difference of color sensitivity between camera and human eyes. To find optimal embedding color, we derive transformation functions of color space among projected color, observed color by the camera, and psychophysical color without troublesome calibration. Some experimental results show that the adaptive image projection onto dynamic scenes can be realized.

Keywords projector, mixed reality, object tracking, invisible pattern

1. はじめに

近年、仮想情報をプロジェクタから現実世界に直接投影することで、仮想世界と現実世界の融合を図るプロジェクタ型複合現実感 (PBMR: Projector-Based Mixed Reality) という新しいスタイルの複合現実感技術が提案されている。PBMRは、3次元的に視覚情報を提示できる技術であり、そのリアリティを向上させることを目的とした研究が数多くなされている[1][2]。例えば、向川らは、プロジェクタ型複合現実感におけるシーンの光学的な見え方の変化を取り扱い、光源位置や反射特性を任意に変化させることのできる仮想光学環境を提案し[3]、その技術をデジタルアーカイブされた文化財の提示法として応用した[4]。

しかし、PBMRは、このような3次元的な視覚情報提示技術としての魅力だけではなく、ユーザインター

フェースとしての大きな可能性も兼ね備えている。複数ユーザが仮想情報を取り扱う協調作業を考えた場合、そのシステムに求められるものは、

- (a)仮想情報のユーザ間での共有
- (b)ユーザ間の円滑なコミュニケーション
- (c)ユーザフレンドリなインターフェース

などが挙げられる。そして、これらの要項は、PBMR技術を用いることで満たすことが可能であると考えられる。(a)と(b)をPBMRが満たすことは、PBMRがHMDを装着せずに仮想情報を現実世界で見ることを考えれば想像に難くない。一方で、(c)の協調作業システムにおけるユーザフレンドリなインターフェースを実現するためには、複数ユーザによる同時並行的な入力を自然な形でサポートする必要がある。このように空間的に多重化された入力支援を行うインターフェースとし

では、タンジブル・ユーザ・インターフェース (TUI) が提唱されている[5]. TUI の大きな特徴は、入力空間と出力空間の一致である. PBMR システムにおける 3 次元スクリーン物体を、表示デバイスとして用いると同時に、入力デバイスとしても用いることが出来れば、理想的な TUI を構築することが可能である. しかし、そのためには、スクリーン物体の追跡が必要となる.

そこで本研究では、PBMR におけるスクリーン物体の追跡を目的とする. スクリーン物体の追跡を行うためには、シーンの変化を何らかの方法で検知する必要がある. Bandyopadhyay らは、赤外線センサや磁気センサをスクリーン物体に取り付ける Dynamic Shader Lamps を提案している[6]. このような直接的な方法の他には、スクリーン物体追跡の手掛かりとなる情報を、何らかの空間に埋め込む方法が考えられる. 我々は、アクリル板を用いた机上作業空間下からスクリーン物体の底面に取り付けたビジュアルマーカを観察する手法を提案した[7]. これは、人間の不可視な場所に情報を埋め込んだ例である. また、Cotting らは、DLP プロジェクタの DMD チップ素子のオン・オフが任意色に対して一意のパターンを持つことを利用して、任意のビットパターンが観測されるように色を調整することで、投影とスクリーン物体の追跡を同時に行うシステムを提案した[8]. これは、色に対して時間軸方向に情報を埋め込んだ例である.

本稿では、カメラと人間の視覚の感度特性の違いを利用して、3 次元形状復元の手掛かりとなるパターンを投影画像中の色空間へ埋め込み、抽出することでスクリーン物体を追跡する手法について提案する. 本システムの特徴は、可視光カメラ 1 台とプロジェクタ 1 台のみというシンプルな機器構成で、スクリーン物体への画像の投影を行いつつ、スクリーン物体を追跡できる点にある.

2. 基本原理

プロジェクタ型複合現実感において、カメラを用いた物体追跡を困難にしている要因は、プロジェクタから画像が投影されていることである. 一様でない画像がシーン中に投影されている場合、特徴点追跡などの一般的なコンピュータビジョン技術を適用することは難しい.

ここで、赤外線などの不可視光を利用して物体追跡の手掛かりとなるパターンを投影するシステムも考えられるが、特殊な機材を必要とするという問題がある. そこで本研究では、シンプルな機器構成でスクリーン物体を追跡できる手法を提案する. なお、ここでいうシンプルな機器構成とは、プロジェクタ 1 台とカメラ 1 台という構成を指す.

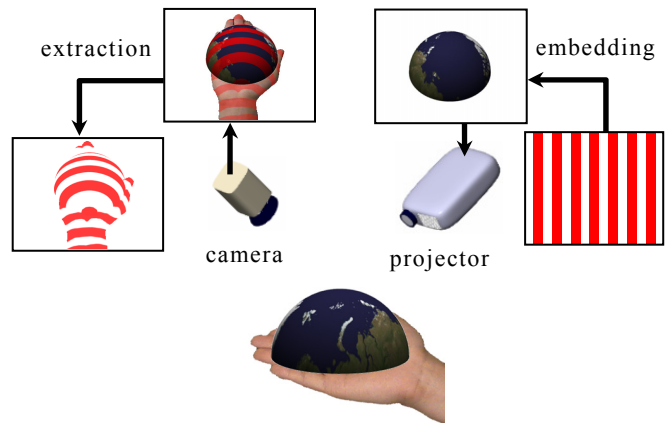


図 1 : パターン埋め込みの概念図

スクリーン物体追跡を行うためのパターン埋め込みの概念図を図 1 に示す. 人間には見えづらく、カメラからは認識が可能なように、スクリーン物体追跡の手掛かりとなるパターンを投影画像中に埋め込み、抽出を行うことができれば、投影とスクリーン物体の追跡を同時に行うことができる. 本研究のキアイデアは、カメラと人間の視覚の感度特性の違いである. カメラと人間が同じ色差を観察した場合、カメラの色感度特性上の距離と人間の色感度特性上の距離は異なる. 我々の手法では、2 枚の投影画像間に微小な色差を付け、その色差の中にスクリーン物体追跡の手掛かりとなるパターンを埋め込む. その際に、カメラと人間の感度特性を考慮することで、人間には見えづらく、カメラからは認識が可能なパターンの埋め込みを実現し、不可視光を用いる手法と同等の効果をシンプルな機器構成で実現する.

以下、3 章では、カメラと人間の感度特性の違いを利用して投影画像中にパターンを埋め込む手法を、4 章では、物体追跡を行うためにどのようなパターンを埋め込むかについてそれぞれ述べる.

3. カメラと人間の感度特性の違いを利用したパターン埋め込み

3.1. 感度特性の違い

まず、プロジェクタから投影した色がカメラではどのように観測されるのか、また人間にはどのように感じられるのかを定量的に表す. ある投影色 $\mathbf{p}$ をシーン中に投影したときに、カメラ観測色 $\mathbf{c}$ と人間が感じる心理物理色 $\mathbf{h}$ は異なる. これが、カメラと人間の視覚の感度特性の違いであり、このことを投影色 $\mathbf{p}$ のカメラ観測色 $\mathbf{c}$ への変換関数 C と、投影色 $\mathbf{p}$ の心理物理色 $\mathbf{h}$ への変換関数 H を用いると、(1)式のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= C(\mathbf{p}) \\ \mathbf{h} &= H(\mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1)$$

投影色 $\mathbf{p}$ とカメラ観測色 $\mathbf{c}$ と心理物理色 $\mathbf{h}$ を相互に変換するためには、 C と C^{-1} 、 H と H^{-1} を求める必要がある。これらの変換関数を定めることを、本稿ではカラーキャリブレーションと呼ぶ。以降、3.2 節で C の求め方を、3.3 節で H の求め方を、それぞれ説明する。

3.2. 投影色のカメラ観測色への変換関数

投影色のカメラ観測色への変換関数 C は、主にプロジェクタの分光分布、スクリーン物体の分光反射率、カメラの分光感度特性によって決まる。しかし、これらは個々の機器に強く依存するため、一般的な定式化は困難である。

そこで本研究では、この C をルックアップテーブルを用いて実現する。プロジェクタの投影色からカメラ観測色への対応付けは、ある輝度値の様なパターンを白色平面へ投影してカメラで撮影し、得られた画像の平均値を使用する。これを全ての投影色に対して行うことで、投影色からカメラ観測色への完全なルックアップテーブルを得ることができる。

しかし、投影色とカメラ観測色は 1 対 1 に対応していないわけではない。そのため、 C の逆関数である C^{-1} は、 C の逆対応を取っただけでは不完全になってしまう。そこで、本研究では、 C^{-1} において対応付けのない点は、最も近い対応付けを持つ組合せの観測値で補完することで完全なルックアップテーブルを得る。

3.3. 投影色の心理物理色への変換関数

本研究では、心理物理色として代表的な均等色空間である CIE $L^*a^*b^*$ を用いる。 $L^*a^*b^*$ は、小色差の問題に応用されることから、本研究のような微小な色差の定量化に向いているといえる[9]。

$L^*a^*b^*$ 値は、三刺激値である XYZ 値で定量的に表されるため、 H の定式化を考える際には、ある入力輝度値に対するプロジェクタ光の分光分布を知る必要がある。しかし、分光分布の測定には膨大な時間と労力を要する。そこで本研究では、近年一般的になりつつある sRGB での出力が可能なプロジェクタを用いる。sRGB とは、IEC (International Electrotechnical Commission) で定められた色空間の国際標準規格である。sRGB は異なる環境間で色の再現性を確保するために定められた色空間であるため、CIE XYZ 値との変換式が定義されている。これを利用し、分光分布の測定を行うことなく、投影色の心理物理色への変換関数 H が求まる[10]。なおこのとき、 $L^*a^*b^*$ から XYZ、XYZ から sRGB への変換式も定義されているため、 H^{-1} も同時に求まる。

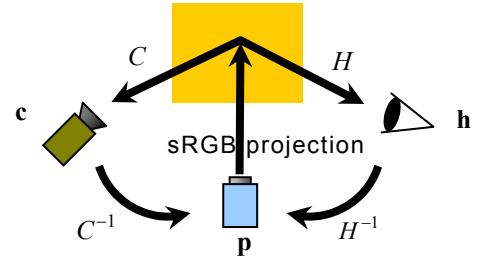


図 2：各色の相互変換

3.4. 色差へのパターン埋め込み

以上のようにして変換関数を求めることにより、図 2 のように投影色 $\mathbf{p}$ とカメラ観測色 $\mathbf{c}$ と心理物理色 $\mathbf{h}$ の相互変換が可能となる。これらの変換に基づいてカメラと人間の感度特性の違いを利用し、2 枚の画像間の色差に 2 値パターンの埋め込みを行う。本稿では、この 2 枚の画像をポジ画像・ネガ画像と呼び、2 値のことをポジ値・ネガ値と呼ぶ。ポジ画像とネガ画像では、ポジ値とネガ値の関係が逆になっている。

ある投影色 $\mathbf{p}$ に対応するポジ値 $\mathbf{p}_{posi}$ とネガ値 $\mathbf{p}_{nega}$ 、心理物理色空間上でのポジ値とネガ値の色差ベクトル $\Delta \mathbf{h}$ 、カメラ観測色のポジ値とネガ値の色差ベクトル $\Delta \mathbf{c}$ を次式のように定める。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{posi} &= \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}_{posi} \\ \mathbf{p}_{nega} &= \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}_{nega} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{h} = \mathbf{h}_{posi} - \mathbf{h}_{nega} \quad (3)$$

$$\Delta \mathbf{c} = \mathbf{c}_{posi} - \mathbf{c}_{nega} \quad (4)$$

このとき、 $\mathbf{h}_{posi} = H(\mathbf{p}_{posi})$ 、 $\mathbf{h}_{nega} = H(\mathbf{p}_{nega})$ 、 $\mathbf{c}_{posi} = C(\mathbf{p}_{posi})$ 、 $\mathbf{c}_{nega} = C(\mathbf{p}_{nega})$ である。この $\Delta \mathbf{p}_{posi}$ と $\Delta \mathbf{p}_{nega}$ を、人間に最も見えづらいように定める。つまり、心理物理色空間上での距離 $\|\Delta \mathbf{h}\|$ が最小になるような $\Delta \mathbf{p}_{posi}$ と $\Delta \mathbf{p}_{nega}$ を求める。

しかし、埋め込んだパターンを安定して抽出するためには、カメラからは色差が常に認識が可能でなければならない。この要件を満たすため、カメラ観測色上でのポジ値とネガ値の色差ベクトル $\Delta \mathbf{c}$ を、以下の条件を満たすように定める。まず、 $\mathbf{c}_{posi}$ と $\mathbf{c}_{nega}$ は、(1) 式の $\mathbf{c}$ に関して、(5) 式の条件を満たすよう定める。

$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{c}_{posi} + \mathbf{c}_{nega}}{2} \quad (5)$$

また、観測色のポジ値とネガ値において、確保されるべき距離を t とすると、 $\Delta \mathbf{c}$ は (6) 式を満たす必要がある。

$$\|\Delta \mathbf{c}\| \geq t \quad (6)$$

t は、スクリーン物体が 3 次元形状を持つことや、観測誤差があることを考えて、ある程度の大きさを持た

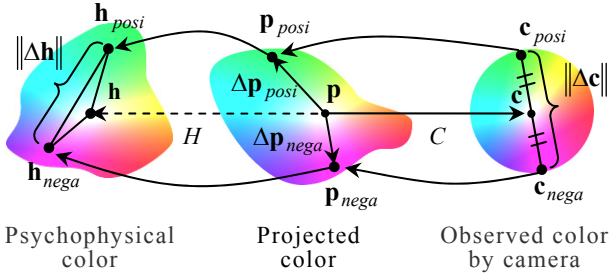


図3：ポジ値とネガ値の計算

せることが望ましい。

上記式の意味は、図3に示すように、まずカメラ観測色空間上において投影色 $\mathbf{p}$ との対応点を中心とした $\|\Delta\mathbf{c}\|$ を直径とする球面上の2点を選択し、その2点を C^{-1} を用いて投影色に逆変換する。次に、その2点を H を用いて心理物理色に変換し、距離 $\|\Delta\mathbf{h}\|$ を計算する。この計算を繰り返し、 $\|\Delta\mathbf{h}\|$ が最短となるようなポジ値とネガ値の組合せを見つける。全ての投影色 $\mathbf{p}$ に対する $\mathbf{p}_{posi}$ と $\mathbf{p}_{nega}$ の計算を行い、ルックアップテーブルを作成しておく。

3.5. パターンの抽出

次に、前節の方法で埋め込まれたパターンを、キャプチャしたポジ画像とネガ画像から抽出する方法について述べる。

ポジ画像とネガ画像のある画素の実際の観測色をそれぞれ $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$ とする。この2値から色差を埋め込む前の投影色が推定できれば、その値のポジ値とネガ値を投影したときの観測色が推定でき、 $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$ がポジ値であるかネガ値であるかの判別ができる。

まず、(5)式より $\mathbf{c}$ の推定値 $\hat{\mathbf{c}}$ は、

$$\hat{\mathbf{c}} = \frac{\mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2}{2} \quad (7)$$

と求めることができる。ここで、投影色の推定値 $\hat{\mathbf{p}}$ は、

$$\hat{\mathbf{p}} = C^{-1}(\hat{\mathbf{c}}) \quad (8)$$

である。次に、 $\hat{\mathbf{p}}$ に対応するポジ値 $\hat{\mathbf{p}}_{posi}$ とネガ値 $\hat{\mathbf{p}}_{nega}$ は前節で作成したルックアップテーブルより既知であるため、カメラ観測色の推定ポジ値 $\hat{\mathbf{c}}_{posi}$ と推定ネガ値 $\hat{\mathbf{c}}_{nega}$ は、 $\hat{\mathbf{c}}_{posi} = C(\hat{\mathbf{p}}_{posi})$, $\hat{\mathbf{c}}_{nega} = C(\hat{\mathbf{p}}_{nega})$ より求まる。推定ポジ値 $\hat{\mathbf{c}}_{posi}$ と推定ネガ値 $\hat{\mathbf{c}}_{nega}$ の推定色差ベクトル $\Delta\hat{\mathbf{c}}$ を、

$$\Delta\hat{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{c}}_{posi} - \hat{\mathbf{c}}_{nega} \quad (9)$$

とする。観測色の色差ベクトル $\Delta\mathbf{c}'$ も同様に、

$$\Delta\mathbf{c}' = \mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2 \quad (10)$$

と定義する。この画素点がポジ値であるかネガ値であるかの判別式は(11)式のようになる。

$$\begin{cases} posi: \Delta\mathbf{c}' \cdot \Delta\hat{\mathbf{c}} \geq 0 \\ nega: \Delta\mathbf{c}' \cdot \Delta\hat{\mathbf{c}} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

これは、実測値の色差ベクトル $\Delta\mathbf{c}'$ と、推定値の埋め込み方におけるポジ方向への推定色差ベクトル $\Delta\hat{\mathbf{c}}$ との相関で判定していることに相当する。

4. 物体追跡

4.1. 問題設定

3章の手法を用いることで、任意の2値パターンを2枚の画像間の色差に埋め込み、抽出を行うことができる。本章では、スクリーン物体の追跡を行うためには具体的にどのようなパターンを埋め込めばよいかを検討する。

本研究では、スクリーン物体は白色完全拡散反射面の剛体であると仮定する。また、スクリーン物体の3次元形状はあらかじめ計測しておき、登録しておくものとする。シーンの3次元形状を復元し、あらかじめ登録しておいたスクリーン物体の3次元形状と照合することで、スクリーン物体の位置・姿勢の推定を行う。

なお、本稿では問題の簡単化のために、スクリーン物体として半径が既知である半球を用いる。この仮定により姿勢推定の計算を省き、位置推定問題のみを取り扱う。

4.2. 疎な形状復元

プロジェクタからシーンに情報を投影し、カメラで撮影することによりシーンを解析するという、いわゆるアクティブビジョンは数多くの研究がなされており、中でも空間コード化光投影法は基本的かつ有効な3次元復元方法である[11]。空間コード化光投影法では、プロジェクタ座標をカメラ座標と対応付けるために、プロジェクタ座標の分解能のビット数と同じフレーム数のパターンを投影する必要がある。本研究では、空間コード化光投影法を応用した疎な3次元復元によって物体追跡を行う。

しかし、本研究のように動的なシーンを扱うためには、できるだけ少ないフレーム数の情報からプロジェクタ座標が取得できることが望ましい。例えば、帯状の模様を等間隔に並べ、その帯が左から何番目であるかを認識することができれば、帯の両端におけるプロジェクタ座標が取得できる。そこで本研究では、図4のように等間隔に配置された帯に、その帯のIDを示す0/1のビットパターンを付加したパターンを用いる。以降、このパターンをIDスリットと呼ぶ。IDスリットをプロジェクタから投影し、カメラ画像を「0, 1, 帯以外」に3値化することで、離散的にカメラ座標とプロジェクタ座標の対応を表した離散的コード画

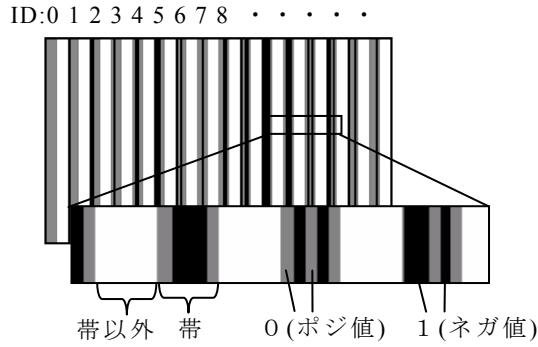


図 4 : ID スリット

像を取得する．この 0 と 1 が，3 章のポジ値，ネガ値に相当する． $\|\Delta \mathbf{c}'\|$ が閾値以下の場合には，帯以外と判定する．

また，床面のコード画像をあらかじめ獲得しておき背景コード画像とする．取得したシーンの離散的コード画像において，背景コード画像との差が閾値以下の場合には床面とみなし削除しておくことで，図 5 右上のようなスクリーン物体のみのコード画像を得ることができる．このように獲得したコード画像と，あらかじめキャリブレーションで求めておいたプロジェクタとカメラの射影行列を用いることで，図 5 下のようにスクリーン物体のみの疎な 3 次元形状復元を行う．

4.3. 位置推定

スクリーン物体の位置は，得られた 3 次元形状と，あらかじめ登録しておいたスクリーン物体の 3 次元形状を手掛かりに求める．しかし，得られた 3 次元形状は，コード画像生成時の 3 値化誤りや ID スリットの誤読によって，大きな外れ値を含んでいる可能性がある．そこで本研究では，ロバスト推定法の一つである RANSAC によって位置を推定する．

以下に具体的な処理を述べる． k 回目のサンプリングにおいて， n 個の点群データから，ランダムに 3 点を選択し，スクリーン球の半径 R が既知であることを利用して，その 3 点を通る球の中心 $\mathbf{o}_k$ を求める．復元された 3 次元形状の i 番目の点座標を $\mathbf{q}_i$ とすると， $\mathbf{o}_k$ から $\mathbf{q}_i$ までの距離は， $r_{ki} = \|\mathbf{o}_k - \mathbf{q}_i\|$ と表すことができる．このとき，半径の許容誤差を m ，評価関数 $e(r_{ki})$ を，

$$e(r_{ki}) = \begin{cases} 1 & : |R - r_{ki}| \leq m \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

とすると，推定された球の中心の評価関数 $S(k)$ は，

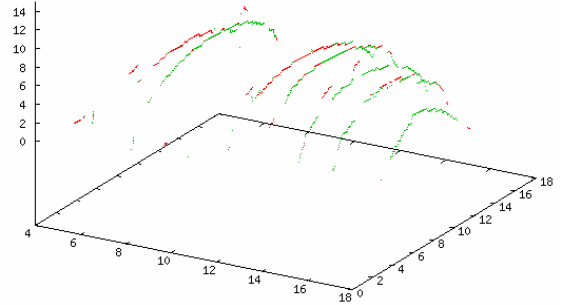
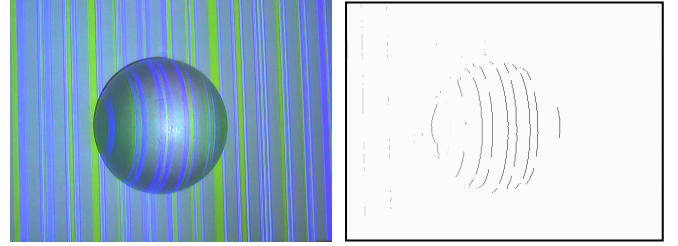


図 5 : 投影された ID スリットのポジ画像 (左上)，得られた離散的コード画像 (右上)，得られた疎な 3 次元形状 (下)

$$S(k) = \sum_{i=1}^n e(r_{ki}) \quad (9)$$

となり， $S(k)$ が最大となる $\mathbf{o}_k$ をスクリーン球の推定中心位置とする．

なお，スクリーン物体が球形状でない場合には，位置・姿勢推定の計算量が増加するが，基本的には同じ枠組みで考えることができるため，一般形状のスクリーン物体の場合にも拡張が可能である．

5. 実験

5.1. 処理の流れ

図 6 に本システムの処理の流れを示す．スクリーン物体が動いていないときは同じ画像を投影し続ける．フレーム間差分をもとにシーンの変化を検出すると，投影画像に 3 次元形状復元の手掛かりとなるパターンを埋め込んだ画像を投影する．次に，カメラでシーンをキャプチャして，埋め込んだパターンのみを抽出する．そのようにして得られたパターンを元に，疎な形状復元を行う．そして，あらかじめ登録しておいたスクリーン物体形状を手掛かりに，スクリーン物体の位置姿勢を推定し，新しいシーンに対応した画像の生成・投影を繰り返す．

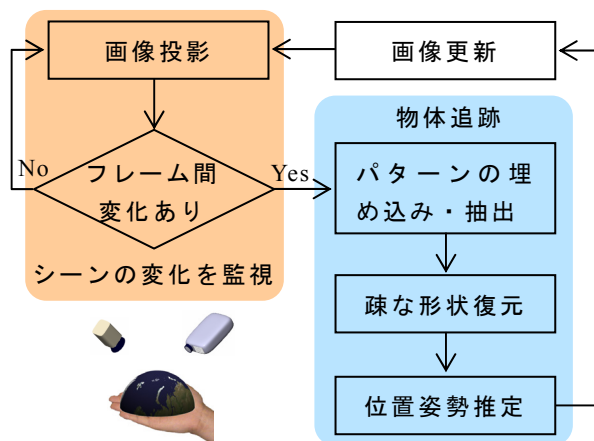


図 6：本システムの処理の流れ

5.2. 実験結果

プロジェクタは EPSON EMP-74 を、カメラは SONY DFW-VL500 を、PC は Pentium4 2.53GHz を用いて実験を行った。機材は図 7 左上のような配置とした。図 7 右上のように、スクリーン物体が動かされてテクスチャの位置がずれても、人の目には見えにくいよう ID スリットが埋め込まれた画像を投影し、図 7 左下のように抽出された ID スリット情報から 3 次元形状を復元する。そして、シーンの 3 次元形状と球のモデルを照合し、球の位置を推定することで、図 7 右下のようにスクリーン物体の位置を推定し適切な位置に描画を行うことができる。

また、図 7 右上と図 7 右下を見比べてみると、ID スリットを埋め込んだことによる画質の劣化は、人間にはわずかにしか知覚できない程度であることが分かる。

6. まとめ

本稿では、プロジェクタ 1 台、カメラ 1 台というシンプルな機器構成で、シーンへの投影とスクリーン物体の追跡を同時に行う手法を提案した。カメラと人間の視覚の感度特性の違いを考慮したパターン埋め込みを行うため、sRGB 規格を用いた投影色を介することでカメラ観測色と心理物理色を比較し、カメラで観測できる最低限の色差を確保しつつ、人間には見えづらい色差を埋め込むことができた。また、このパターン埋め込みを利用して、動的シーンへ適応的な投影を行うシステムを構築し、その有効性を確認した。

プロジェクタが家庭にも急速に一般化しつつある昨今、本研究のように一般的な機器のみで構成されるシステムは、家庭で利用できる複合現実感を見据えた場合、その意義は大きいと考えられる。

文 献

[1] R.Raskar, G.Welch, K.Low and D.Bandyopadhyay,

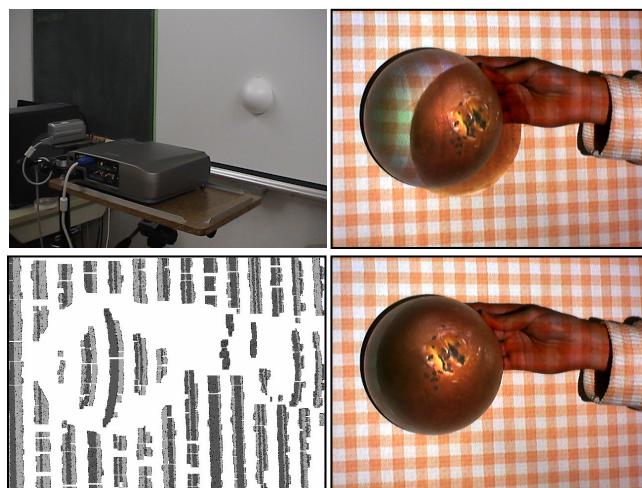


図 7：実験環境（左上）、投影されたポジ画像（右上）、パターン抽出結果（左下）、半球推定位置にテクスチャを投影した結果（右下）

- “Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination”, Proc. Eurographics Rendering Workshop (ERGW2001), pp.89-102, 2001.
- [2] Y.Mukaigawa, H.Nagai and Y.Ohta, " SpaceRelighter -Recording and Reproducing Illumination in a Real Scene-", Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.109-118, Nov. 2004.
- [3] 向川康博, 西山正志, 尺長健, “スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1448-1455, Jul.2001.
- [4] 向川康博, 西山正志, 尺長健, “仮想光学環境における実物体反射特性の学習”, 文化財のデジタル保存 自動化手法開発プロジェクト平成 13 年度成果報告会, pp.75-85, Mar.2002.
- [5] H.Ishii, and B.Ullmer, “Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms”, Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI1997), ACM Press, pp.234-241, Mar.1997.
- [6] D.Bandyopadhyay, R.Raskar, and H.Fuchs, “Dynamic Shader Lamps: Painting on Real Objects”, Proc. International Symposium on Augmented Reality (ISAR2001), pp.207-216, 2001.
- [7] 永井悠文, 向川康博, 大田友一, “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(FIT2004), 情報科学技術レターズ, Vol.3, pp.179-182, Sep.2004.
- [8] D.Cotting, M.Naef, M.Gross, and H.Fuchs, “Embedding Imperceptible Patterns into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display”, Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2004), pp.100-109, Nov.2004.
- [9] 日本色彩学会, “色彩科学ハンドブック”, 東京大学出版会, 1989.
- [10] R.W.G.Hunt, “MEASURING COLOUR”, ELLIS HORWOOD, 1991.
- [11] 井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990.