

角膜フィードバックによるHUDの自動キャリブレーション

南 勇氣¹ 中澤 篤志¹ 西田 豊明¹

概要：拡張現実感 (Augmented Reality: AR) は、現実世界のオブジェクトに関連する情報を重畳表示する技術であり、その潜在的な応用分野の広さも相まって新たな情報提示の手段として期待されている。拡張現実感を実現するための装置として、ヘッドアップディスプレイ (Head Up Display: HUD) がある。これは、視野の前方に置かれるディスプレイ装置で、ハーフミラーによって、前方の映像と仮想映像を重畳表示させることができる。戦闘機用の表示装置として開発されたこの装置は、飛行機やヘリコプターなどの操縦席に設置された計器表示装置や、自動車の運転席に設置されたカーナビゲーション表示装置として実用化されている。しかし、現在の HUD では、計器類など既存のシステムの情報をスクリーンに出力するにとどまっており、現実世界の情報を取得し、それに対応して画像を出力するようなシステムはまだ実用化されていない。この出力の位置合わせが行えるようになれば、HUD の利用可能性が高まり、有用であるので、これを実現するための手法として、本稿では角膜反射を利用したキャリブレーション法を提案する。

1. はじめに

拡張現実感 (Augmented Reality: AR) は、現実世界のオブジェクトに関連する情報を重畳表示する技術であり、その潜在的な応用分野の広さも相まって新たな情報提示の手段として期待されている。その中心課題は現実世界と仮想世界を違和感のないように継ぎ目なく融合させることであり、従来から、幾何学的整合性を扱う研究や、光学的整合性を扱う研究がされている [1]。現実世界とには、ビデオシースルー方式と光学シースルー方式がある。ビデオシースルー方式とは、現実世界の様子をビデオカメラで撮影し、仮想世界の映像と合成してディスプレイに表示する方式である。この方式では、現実世界に仮想世界の情報を重畳表示させる際に、撮影した映像の上で重畳させればよいので、機器のキャリブレーションが必要なく、また、システムが処理を終えてから情報を表示させることで、現実世界と仮想世界の間で同期を取ることができる。その反面、カメラが現実世界を撮影してから、仮想世界と合成させてディスプレイに表示させるまでにはラグが存在することや、ユーザの目とカメラとの位置ずれや、人間の角膜の分解能と、カメラやディスプレイの解像度との差によって、違和感が発生することなどが欠点である。これに対して、光学シースルー方式とは、ディスプレイ装置がハーフミラーでできており、現実世界の様子は透過させ、仮想世界の様子はディスプレイの出力を反射させることで、スク

リーン上で合成を行う方式である。この方式では、現実世界の様子はユーザが直接目にするので、ラグは存在しない。その反面、カメラが現実世界を撮影してから、処理を行い、仮想世界をディスプレイに表示させるまでの時間が、そのまま現実世界と仮想世界の間のラグとなる。よって、この方式は車の運転や、飛行機の操縦などの、現実世界の情報の時間的な遅れが許容できない状況に適している。

拡張現実感を実現するための装置としては、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) や、ヘッドアップディスプレイ (Head Up Display: HUD) などがある。HMD は、頭部に装着するディスプレイ装置であり、ビデオシースルー方式、光学シースルー方式の両方が採用され、すでに製品化されている。HUD は、視野の前方に置かれるディスプレイ装置で、光学シースルー方式が採用されており、飛行機やヘリコプターなどの操縦席に設置された計器表示装置や、自動車の運転席に設置されたカーナビゲーション表示装置として実用化されている。戦闘機用の表示装置として開発された [2] ヘッドアップディスプレイは、従来の計器を直接見る動作と比較して、現実世界、つまりユーザの普段の視点により近い場所に重畳させて表示させていることにより、視線の移動量が少なく、また、ディスプレイの出力が従来よりも奥に結像するので、普段の視点との遠近調節量が少ない。このように、パイロットが表示情報に従来よりアクセスしやすく、優れたヒューマンインターフェースとして注目されている。現在、実用化されている HUD は、スピードメーターなどの計器類や、カーナビゲーションシステムのような、既存のシステムの

¹ 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

情報を HUD に出力するにとどまっている。つまり、現実世界の情報を取得し、それに対応して画像を出力するようなシステムはまだ実用化されておらず、出力の位置合わせが行えるようになれば、HUD の利用可能性が高まり、有用である。

光学シースルー方式の HMD については、現実世界の情報に合わせて、出力する仮想世界の映像の位置合わせを行う研究が行われている。現実世界に対して仮想物体を重畳表示するには、ユーザの視点移動にともなって像の位置ずれが起こらないように、現実世界と仮想世界の座標系を一致させる必要がある。光学シースルー方式ではユーザの(目の)位置、スクリーンの位置、目標物の三者の位置関係によって、ユーザ視点での出力画像と目標物の位置関係が決まるが、HMD においては、装置を頭に固定する性質上、ユーザの目とスクリーンとの位置関係は固定され、またこの関係は既知であるので、位置合わせを行う場合、ユーザの目と目標物との位置関係が重要になるが、HUD においては、ユーザの目とスクリーンとの位置関係は固定されておらず、頭が動くなどしてこの位置関係が変化すると、図 1 に示すようにユーザ視点での出力画像と目標物の位置関係が変化してしまう。

そこで、本稿では角膜反射を利用したキャリブレーション法を提案する。この手法では、人間の角膜表面に、その人が見ている景色が映り込むことを利用する。つまり、ビデオカメラを用いて角膜表面を撮影すれば、ユーザが見ている景色の情報が得られるので、取得した角膜イメージ上で目標物と出力画像が重畳するように位置合わせを行うことで、ユーザ視点では両者が重畳して表示される。また、ユーザの目の位置、スクリーンの位置、目標物の三者の位置関係が変化した場合に、角膜イメージからディスプレイと目標物との位置関係が取得できれば、キャリブレーションを維持することができる。本稿のシステムでは、角膜イメージから目標位置やディスプレイ領域を検出するために赤外線 LED のマーカーを使用し、ディスプレイ領域の検出に複比の性質を利用することで信頼性を高めた。また、提案した手法によるシステムを実際に制作し、その性能を評価した。

2. 関連研究

本章では HUD や HMD のキャリブレーションに関する関連研究を挙げ、本研究の位置づけを明確にする。

現実空間に仮想空間の情報を重畳表示することで、現実の感覚を増強する拡張現実感、複合現実感 (Mixed Reality: MR) に関しては古くから研究がなされている。P.Milgram ら [3] は、テレロボティクス分野を中心に現実世界と仮想世界の融合について研究していたが、1994 年に Mixed Reality という概念を提唱した。現実空間と仮想空間の位置合わせをどのようにして実現するか、というテーマは

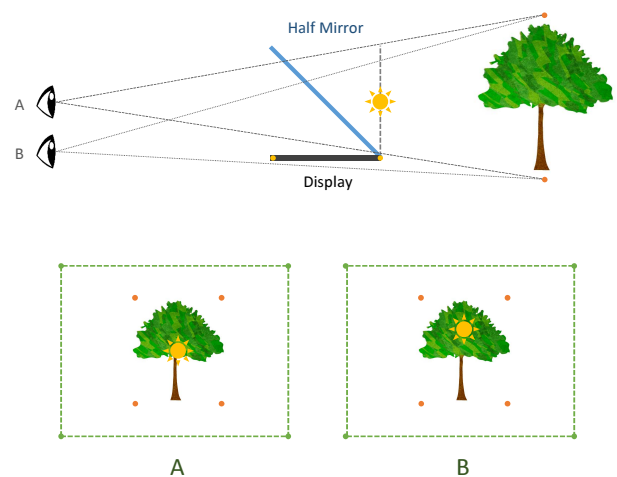


図 1 ユーザの視点による見え方の変化

MR 分野における最重要課題の一つであり、HMD においては、ユーザの視点の変化を計測するために、機械式センサ、磁気センサ、超音波センサといった位置姿勢センサが利用されてきた。例えば、光学シースルー方式の HMD のキャリブレーションについては、佐藤ら [4] が磁気センサから得た情報を画像情報に基づいて補正する手法を、加藤ら [5] が現実世界のマーカーを利用した手法を提案している。一方、HUD においてはキャリブレーションの研究はあまり行われていない。Goteman ら [6] は、HUD を用いて速度ベクトルを表示することにより、認知不可を減らし、着陸のシミュレーションにおいて、横方向のずれを減少させることに成功した。

車の運転席で用いられる HUD では、Charissis ら [7] は、運転手の視点で、前方の車にアイコンを重畳表示させる際のキャリブレーションについて、運転手の頭の位置と車との位置関係からスクリーン平面上の位置合わせを行い、また、頭からディスプレイまでの距離と、頭から車までの距離の比を用いて、アイコンの大きさを変更するという手法を提案した。この手法では、運転手の頭の位置が動いたときに、アイコンと車との位置関係がずれてしまう問題がある。これを防ぐためには、頭の位置を常にトラッキングしておき、ずれが生じたときにキャリブレーションをやり直す、という方法が考えられるが、本研究では別のアプローチからこの問題の解決を試みる。Nitschke ら [8] は、幾何学的眼球モデルを構築することで、角膜表面反射から、人間が見ているシーン画像を復元する手法について述べている。また、Plopski ら [9] は、角膜表面反射を用いた、光学シースルー方式の HMD のキャリブレーション手法を提案している。本研究では、これらの手法を HMD に応用することで、自動的にキャリブレーションを行うシステムの設計を目指す。また、角膜表面反射から、容易にディスプレイの画面領域が検出できるよう、カメラに IR フィルタを装着し、赤外線 LED をマーカーとして用い、その光のみを撮影する。ディスプレイの画面領域と、目標物のマ

カーを区別する必要があるが、鈴木ら [10] や金澤、松永ら [11], [12] のように複比の性質を利用してマーカーに ID 付けを行い、識別することでこれを解決する。

3. 提案手法

HUD を用いて、現実世界のマーカーに重畳するようにスクリーン上に画像を表示させる問題を考える。この問題に対して、本稿では角膜フィードバックによるキャリブレーションシステムを提案する。

3.1 手法概要

システム利用者の角膜を撮影した画像(以降、角膜イメージと呼ぶ)から、マーカーとディスプレイの出力画像の位置関係を解析し、キャリブレーションを行う手法である。システム利用者は、マーカーとハーフミラーによって反射されたディスプレイの画面(以降、スクリーンと呼ぶ)全域が視界に入った状態になるように、適切な位置で前方を見る。その状態で、カメラを用いてシステム利用者の角膜を撮影する。このようにして得られた角膜イメージは、システム利用者が現在、実際に見ている景色に他ならないので、角膜イメージ上でマーカーとディスプレイの画像が重畳するように出力の位置合わせを行うことで問題が解決できる。キャリブレーションの結果は次回の角膜イメージにフィードバックされるので、誤差評価などに有用である。既存の方法では、利用者と HUD とマーカーの三者の位置関係が既知でないと上手く位置合わせが行えないが、この手法では、角膜イメージ上で位置合わせを行うため、これらの関係が既知でなくとも適用できるという利点がある。

3.2 角膜フィードバック法

キャリブレーションの手法について具体的に述べる。マーカーがシステム利用者の角膜イメージ上で、ディスプレイ領域とどのような位置関係にあるか、つまり、ディスプレイ座標系におけるマーカーの座標 (M_x, M_y) が既知であれば、その座標に画像を出力することで、角膜イメージ上でマーカーと出力画像を重畳させることができる。 (M_x, M_y) を得るには、カメラ座標系におけるマーカーの座標 (m_x, m_y) と、カメラ・ディスプレイの両座標系におけるディスプレイの画面領域どうしの対応関係が分かればよく、このうち (m_x, m_y) はシステム利用者の角膜イメージから直ちに得られる。また、角膜イメージにはディスプレイの画面全域が映り込むので、その頂点の座標とディスプレイ座標系における頂点の座標とを比較することで、ディスプレイの画面領域どうしの対応関係が得られる。

今回は、問題を簡単にするために、球面である角膜の表面を平面に近似して考える。この仮定を用いると、カメラ・ディスプレイ両座標系におけるディスプレイの画面領域どうしの対応関係を平面上のアフィン変換で表すことが

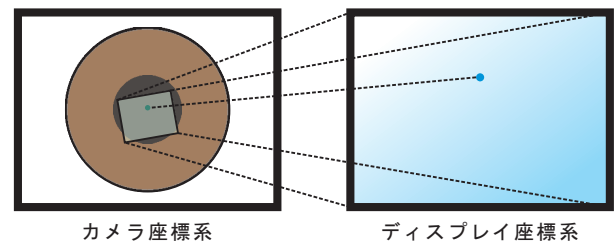


図 2 画面領域の対応関係

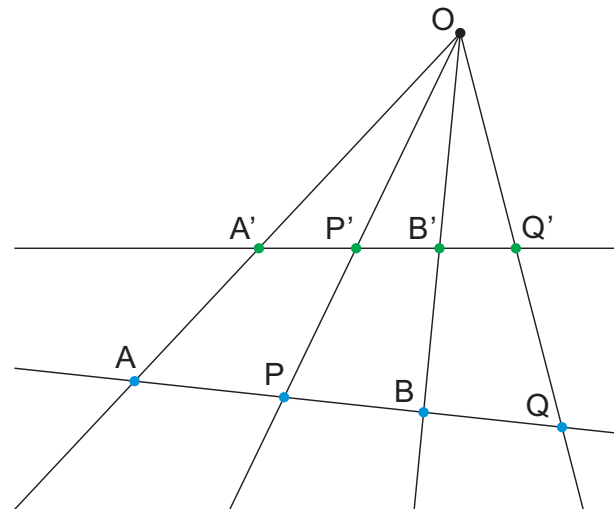


図 3 複比

できる。また、カメラに赤外線フィルターを装着し、可視光の情報をカットしたうえで、ディスプレイの外周に赤外線 LED を設置し、マーカーにも同じく赤外線 LED を用いる。これにより、角膜イメージには赤外線 LED による光点のみが明るく映るので、ディスプレイの画面領域やマーカーを識別しやすくなる。この状態では、角膜イメージ上の光点が、それぞれマーカーの赤外線 LED、ディスプレイの外周に設置した赤外線 LED、または意図しないノイズのいずれによるものかを判別する必要があるが、本手法ではそのために複比の性質を用いる。複比を用いた判別についての詳しい解説は第 3.3 節で述べるが、複比の性質を用いるために、ディスプレイの外周のうち、向かい合う 2 辺に 4 つずつ赤外線 LED を、合計 8 つ設置する。各々の辺の赤外線 LED の複比を ID 情報として用いて、角膜イメージ上から同じ ID 情報を持つ点群を探し、ID 情報が一致した点群が 2 種類見つかったら、それらの頂点どうしを結ぶことでディスプレイの画面領域が得られる。また、その際に用いられなかった光点はマーカーであると判別できる。

3.3 複比の性質

同一直線上にある 4 点の複比 $cr(A, B; P, Q)$ は以下のように定義される。

$$cr(A, B; P, Q) = \frac{AP}{BP} \cdot \frac{BQ}{AQ} \quad (1)$$

任意の直線への射影変換による像を A', P', B', Q' とする。

$\triangle AOP$ の面積 $S_{\triangle AOP}$, $\triangle BOP$ の面積 $S_{\triangle BOP}$ はそれぞれ以下の式で与えられる .

$$S_{\triangle AOP} = \frac{1}{2} \cdot OP \cdot OA \sin \angle AOP \quad (2)$$

$$S_{\triangle BOP} = \frac{1}{2} \cdot OP \cdot OB \sin \angle BOP \quad (3)$$

よって

$$\frac{AP}{BP} = \frac{OA \sin \angle AOP}{OB \sin \angle BOP} \quad (4)$$

$\triangle BOQ$, $\triangle AOQ$ についても同様に

$$\frac{BQ}{AQ} = \frac{OB \sin \angle BOQ}{OA \sin \angle AOQ} \quad (5)$$

したがって , 複比 $cr(A, B; P, Q)$ は

$$\begin{aligned} cr(A, B; P, Q) &= \frac{AP}{BP} \cdot \frac{BQ}{AQ} \\ &= \frac{\sin \angle AOP \sin \angle BOQ}{\sin \angle BOP \sin \angle AOQ} \end{aligned} \quad (6)$$

となる . ここで

$$\sin \angle AOP = \sin \angle A'OP' \quad (7)$$

$$\sin \angle BOP = \sin \angle B'OP' \quad (8)$$

$$\sin \angle AOQ = \sin \angle A'OQ' \quad (9)$$

$$\sin \angle BOQ = \sin \angle B'OQ' \quad (10)$$

であるから , 複比 $cr(A', B'; P', Q')$ は

$$\begin{aligned} cr(A', B'; P', Q') &= \frac{\sin \angle A'OP' \sin \angle B'OQ'}{\sin \angle B'OP' \sin \angle A'OQ'} \\ &= \frac{\sin \angle AOP \sin \angle BOQ}{\sin \angle BOP \sin \angle AOQ} \\ &= cr(A, B; P, Q) \end{aligned} \quad (11)$$

以上より , 「複比は射影変換によって不変」という性質が得られる . つまり , 角膜の表面を平面に近似して考えたとき , ディスプレイの外周に設置した赤外線 LED の複比は角膜イメージ上でも保存される . よって , 角膜イメージから特定の複比をもつ点群を見つければ , それがディスプレイの画面領域のうちの一边であると判断できる .

4. システム構成

4.1 ハードウェア構成

システムの主な構成要素は以下の通りである .

- ハーフミラー
- ディスプレイ
- マーカー
- カメラ
- コンピュータ

ディスプレイには , Dell 社製の OptiPlex USFF 用 1707FP AIO を用いた . 画面の寸法は水平方向が 337mm (13.3 インチ) , 垂直方向が 270mm (10.6 インチ) の 17 型で , 解像度

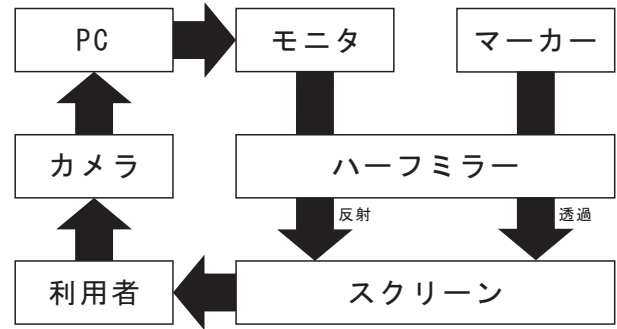


図 4 データフローチャート

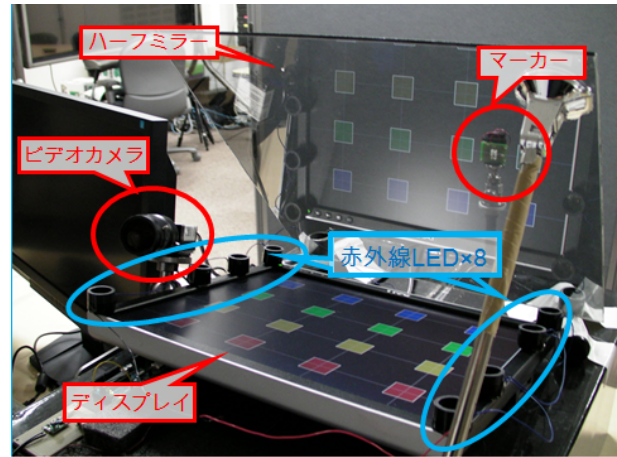


図 5 システムの全体図

は 1280×1024 画素である . ハーフミラーの寸法は水平方向 , 垂直方向ともに 400mm である . カメラは Point Grey 社製の Grasshopper3 GS3-U3-23S6C-C を用いた . レンズは SPACE 社製 TV555MIR (f=5-55mm) を用いた . このカメラはコンピュータに USB3.0 接続し , 解像度は最大で 1920×1200 画素 , フレームレートは最大で 162fps である . 本手法では , 画面中央 480×320 画素の領域をトリミングして用い , フレームレートは 30fps 固定とした . レンズ (型番など) を用いて実験した . 画像処理を行うコンピュータの OS は Windows8.1 Enterprise , CPU は Intel Corei7-4790K 4.00GHz , メモリは 32GB である .

図 4 にシステムのデータフローチャートを , 図 5 にシステムの全体写真を示す . ディスプレイの四隅には赤外線 LED (Dragon1IR PowerStar , ピーク波長 850nm , 出力 950mW) を設置し , またシステム利用者から見て左右の辺にはそれぞれ 2 つの赤外線 LED を追加で設置している . また , 赤外線 LED からの直接光が角膜に映らないように , 赤外線 LED にはそれぞれ塩ビ製のパイプで覆いがされている . 今回の実験では図 6 に示すように , 左辺には全体を 1 : 1 : 2 に内分するように , 右辺には全体を 1 : 2 : 1 に内分するように赤外線 LED を設置した . 左辺の 4 つの赤外線 LED からなる複比を CR_{left} , 右辺の 4 つの赤外線 LED からなる複比を CR_{right} とすると , それぞれ式 (12) , 式 (13) で求められる .

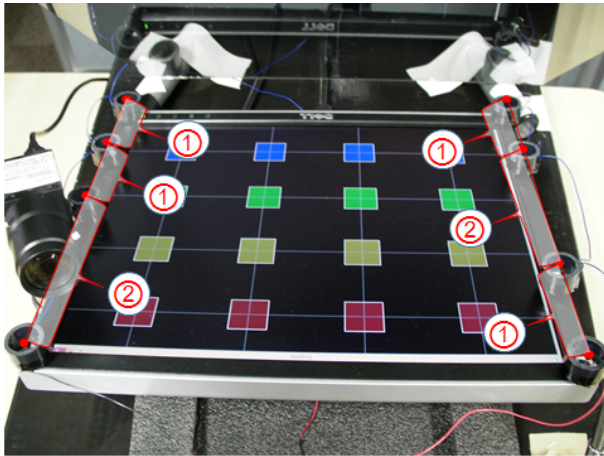


図 6 赤外線 LED の位置関係

$$CR_{left} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2}{4} = 0.5 \quad (12)$$

$$CR_{right} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} = 0.125 \quad (13)$$

4.2 アルゴリズム

コンピュータ内での処理は、大きく 5 つに分割できる。最初の処理は入力された画像から、赤外線 LED による光点を検出する処理である。2 つ目の処理は、得られた光点のうちディスプレイの外周の赤外線 LED によるものを識別し、ディスプレイ領域の 4 頂点の座標値を求める処理である。3 つ目の処理は、残った光点の中からマーカーを識別し、そのカメラ座標系における座標値を求める処理である。4 つ目の処理は、得られた 4 頂点の座標値を用いてカメラ座標系からディスプレイ座標系への座標変換行列を求める処理である。最後の処理は、得られたマーカーの座標と座標変換行列から、角膜イメージ上でマーカーに重畳するように画像を描画する処理である。以下の節では、それぞれの処理について説明する。

4.2.1 カメラから画像を取得

入力された画像 (480 × 320 画素) を、グレースケールに変換した後、固定閾値により 2 値化する。

4.2.2 ディスプレイ領域の推定

得られた 2 値画像中の小領域を扱うためにラベリングを行い、各領域にそれぞれ 1, 2, ..., n のラベルを貼る。この処理には、ラベリングクラス [13] を用いている。次に、ラベリングされた各領域 i ($1 \leq i \leq n$) の重心を求め、それら



[1] 入力画像

[2] 2 値化画像

図 7 画像の変換例

の集合を P とする。集合 P の要素からランダムに選ばれた 4 点からなる点群 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ に対して、映り込んだディスプレイ領域の一边であるかどうかの識別を行う。ディスプレイ領域の一边であるための必要十分条件は

- (i) 点群が同一直線上に位置している
- (ii) 点群の複比が CR_{left} か CR_{right} に一致している

の両方を満たすことであるから、まず、点群 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ に対して式 (14) で定義される直線度 I [14] を求める。

$$I = \frac{\sqrt{4\sigma_{11}^2 + (\sigma_{20} - \sigma_{02})^2}}{\sigma_{20} + \sigma_{02}} \quad (14)$$

ただし

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^i (y_k - \bar{y})^j$$

(x_k, y_k) : 点 p_k の座標

直線度 I は 0 から 1 の値をとり、1 に近いほど直線性が保証され、0 に近いほど点群が無相関に分布することを意味する。点群 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ の直線度 I が 1 に十分近い値である場合、各点 p_1, p_2, p_3, p_4 は同一直線上にあるとみなして、複比 $(p_1, p_2; p_3, p_4)$ を計算する。複比 $(p_1, p_2; p_3, p_4)$ が CR_{left} に十分近い値である場合、点群 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ をディスプレイ領域の左辺であると判断し、 CR_{right} に十分近い値である場合は、ディスプレイ領域の右辺であると判断する。以上の処理をディスプレイ領域の左右両方の辺が見つかるまで点群の選出からやり直し、処理が終わったとき、2 辺の頂点によって囲まれる領域をディスプレイ領域であると判断する。

4.2.3 マーカーの座標の推定

ディスプレイ領域の 4 頂点の重心 g を求める。これをカメラ座標系でのディスプレイ領域の中心とみなし、 P からディスプレイ領域の外周の 8 点を除いたもののうち、 g に距離が一番近いものをマーカー m と判断する。

4.2.4 座標変換行列の算出

第 4.2.2 節でシステムがディスプレイ領域だと推定した入力画像中の小領域は、ディスプレイの外周に設置された赤外線 LED によって囲まれる領域であり、実際のディスプレイ領域より一回り大きい。この値を元に対応関係を計算すると、出力画像の位置は画面端になるほど歪みが大きくなる。この問題を回避するためには、第 4.2.2 節で推定した領域と、ディスプレイの画面領域とを対応させるのではなく、カメラ・ディスプレイの両座標系におけるで囲まれた領域どうしを対応させるようにすればよい。そのためには、ディスプレイの外周に設置した赤外線 LED のディスプレイ座標系における座標 $(X_k, Y_k | 1 \leq k \leq 4)$ が必要であるが、これはディスプレイのドットピッチ (画素の実空

間上での大きさ)と、画面の頂点と赤外線 LED 間の実空間上での距離が分かれば、計算で求められる。このシステムで使用したディスプレイのドットピッチは 0.264mm/px であり、四隅の赤外線 LED はすべて画面の頂点から水平、垂直ともに 8.0mm 離れた場所に設置してあるから、 $(X_k, Y_k | 1 \leq k \leq 4)$ はそれぞれ式 (15)、式 (16)、式 (17)、式 (18) で与えられる。

$$\begin{aligned} (X_1, Y_1) &= (0 - 8 \times 0.264, 0 - 8 \times 0.264) \\ &= (-2.112, -2.112) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (X_2, Y_2) &= (1279 - 8 \times 0.264, 0 - 8 \times 0.264) \\ &= (1276.888, -2.112) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} (X_3, Y_3) &= (0 - 8 \times 0.264, 1023 - 8 \times 0.264) \\ &= (-2.112, 1020.888) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (X_4, Y_4) &= (1279 - 8 \times 0.264, 1023 - 8 \times 0.264) \\ &= (1276.888, 1020.888) \end{aligned} \quad (18)$$

第 4.2.2 節で、これら (X_k, Y_k) のカメラ座標系における座標 $(x_k, y_k | 1 \leq k \leq 4)$ が得られたので、各々 3 点の対応関係から、カメラ座標系からディスプレイ座標系への座標変換行列を求めることができる。本手法では、角膜の表面を平面に近似して考えるので、座標変換行列は平面上のアフィン変換行列 T_1 (3×3 行列) で表現できる。 T_1 は関係式 (19) を満たすので、式 (20) の形で与えられる。

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (20)$$

座標系の変換処理に回転移動が含まれている場合、行列 T_1 の計算において大きな誤差を伴うことがある。そこで、もう一度座標系の変換処理を行うことで行列 T_1 の補正を行う。行列 T_1 による (x_k, y_k) の変換後の座標を (X'_k, Y'_k) とおくと、 (X'_k, Y'_k) は式 (21) により得られるので、 (X'_k, Y'_k) から (X_k, Y_k) への座標変換行列 T_2 は式 (22) の形で与えられる。これらの行列 T_1, T_2 をまとめた行列 $T = T_1 T_2$ を補正後の座標変換行列とする。

$$\begin{bmatrix} X'_1 & X'_2 & X'_3 \\ Y'_1 & Y'_2 & Y'_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_1 & X'_2 & X'_3 \\ Y'_1 & Y'_2 & Y'_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (22)$$

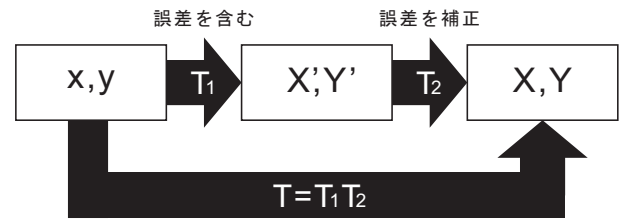


図 8 座標変換における誤差の補正

4.2.5 画像の表示

ディスプレイ座標系におけるマーカー M の座標を式 (23) により求め、ディスプレイのこの座標に画像を出力する。

$$M = Tm \quad (23)$$

5. 実験

システムの性能を評価するために、5 人の被験者で実験を行った。

5.1 実験概要

5 人の被験者には、チンレストを用いて頭の位置を固定する。この状態での被験者からスクリーンまでの奥行き 60cm で、カメラまでの奥行きは 25cm である。また、カメラから左目までの距離は 30cm、右目までの距離は 33cm である。次に、図 9 に示すような画面を表示する。画面には、画面中央 900×720 の画素領域をそれぞれ 3 等分した 16 箇所を中心とした小領域 (100×100 画素) と、その中心を通るグリッド線が合計 8 本描画されている。被験者が前方を見たとき、マーカーがハーフミラー越しに小領域の中心近くに見えるように、その位置合わせを行い、固定する。その状態で、10 秒間 (300 フレーム) システムを動作させ、その間の描画回数と、各フレームにおける画像の出力座標を記録した。この一連のタスクをマーカーの位置を変更しながら 16 箇所で行い、以下の 4 種類の条件で実験を 1 回ずつ行った。

- 左目を撮影・スクリーンからマーカーの奥行きは 30cm
- 左目を撮影・スクリーンからマーカーの奥行きは 60cm
- 右目を撮影・スクリーンからマーカーの奥行きは 30cm
- 右目を撮影・スクリーンからマーカーの奥行きは 60cm

5.2 実験結果

被験者 5 人・条件 4 種類の計 20 回の実験結果を図 11 に示す。紫色の点 (点線の交点) は被験者から見たマーカーの座標 (ground truth) を表しており、黄色の点群は、各フレームごとのシステムの出力結果である。また、緑色の点は各小領域ごとの出力結果の平均値である。

5.2.1 評価指標

システムの性能を評価するための指標として、以下の 2 つを定義する。

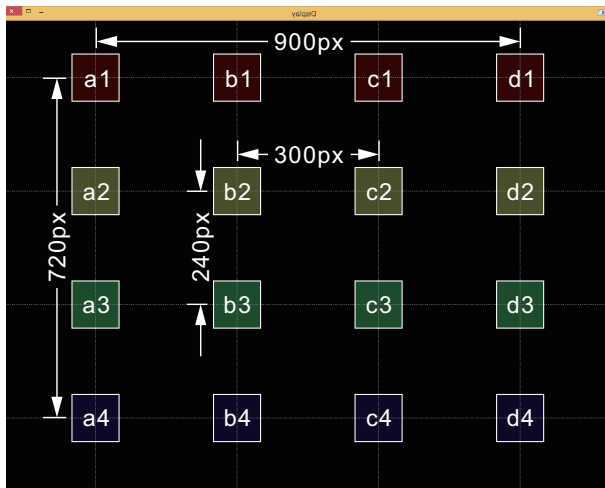
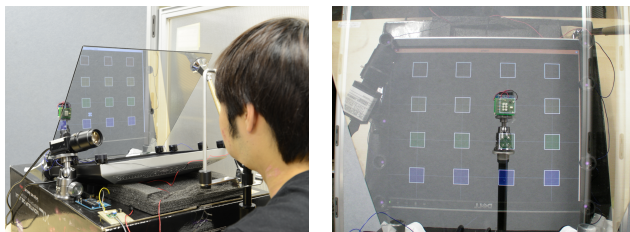


図 9 実験画像



[1] 第三者視点 [2] 被験者視点

図 10 実験の様子

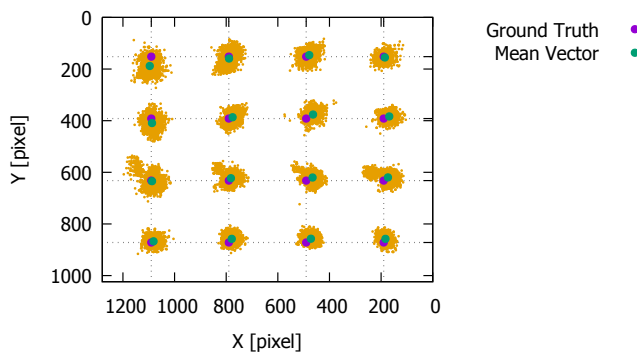


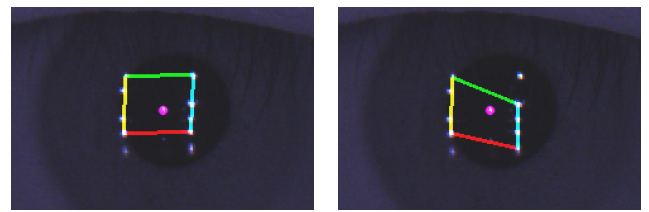
図 11 全体の実験結果

検出成功率

マーカー・画面領域を検出したフレームのうち、両者ともに正しく検出できている枚数の割合。その判断は執筆者が肉眼で行った。単位は%

平均誤差

検出に成功したフレームにおける、被験者から見たマーカーの座標 (ground truth) とシステムが画像を出力した座標との距離 (出力誤差) の平均値。単位は px



[1] 成功例 [2] 失敗例

図 12 検出成功 / 失敗例

表 1 条件比較

条件	検出成功率	平均誤差
左目	91.4 %	29.5 ± 13.8 px
右目	82.7 %	30.4 ± 14.4 px
90cm	88.8 %	30.5 ± 15.1 px
120cm	85.3 %	30.1 ± 14.4 px

表 2 個人差比較

	検出成功率	平均誤差	備考
被験者 A	88.8 %	31.1 ± 13.6 px	
被験者 B	96.1 %	32.1 ± 16.3 px	
被験者 C	90.8 %	30.7 ± 14.1 px	
被験者 D	92.3 %	29.2 ± 13.5 px	
被験者 E	67.8 %	26.8 ± 12.9 px	ハードコンタクト

5.2.2 各条件での比較

左右の目による性能の違い及びマーカーまでの距離による性能の違いを評価するため、検出成功率、平均誤差の 2 つの指標について、左目での実験結果と右目での実験結果、距離 90cm での実験結果と距離 120cm での実験結果の平均をとり、比較した。これを表 1 に示す。

5.2.3 被験者間の比較

個人差による性能の違いを評価するため、検出成功率、平均誤差の 2 つの指標について、各被験者の実験結果 (それぞれ 4 回ずつ) の平均をとり、比較した。これを表 2 に示す。

6. 考察

6.1 検出成功率と頑健性

表 1 を見ると、いずれの条件においても検出成功率は 80%以上であることが分かる。検出失敗の主な原因としては、環境光などが画像の 2 値化の際にうまく取り除かれず、ノイズとして残ってしまうことがあげられる。画像がノイズを含んでいる場合でも、複比と直線度による判定を行うことで正しい光点を検出することが可能だと想定していたが、角膜表面を平面に近似する際に赤外線 LED の複比に歪みが発生し、ノイズが発生した位置によっては、その光点を用いた組のほうが設定した複比に近くなるという現象が発生した。この複比の歪みは、視線の方向とカメラの方向との角度に依存すると考えられ、今回の実験ではカメラに近い左目のほうが右目よりも歪みが小さく、検出成功率は高くなっている。この問題を解決するためには、カメラ

が撮影した二次元画像から角膜の形状を推定し、歪みのない平面画像を復元する処理が必要になると考えられる。また、被験者 E の実験では、装着しているハードコンタクトレンズが瞬目などで移動する際に光を屈折させ、検出成功率が著しく低くなったが、この問題に対しては、一定時間角膜中の光点の位置が安定していなければ検出を行わない、などと実装を工夫する必要があると考えられる。

6.2 精度評価

表 1, 表 2 を見ると、平均誤差は条件による違いも、個人差も特に見受けられず安定している。また、今回の実験全体での平均誤差は 30.1 ± 15.0 px であったが、使用したディスプレイのドットピッチは 0.264 であるから、600mm 前方のスクリーン上では 7.95mm となる。これを角度に換算すると、

$$\tan^{-1} \frac{600}{7.95} = 0.76^\circ \quad (24)$$

となり、平均誤差は 1° 未満であることが分かる。

7. 結論

本稿では、角膜表面反射による HUD のキャリブレーション手法について述べた。実際にシステムを構築し、実験を行ったところ、結果の平均誤差が視野の中心から 0.76° であることから、空間的に十分精度の高い位置合わせが実現できていることが確認できた。しかし、時間的な精度に関しては性能があまり高くなく、入力方式やその細かい設定については検討の余地があり、今後の課題であるといえる。

参考文献

- [1] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: 複合現実感における位置合わせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 171–180 (2003).
- [2] Jarrett, D. N.: *Cockpit engineering*, Ashgate Aldershot (2005).
- [3] Milgram, P. and Kishino, F.: A taxonomy of mixed reality visual displays, *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol. 77, No. 12, pp. 1321–1329 (1994).
- [4] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: カメラと 3 次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 1, pp. 295–301 (1999).
- [5] 加藤博一, Billingham, M., 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607–616 (1999).
- [6] Goteman, Ö., Smith, K. and Dekker, S.: HUD with a velocity (flight-path) vector reduces lateral error during landing in restricted visibility, *The International journal of aviation psychology*, Vol. 17, No. 1, pp. 91–108 (2007).
- [7] Charissis, V., Naef, M. and Patera, M.: Calibration requirements of an automotive HUD Interface using a Virtual Environment: Methodology and Implementation, *Proceedings of: International Conference in Graphics and Visualisation in Engineering, (GVE'07)*, Clearwater, Florida, USA (2007).
- [8] Nitschke, C., Nakazawa, A. and Takemura, H.: Display-camera calibration using eye reflections and geometry constraints, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 115, No. 6, pp. 835–853 (2011).
- [9] Plopski, A., Itoh, Y., Nitschke, C., Kiyokawa, K., Klinker, G. and Takemura, H.: Corneal-imaging calibration for optical see-through head-mounted displays, *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 21, No. 4, pp. 481–490 (2015).
- [10] 鈴木朝日, 眞鍋佳嗣, 矢田紀子: 7-1 円筒面で利用可能な AR マーカの提案 (第 7 部門 AR のためのメディア処理), 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, No. 2012, pp. 7–1 (2012).
- [11] 金澤靖, 松永力, 金谷健一: 複比による識別のための最良マーカーパタンの設計: 理論解析, 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 99, No. 29, pp. 97–104 (1999).
- [12] 松永力, 新島和孝, 金谷健一: 複比による識別のための最良マーカーパタンの設計: 応用実験, 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 99, No. 29, pp. 105–110 (1999).
- [13] Masataka, I.: *Labeling.h* (2010).
- [14] Otsu, N.: Karhunen-Loeve line fitting and a linearity measure, *Proceedings of the Seventh International Conference on Pattern Recognition, July 30-August 2* (1984).