# 角膜反射法における

# 視線計測可能ボリュームシミュレータの開発と マルチユーザ視線インタラクションシステムへの適用

## 江川 晃一<sup>1</sup> 山本 倫也<sup>2,a)</sup> 長松 隆<sup>3,4</sup>

受付日 2014年2月3日, 採録日 2014年7月11日

概要:現在,様々な視線計測システムが市販されているが,その代表的な手法の1つである角膜反射法の 視線計測可能ボリュームは,カメラや光源のレイアウトに左右される.また,インタラクティブな視線イ ンタラクションシステムを開発するためには,計測対象空間となるカメラや光源を適切に配置する必要が ある.そこで本研究では,まず,カメラや光源の空間配置から生成される,視線計測可能ボリュームをモ デル化した.次に,視線計測可能ボリュームをシミュレーションするシステムを開発・評価し,その有効 性を検証した.さらに,それらを応用し,同一な作業空間内で視線情報を共有できるマルチユーザ視線計 測システム「見たところが光る箱」,「仕掛け絵本システム—PIGIMEY」を開発し,シミュレータの有効性 を明らかにした.

キーワード:マルチユーザ視線計測, gaze cone, ボリュームシミュレーション

## Development of Eye-tracking Volume Simulator for Corneal Reflection Method and Its Applications for Multi-user Gaze Interaction Systems

Koichi Egawa<sup>1</sup> Michiya Yamamoto<sup>2,a)</sup> Takashi Nagamatsu<sup>3,4</sup>

Received: February 3, 2014, Accepted: July 11, 2014

**Abstract:** In recent years, many eye-tracking systems have been sold in the market. However, the available volume of eye-tracking by corneal reflection method, which is one of the popular eye-tracking methods for such systems, is affected by the arrangement of cameras and light sources. On the other hand, in order to realize interactive gaze interaction systems, it is necessary to arrange cameras and light sources to fit its target volume. In this study, we propose a general eye-tracking volume model which is calculated by the arrangement of cameras and light sources by introducing gaze cone. Then, we develop a prototype of the simulator and validate it by evaluation experiments. We also develop "a box which illuminates where you look" and "PIGIMEY: A gimmick picture book system" as an application of multi-user eye-tracking to demonstrate the effectiveness of the simulator.

 ${\it Keywords:}$  multi-user eye-tracking, gaze cone, volume simulation

## 1. はじめに

現在,様々な視線計測システムが市販されており,研究 開発も精力的に進められている.具体的な視線計測の手法

関西学院大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University, Sanda, Hyogo 669–1337, Japan

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 関西学院大学理工学部 School of Science and Technology, Kwansei Gakuin Univer-

school schence and rechnology, Kwanser Gakum Oniver sity, Sanda, Hyogo 669–1337, Japan 3 加市十学十学院法事和学研究和

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 神戸大学大学院海事科学研究科 Craduata School of Maritima Scient

Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe, Hyogo 658–0022, Japan

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> ミュンヘン工科大学

Technical University of Munich

<sup>&</sup>lt;sup>a)</sup> michiya.yamamoto@kwansei.ac.jp

としても、カメラのみを用いる手法 [1],カメラと光源を 用いる手法 [2],[3],眼球にサーチコイルを取り付ける手 法 [4],眼球電位図(EOG)を用いる手法 [5],リンバスト ラッカー法 [6] はなど、様々な研究がなされている.この うち、使用者が特に何かを装着するわけでなく、かつ高精 度に計測可能な手法としては、カメラと光源を用いる手法 (以下、角膜反射法)が一般的に用いられている.

このような視線計測装置は、これまで行動解析を中心に 利用されてきたが、今後は、視線と情報機器を組み合わ せたシステムや、複数人を対象としたインタラクション のインタフェースへの応用が期待されている.たとえば、 Holland らは、iPad に視線インタフェースを組み合わせた システムを提案した [7].また、Stellmach らは大型の情報 端末であるサーフェスを対象に、視線インタフェースと情 報端末を組み合わせてインタフェースとして用いるシステ ムを開発した [8].また、複数人を対象に視線計測を行う研 究としては、たとえば DUET2011 では、Tobii 社の製品な どを 2 台並べて用いることで、マルチユーザの視線計測を 行う例が報告された [9].2012 年には、Hennessey がディ スプレイ内蔵型とスタンドアロン型の 2 台を用いて 2 人の ユーザが同一画面を見ている状況を計測可能にした [10].

しかし、市販の視線計測装置は、コンピュータディスプ レイ上の視線を計測できるように設計されている場合が多 く,視線を計測可能な3次元空間(以下,視線計測可能ボ リューム)は限定的で,近距離の場合や広範囲の場合など, 想定された視線計測可能ボリュームを超えるインタラク ションの実現は難しい.一方で,著者らは,独自の視線計測 手法や装置の開発を続けてきた.たとえば、光軸中心回転 体モデル [11] を導入することで、1 点キャリブレーション で高精度かつ広範囲な視線計測を実現しており、液晶ペン タブレット [12] での視線計測や,携帯端末 MobiGaze [13], テーブルトップシステム "Eye Tracking Tabletop Interface (ETTI)"を開発した [14]. しかしながら,これらのシステ ムでは,必要な視線計測可能ボリュームに対して,カメラ と光源の配置は試行錯誤で決定していた. また、カメラや 光源を増やすことで, 視線計測可能ボリュームを増大させ る手法の提案も行った [15]. これは、カメラと光源を適宜 配置することで視線計測可能ボリュームを広げる手法で あったが,対象を定めて実際に視線を計測できるようにす るためには、より複雑な試行錯誤が必要であった.

そこで本研究では、角膜反射法を対象に、視線計測可能 ボリュームシミュレータの開発を行い、この試行錯誤を支 援することとした.本論文では、まず対象とする手法につ いて整理したうえで、視線計測可能ボリュームを算出す るために、何をシミュレートすべきか、どのようなシミュ レーションが可能かをコンセプトとして説明している.次 に、シミュレーションの際に重要となる、眼球の回転限界 データの計測について説明している.また、これらをふま えて提案した,カメラと光源の空間配置から視線計測可能 ボリュームを定める一般的な手法について説明し,その 後,シミュレータの開発と,精度評価実験の結果について 説明している.最後に,このシミュレータを用いるインタ ラクションシステムの開発例として,同一の作業空間内で 複数人がリアルタイムに視線を共有できるマルチユーザ視 線計測システム「見たところが光る箱」,「仕掛け絵本シス テム—PIGIMEY」を説明している.

## 2. 本研究が対象とする手法

#### 2.1 一般的な視線計測手法

視線計測手法には、様々なものがある.サーチコイルな ど特殊なコンタクトレンズを用いる方法 [4] は、直接眼球 の動きを計測するため精度は良いがユーザに大きな負担と なる.EOG (Electrooculogram)法 [5] は、目の周囲に電 極を取り付け電位を計測することで眼球運動を計測する手 法であり、目を閉じていても計測できるメリットがあるが、 電極を取り付けなければならず、現時点で広く用いられて いる訳ではない.リンバストラッカー法 [6] は、赤外線光 を眼球に反射させ白目と黒目の反射率の違いから視線の方 向を検出するもので、安価に製造できる長所があるが、や はり、頭部に装置を取り付ける必要がある.

カメラのみを用いるビデオ式の視線計測手法は,以上の 方法と異なり,非接触で計測できる長所がある.特に,角 膜に赤外光を当て,その反射光も計算に用いる角膜反射法 は精度も高く非常によく利用されている.赤外光を用いな い可視カメラを用いた方法も研究されている[1]が,まだ, 角膜反射法に匹敵する精度・キャリブレーションの簡便さ を実現する手法は開発されていない.以上より,本研究で は,角膜反射法に注目した.

#### 2.2 角膜反射法

角膜反射法とは、カメラと光源を用いる手法に対する呼称であり、実際には、様々な算出手法が存在する.ここで、 算出に必要となる最小のハードウェア構成によって整理すると、以下の種類に大別される.

- カメラが1台,光源が1つの場合 Morimotoらの手法 [17] などは、1台のカメラと1つ の光源を使用する計算モデルである。
- (2) カメラが1台,光源が複数の場合 DongらのCross-ratio手法[18]や大野らの1点キャリ ブレーション[19]など,市販の視線計測システムでも 広く用いられている手法では,1台のカメラに複数の 光源を用いる計算モデルを使用している.

# (3) カメラ・光源ともに複数の場合 Guestrin ら [20] や Nagamatsu ら [21] の手法では,異なる位置に設置した複数台のカメラと光源を用いている.また,長松らの別の手法 [11] では,同一位置に設

置されたカメラと光源を複数用いている.いずれも, 光源の個数が少ない場合には位置で識別したり,多い 場合には,時分割で発光させたり,光源の形状を変化 させたりすることで,どの光源がどの位置にあるかを 識別する必要がある.

多くの方法で、プルキニエ像と呼ばれる、角膜上で反射 した光源からの光を用いて算出しており、プルキニエ像が カメラ画像に映っている必要があるという点で共通して いる.

3. コンセプト

3.1 視線計測の対象物体に対するカメラ・光源配置の重
要性

角膜反射法では、プルキニエ像がカメラに映るという条 件下で,カメラの画角や光源の照射角,これらの位置や台 数を,ユーザの眼球位置,対象物体の存在する空間に対し て適切に定める必要がある(図1).光源とカメラの配置に は無限の組合せがあるが、適当に配置しただけでは必要な 空間の計測を実現することはできず、これを可能にする配 置を求めることは非常に困難な問題である.また、市販の 装置はディスプレイの下に取り付けるようになっており, テーブルトップのタッチパネルと組み合わせた場合には, 腕がカメラをさえぎって視線計測を阻害する場合があるな ど,手を動かす空間も含めてカメラと光源の位置を決定す る必要がある.そのため、多様な視線インタラクションの ような複雑な視線計測装置を実現するためには、視線計測 可能ボリュームのシミュレーションを行い、求められる視 線計測可能ボリュームをカバー可能な機材配置を導出する ことが必要である.

## 3.2 視線計測可能ボリュームシミュレーションに求めら れる性能の3つの段階

視線計測可能ボリュームのシミュレーションには,3つ の段階があると考えられる.初めの段階は,カメラ,光源, 眼球の位置をパラメータとして,それらの配置に対する視 線計測可能ボリュームをシミュレートする段階であり,そ れにより,人による配置の試行錯誤を支援する.

2つ目の段階は、とにかく1つ、目的とする視線計測可 能ボリュームを実現する、カメラ、光源配置を求める段階





Fig. 1 Problems in development of gaze tracking system.

である.この段階のシミュレータでは、最適解でない可能 性はあるものの、試行錯誤を行う必要がなく、1つ目の段 階のシミュレータに比べて迅速な機材配置の決定が可能と なる.

最後の段階は、使用者の眼球が存在しうるボリュームや、 注視する対象物のサイズや位置を設定するだけで、最適な 機材の個数と配置をシミュレート可能な段階である.この 段階では、使用するカメラや光源の数を最小限に抑えるな ど、精度やコストに関しても最適化を行う.

本研究では,第1段階のシミュレータを開発し,2種類 のアプリケーション開発に適用した.

## 4. Gaze cone に着目した眼球の回転限界の 計測

#### 4.1 gaze cone

角膜反射法では、プルキニエ像がカメラ画像に映ってい る必要がある.しかし、眼球の回転角度が大きくなると、 角膜上ではなく、角膜と強膜の境や、強膜上で反射するよ うになるため、光源からの光は乱反射を起こし、角膜反射 法は使用することができなくなる.著者らの先行研究で は、プルキニエ像を撮影可能な眼球の回転範囲を考えるこ とが重要であり、この形状が円錐であることを指摘してい る[15].この最大角度 θ<sub>max</sub> 度の内側の円錐を gaze cone と 呼ぶ(図 2).円錐の中心軸は、図 2 の眼球回転中心と点 光源とカメラを結んだ三角形における、眼球回転中心の角 の二等分線である.gaze cone の内側に注視対象物が入っ ていることは、角膜反射法において、角膜上に反射光が存 在する条件である.そのため、明瞳孔法の場合でも、暗瞳 孔法(カメラと光源が同軸上にある場合)であっても、同 様の円錐形状となる.

#### 4.2 眼球の回転限界データの収集

先行研究では、眼球の回転限界、つまり図 2 の  $\theta_{max}$  は 35 度程度としているが [15]、実際は角膜の大きさなどに よって個人ごとに変化する.また、光軸と視軸(中心窩に よる視野の中心軸)のずれも存在する.図 3 は、カメラと 光源は同一位置にある場合であるが、各方向を注視する場 合の眼球の回転とそのカメラ画像で反射光がどう映るかの





図3 眼球の回転限界 Fig. 3 Limit of rotation of eye balls.



図4 実験装置 Fig.4 Experimental equipment.

関係性を示した例である.矢印は光源からの光を表しており、この光が角膜で反射する場合は、反射光は1点となるが、角膜の端を超えて強膜に入っている一番右の画像では、 光が乱反射している.このように光が乱反射しているとき は、視線が計測できなくなるが、この角度に個人差がある.

そこで、この眼球の回転限界  $\theta_{max}$  を調べる計測実験を 行った.実験には図 4 のような装置を用意した.この装置 は Manfrotto 社のオートポールをクランプを用いて十文字 に組み合わせて配置した.また、中心部分にカメラと LED を取り付け、クランプに取り付けた注視マーカをオート ポール上で自由に移動できるようにした.

実験では、まず、実験協力者の頭部を顎台で固定し、右 目の眼球中心がカメラの中央に写り、プルキニエ像が画像 処理で確実に検出できるように1点で映ることを確認し た.次に、注視マーカを注視させ、上あるいは左右に移動 させることによって眼球を回転させた.その後、眼球が回 転することによって変化するプルキニエ像が、乱反射する 直前の位置まで注視マーカを徐々に移動させた.この注視 マーカの位置を求め、眼球の回転角度を計算した.ここで、 カメラ中心から上、左または右への移動量を1mmとする と、カメラ中心から眼球位置までの距離が 375 mm だった ため、以下の式で求められる.

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} \frac{l}{375} \tag{1}$$





男性 10 人に対して計測した結果を図 5 に示す. 左を見 たときの限界回転角度が  $\theta_{maxL}$ , 上を見たときが  $\theta_{maxU}$ , 右を見たときが  $\theta_{maxR}$  である. グラフのとおり,限界角度 は左,上,右の順に小さくなった.この理由として,人の 光軸と視軸を考えた場合,光軸と視軸にずれがあることが あげられる.このずれは,個人差が大きく,平均で上に1.0 度,左目では右,右目では左に5.5度といわれる[16].つま り, $\theta_{maxU}$ の値はこれより約1度小さく,左右では, $\theta_{maxL}$ と $\theta_{maxR}$ の平均を求めて,左に約2.5度程度ずれているこ とが分かる.これらを考慮すると,視軸が鼻側に向かうよ うになっていることが分かる.たとえば,右目の場合,実 際に見ているという意味で実効的な gaze cone の形状は, 光軸を基準とした円錐から少しずれた円錐である(図 6).

なお,開発したシミュレータでは,光軸と視軸のずれを 考慮する必要のない範囲として gaze cone の $\theta_{\text{max}}$ を 30 度 と近似し,視線計測可能ボリュームを求めた.

## Gaze coneの組合わせによる視線計測可能 ボリュームのシミュレーション手法

#### 5.1 角膜反射法の種類に応じた gaze cone の組合せ

2.2 節で述べたように,角膜反射法の種類,つまり算出 手法に応じて,必要となる最小のハードウェアの構成は異 なるものの,プルキニエ像がカメラに映るという条件は, gaze coneの組合せで表される.

具体的には、(1)のカメラが1台、光源が1つの場合は、



図 7 視線計測可能ボリュームの計算例 Fig. 7 Example of calculation by gaze cones.



図 8 据え置き型視線計測装置の視線計測可能ボリュームの例 Fig. 8 One camera and one multi light sorce.

角膜上に1個の光源が映っていればよいので、1つの gaze cone のみで計算が成立する.

(2) のカメラが1台,光源が複数の場合は,たとえば,据 え置き型視線計測装置の視線計測可能ボリュームは,2つ の gaze cone の共通部分,すなわち図7の赤い線で囲まれ た範囲となる.

(3)のカメラ・光源ともに複数の場合は,算出に用いる ハードウェアの組合せ方に応じて,必要な gaze cone の数 が変化する [14]. たとえば,2台のカメラと同位置に光源 がある場合は,それぞれのカメラでそのカメラと同位置の 光源が映っていれば視線計測可能であり,計2個の gaze cone の共通部分が視線計測可能ボリュームとなる.1台 のカメラのみ同位置に光源がある場合は,同様に,2つの gaze cone の共通部分が視線計測可能ボリュームとなる. 一方,カメラと光源が1つも同位置にない場合は,3つの gaze cone の共通部分が視線計測可能ボリュームとなる.

## 5.2 視線計測可能ボリュームの導出方法

いずれの角膜反射法においても、プルキニエ像を用いて 算出しているため、視線計測可能ボリュームは、必要な gaze coneの共通部分として一般化して記述され、空間が どのような形状になるかを求めることで導出できる.

そこで,カメラ数 m, 光源数 n として, 生成される gaze

cone の集合 w は, gaze cone がカメラと光源に対応している ことから, gaze cone が生成されうるのは光源とカメラの組 合せの  $m \times n$  個である. このうち, 実際に眼球が映っており, gaze cone が生成される gaze cone を有効 gaze cone(w(i, j)) と呼ぶこととする. ただし,  $1 \le i \le m, 1 \le j \le n$ である.

次に、有効 gaze cone の集合の内から利用する計算方法 で必要な gaze cone の個数 k 個を選択し、共通部分  $P_g$  を 求める.  $m \times n$  個から k 個の要素を取り出す場合、以下の ように、最大で  $c = m \times n C_k$  通りの組合せが考えられる.

$$P_1, ..., P_q, ..., P_c$$

これらの共通部分の和集合を求めることで,式(2)のよう に視線計測可能ボリュームが求まる.

$$EyeTrackingVolume(R) = \bigcup_{g=1}^{c} P_g.$$
 (2)

以上の議論は眼球位置が一定の場合であるので,眼球の 位置が変化するごとに有効 gaze cone が変化し,視線計測 可能ボリュームはそのつど求めることになる.

例として、Guestrin の手法 [20] および長松らの手法 [21] の最小構成である m = 2, n = 2 で、カメラと光源が同軸 上でない場合の例を図 7 に示す. この場合は計測に必要な gaze cone の数は 3 つであるため、k = 3 として、共通部分 Pは  $_{2\times 2}C_3 = 4$  通りの組合せが存在する. そこで、 $P_1 \sim$  $P_4$ を求め、これらの和集合を求めることにより、視線計測 可能ボリュームが求まる.

## 5.3 視線計測可能ボリュームの拡大とマルチユーザへの 対応

視線計測装置を様々なシチュエーションに対応させるに は、システムに用いるカメラや光源の数を必要に応じて増 減させる必要がある.加えて、1つの手法のみでなく、複数 の手法を併用することによって、1つの手法で計測不可で ある領域を他の手法で補うことで、より様々なシチュエー ションに対応させることが可能であると考えられる.

また、マルチユーザの場合は、使用人数を o、5.2 節で求 めた使用者 1 人あたりの視線計測可能ボリュームを  $R_r$  (= ある使用者に対する式 (2) の R に相当する)とし、共通部 分を求めることで、式 (3) のように使用者全体の視線計測 可能ボリュームを推定できる.

$$MultiUserEyeTrackingVolume = \bigcap_{r=1}^{\circ} R_r.$$
(3)

ここで、ハードウェアが十分な場合は使用者ごとの gaze cone は重なりが大きくなるが、少ないハードウェアでマル チユーザを行う場合はこの共通部分の算出が重要で、緻密 にシミュレーションする必要がある.

## 6. 視線計測可能ボリュームシミュレータの 開発

5章の手法に基づき、シミュレーションを行うソフトウェ ア(シミュレータ)を開発した.これは、カメラ位置や光源 位置、眼球位置などを入力とすることで、対象空間におけ る視線計測可能ボリュームを求めるシステムである.この シミュレータを用いることで、機材の配置を事前にシミュ レーション可能となるため、物理的に機器を移動させなが ら手探りで最適なセッティングを探索する必要がなく、環 境構築にかかる時間を大幅に短縮可能となった.また、計 測対象に応じて視線計測可能ボリュームを変化させるな ど、柔軟な対応が可能となった.

シミュレータは、Microsoft 社の Visual Studio 2010 を用 いて実装した.シミュレータに与える入力としては、ディ スプレイや机などのシミュレーション環境の実測サイズ (mm),想定する使用者の眼球 3 次元座標 (mm),カメラ と光源の 3 次元座標 (mm),テーブルトップ環境などで、 タンジブルデバイスなど、3 次元物体を視線計測の対象と する場合は、その物体を内包する直方体のサイズと位置を 入力する.表1は、これらを入力するための csv ファイル の入力項目である.ここで、十分に広い照射角を有する光 源を用いる場合は、目を撮影することよりも、カメラを置

## 表 1 システムの入力 Table 1 Input of the system. CSV ファイルの入力項目

結果表示範囲		使用者情報	
サイズ	幅 (mm) , (数值)	位置	x (mm) , (数值)
	高さ (mm) , (数値 )		y (mm) , (数值)
カメラ情報			z (mm)   ,(数值)
位置	x (mm)   ,(数值)	対象物体	
	y (mm) , (数值)	位置	x (mm) , (数值)
	z (mm) , (数值)		y (mm)   ,(数值)
光源情報			z (mm)   ,(数值)
位置	x (mm) , (数值)	サイズ	幅 (mm)   ,(数值)
	y (mm) , (数值)		高さ (mm) , (数値)
	z (mm) , (数值)		奥行き (mm) , (数値)

く位置を定めプルキニエ像が映るようにすることのほうが 難しいため、後者のシミュレーションのみを行っている. つまり、カメラと光源の角度は入力していないが、実際に は、目の映像がうまく映る方向にカメラの向きを手動で動 かせばよい.

視線計測可能ボリュームをシミュレーションした結果は. 計測対象が視線計測可能ボリュームに含まれているか判断 し易いという理由から、3D オブジェクトとしてでなく、計 測対象を含む平面として出力した(図 9). ここでは、この 平面をピクセル単位で分割し,5章の手法に従って各領域 を視線計測可能ボリューム内かどうかを判定するシミュ レーションを行った. 図中のウィンドウ内は計測対象を含 む平面. つまりディスプレイが計測対象であればディスプ レイを、プロジェクタで投影した面を計測する場合はその 面を示している.また,紫色の領域は,求めた視線計測可 能ボリュームを示している. 図中の白い枠はテーブルトッ プでのタンジブルオブジェクトなどの対象物体を示してい る. なお, シミュレーションに用いる gaze cone の $\theta_{max}$  は 4.2節で求めた値から、前述のとおり、光軸と視軸のずれ を考慮する必要のない範囲として 30 度と近似し、視線計 測可能ボリュームを求めている.たとえば、図 10 のよう な3次元物体を対象とするような場合は、入力データにそ の物体のサイズを入力することで、物体の上面にあたる部 分の平面,前面にあたる平面,下部にあたる平面それぞれ で視線計測可能ボリュームのシミュレーションを行い、結



図 9 システムの出力 Fig. 9 Output of the system.





果を同時に出力する.

## 7. 視線計測可能ボリュームシミュレータの 評価

#### 7.1 対象とした視線計測システム

本研究ではカメラと光源を同一位置に配置する光源一体型カメラを2台用いるシステムを利用した.この手法を導入した Eye-tracking 液晶ペンタブレットでは,誤差約0.71度で計測可能である[12].この設定の場合,5.1節で述べたように,視線計測を行うには,最低2つの gaze cone が必要となるため,5.2節における k を 2 とすることで,視線計測可能ボリュームが求まる.マルチユーザの場合は,さらに各ユーザの視線計測可能ボリュームの共通部分を求める.

#### 7.2 実機による検証(シングルユーザ)

まず,このシミュレータによって求めた視線計測可能ボ リュームの実機による検証をシングルユーザで行った.実 験で用いたシステムを図 **11** に示す.本システムは,処理 用としてデスクトップ PC (HP 社 xw4600 Workstation, Core 2 Duo E8400 3.0 GHz),視線計測のために光源一体 型カメラ 2 組 (カメラ: POINT GREY 社 FFMV-03-CS MTM (解像度:752 × 480 ピクセル, 1/3 インチ),レン ズ: ViewPLUS 社 VP-LE-HC-35HS (焦点距離:35 mm), LED:OSRAM 社 LD-271 (波長:950 mm, 照射角:25°)) を用いた.

まず,開発したシミュレータを用いて,使用システムに おける視線計測可能ボリュームを算出した.図12のグラ フは,ディスプレイ平面におけるシミュレーション結果を, 実験結果を示すグラフ上に重畳したものであり,紫領域が 視線計測可能ボリュームを示している.次に,図12のよ うに画面上の34点にマーカをそれぞれ50 frame 以上表示 し,各マーカを右目で注視させて,計測精度を求めた.こ れらの34点は,基本的には格子状に設置したが,カメラ から離れた gaze coneの外形付近は細かく配置した.実験 協力者は10人であった.この計測結果を平均したグラフ を図12に示す.



図 11 システム構成 Fig. 11 System configuration.

結果として、図 12 中の i) のマーカのように、gaze cone における  $\theta$  が 30 度を大きく超える部分では反射光が乱れ (図 12 中の右図 i)), 計測できなかった. ii) のマーカのよ うに、シミュレーション結果での限界近くのマーカでは、 $\theta$ が 30 度をやや超える領域であったが、個人差はあったもの の、反射光はほぼ乱れることなく(図 12 中の右図 ii)), お およそ計測可能であった. iii) やその周辺のマーカは、 $\theta$  が 30 度以下のマーカで、反射光は1点として映り(図 12 中 の右図 iii)), 先行研究と同様に1度未満の精度で計測でき た. また、シミュレーション結果の領域の内側にあるマー カの平均誤差は約 0.91°となり、gaze cone の内部では導 入した手法の精度で計測できていた.以上のことから、シ ミュレーションした領域内では精度良く計測可能であるこ とが確認でき、光軸を中心に $\theta_{max}$ を 30 度と近似しても問 題はなかった.

#### 7.3 マルチユーザシステム開発への適用

開発したシミュレータを用いてマルチユーザシステム のシミュレーションも行った.実機のシステムの構成を 図 13 に示す.また,このシステムで用いた PC,カメラ, レンズおよび光源は 7.2 節で用いたものと同じである.2 人が並んで使用する場面を想定し,カメラを2セット用い た.また,ユーザ同士が干渉しないよう,カメラを左右に





Fig. 12 Measuring results.



図 13 システム構成 Fig. 13 System configuration.



図 14 マルチユーザ時のシミュレーションおよび実測の結果 Fig. 14 Simulation and measuring results by multi-user.

設置し、3.2節で述べたように、左目では右側に、右目で は左側に視軸が傾いていることから、左側ユーザは左目、 右側ユーザは右目を計測した.システムは、5章で用いた PCを2台用意し、クロス LAN によって接続し、UDP に よりデータの通信ができるようにした.

図 14 は、図 13 のディスプレイ平面におけるシミュレー ション結果と、視線計測結果を重畳した図である.紫領域 が視線計測可能ボリュームを示している.ここでは、左右 のユーザ2人分の視線計測可能ボリュームを示している. 次に、視線計測可能ボリューム内でディスプレイ上に14 点のマーカを表示して、それぞれ50 frame 以上注視させ、 そのときの注視点位置を計測した.これを左右でそれぞれ 行った.本実験は男性10名を対象に行った.

実験結果は図 14 のグラフに重畳して表示している.す べてのマーカにおいて精度良く計測できていることが確認 できた.実際には,左側ユーザの場合,平均誤差は0.98°, 右側ユーザの場合,平均誤差は1.05°で,先行研究や7.2節 での検証と同程度であった.

以上より、2人のユーザが同時に使用する場合も、gaze coneを用いたシミュレーションにより求めた視線計測可能 ボリューム内で、高精度な視線計測が可能であることが確 認できた.

## 8. 応用例

#### 8.1 見たところが光る箱

マルチユーザの視線インタラクションを実物体に対応さ せた「見たところが光る箱」を開発した(図 15). これは, ディスプレイやテーブルトップではなく,フルカラー LED と Arduino を内蔵した1辺25 cmの「光る箱」と,マルチ ユーザ視線計測システムを組み合わせたシステムである.

このシステムでは,計測対象が3次元物体であるため, 机平面上での箱領域,箱の前面を含む平面上での箱領域, 箱の上面を含む平面上での箱領域内が,2人分の視線計測 可能ボリュームに含まれなければならない.

そこでまず,一般的な視線計測におけるカメラ配置であ る,計測対象の前面下部にあたる図 15 中の (a) 領域に光源 一体型カメラを並べ,左目を使用する場合をシミュレート



図 15 光る箱システム Fig. 15 System of illumination box.

した.この結果,前面領域ではおおむね計測可能であった が,カメラ位置が低いことから上面領域が計測不可であっ た(図16(a)).そこで,計測領域の左右,図15中の(b) 領域に光源一体型カメラを配置し,左右の利用者の左目を 計測する場合をシミュレートした(図16(b)).この場合で は,左目を用いたことで,視線計測可能ボリュームに偏り ができ,対象領域全体をカバーできないことが確認できた. そこで,同じ光源一体型カメラの配置で,左側ユーザは左 目を,右側ユーザは右目を計測に用いる場合をシミュレー トした(図16(c)).この場合は,視線計測可能ボリューム の偏りはなくなったものの,細長い形状となり,対象領域 全体をカバーできないことが確認できた.最終的に,図15 中の(c)領域に光源一体型カメラを配置し,カメラ間の距 離を離すようなシミュレーションを行った(図17).

このシミュレーションで,計測対象がすべてカバーでき ることが確認できた.また,このシミュレーション結果を ふまえて実機を配置したところ,実際に上面と手前面に対 応させることができた.図 18 は使用例で,あるユーザの 注視点を赤,もう1人のユーザの注視点を緑とし,重なっ た場合を黄色で発光させている.

従来なら,実機を用いてカメラ位置や光源位置の調整を する必要があった.特に,対象物体ありきの場合,プルキ ニエ像を1点で撮影できたり,対象物体全体を視線計測可 能ボリュームに入れたりすることは,経験的な試行錯誤が 必要であったが,このシミュレータを用いることで,この 試行錯誤が容易になり,新しい視線インタラクションシス テムを効率よく開発できるようになった.

#### 8.2 仕掛け絵本システム—PIGIMEY

エンタテインメントへの応用例として,仕掛け絵本シス テム "PIGIMEY"を開発した.これは,注視点に応じて設 置した絵本にエフェクトや追加情報を重畳合成するシステ ムである (図 19).本システムでは,視線探索をタスクと





図 18 光る箱使用例 Fig. 18 Examples of using illumination box.



図 20 シミュレーション結果 Fig. 20 Result of simulation.

する絵本を自主制作し,複数人で探索させるような設計に しており,このシステムを使用することで,ユーザ同士の 視線をより意識することや,互いに協力し合い探索してい る感覚を得ることが可能となる.また,制作した絵本は縦 185 mm,横 370 mm で,これを視線計測可能ボリュームに 含むようなカメラ・光源の配置が必要である.

この例では、計測対象に触れることを前提としたため、 ユーザと計測対象の距離が近い.また、計測対象となる絵 本は幅広で、低い位置に置かれている.そこで、図 20 の ように「見たところが光る箱」よりもカメラの間隔を広げ て位置を下げてシミュレーションしたところ、絵本の領域 をカバーできることが分かった.



対象物体に

Fig. 17 Success example of simulation.



図 21 PIGIMEY 使用例 Fig. 21 Example of using PIGIMEY.

図 21 は、このシミュレーション結果にしたがって開発 した仕掛け絵本システム "PIGIMEY"の使用例で、「見た ところが光る箱」とは計測対象の位置が異なっている. 視 線計測可能ボリュームシミュレータを用いることで、同じ ハードウェアを用いる場合でも、視線計測対象を容易に変 更可能である.

#### 9. 考察

今後,視線インタラクションシステム技術へのニーズの 高まりとともに,計測対象が大型・複雑化することも考え られるが,本研究で提案したシミュレーション手法は,ど のような計算手法においても,カメラや光源をどのように 配置すべきかの解を与えるという点で,普遍的である.視 線計測可能ボリュームを算出することの重要性が増すに つれ,機材配置を視覚的にシミュレーション可能なアプリ ケーションは不可欠になると考えられる.

本研究で開発したシミュレータのプロトタイプは,4台 のカメラと4つの光源,2人までのシミュレーションを対 象としたが、カメラや光源、人数に関しては必要に応じて 今後増やすことは理論的に容易である.また,kinect 等深 度センサを用いることで,大きさや形をスキャンし,それ を入力データとして用いることが可能であり、実際の計測 対象にプロジェクションマッピングを行うことで、リアル タイムにカメラや光源の配置をシミュレーションすること も可能になると考えられる.一方で, gaze cone の $\theta_{max}$ の 形状に関する詳細について、今後検討する必要がある.具 体的には、本研究では円錐形というシンプルな形状を仮定 したが、実際は、上下のまぶたの影響で、計測できない範 囲が発生する可能性がある.たとえば、下を見たときは、 まぶたが下がるため、下方の計測が必要なときは、下方に 光源を設ける必要がある. 今後, まぶたのモデルを導入し ていくことを検討している. また, gaze coneの外部であっ ても,反射光を用いないカメラのみを用いる方式であれば, 計測可能であるため, gaze cone の $\theta$ に対する誤差の値を マッピングし、これをシミュレーションに用いることで、 必要な精度から機器の配置を決めることが可能となる.

援するシミュレーションであるが、3 章で提案したよう に、計測対象に対して、それを視線計測可能ボリュームで カバー可能なカメラや光源の配置を導いたり、それを最適 化するシミュレータを開発することで、より効率的なシス テム開発が可能となり、コスト削減にもつながると期待さ れる.

#### 10. おわりに

本研究では、視線計測可能ボリュームシミュレータを提 案し、それを利用したマルチユーザ視線インタラクション システムの開発を行った.まずカメラや光源の空間配置か ら視線計測可能ボリュームを定める手法として、眼球と 光源,カメラそれぞれの位置関係により定まる円錐型の gaze cone を導入し、計測可能な範囲が、計算手法にかか わらず gaze cone の組合せとして算出可能であることを述 べた.次に、シミュレータを開発した上で、精度評価実験 を行った.この結果、シミュレータが算出した視線計測可 能ボリューム内では、平均誤差は 0.91° となり、精度よく 視線を計測できることを確認できた.また,複数人で利用 可能なマルチユーザ視線計測システムを開発し、精度評価 を行った結果,平均誤差は左側で0.98°,右側で1.05°であ り、マルチユーザの場合もシミュレータが有効であった。 さらに,応用例として「見たところが光る箱」「仕掛け絵本 システム—PIGIMEY」を開発し、コラボレーション技術 としての応用可能性を示した.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 23300047 などの支援による.

#### 参考文献

- [1] Yamazoe, H., Utsumi, A., Yonezawa, T. and Abe, S.: Remote Gaze Estimation with a Single Camera Based on FacialFeature Tracking without Special Calibration Actions, Proc. 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '08), pp.245-250 (2008).
- [2] Nagamatsu, T., Iwamoto, Y., Sugano, R., Kamahara, J., Tanaka, N. and Yamamoto, M.: Gaze Estimation Method Involving Corneal Reflection- based Modeling of the Eye as a General Surface of Revolution about the Optical Axis of the Eye, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E95-D, No.6, pp.1656–1667 (2012).
- [3] Guestrin, E.D. and Eizenman, M.: General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflection, *Biomedical Engineering*, Vol.53, No.6, pp.1124–1133 (2006).
- [4] Dale, R., Mark, S. and Aaron, W.: A new "wireless" search-coil system, Proc. 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '08), pp.197–207 (2008).
- [5] Manabe, H., Fukumoto, M. and Yagi, T.: Conductive rubber electrodes for earphone-based eye gesture input interface, *Proc. 2013 International Symposium on Wearable Computers (ISWC '13)*, pp.33–40 (2013).
- [6] Ishiguro, Y., Mujibiya, A., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Aided eyes: Eye activity sensing for daily life, Proc.

また,現在のシステムは,実機を使わずに試行錯誤を支

1st Augmented Human International Conference (AH '10), Article 25 (2010).

- [7] Holland, C., Garza, A., Kurtova, E., Cruz, J. and Komogortsev, O.: Usability evaluation of eye tracking on an unmodified common tablet, *CHI '13 Extended Ab*stracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13), pp.295–300 (2013).
- [8] Stellmach, S., Stober, S., Nurnberger, A. and Dachselt, R.: Designing gaze-supported multimodal interactions for the exploration of large image collections, *Proc.* 1st Conference on Novel Gaze-Controlled Applications (NGCA '11), p.1 (2011).
- [9] DUET2011, available from (http://www. dualeyetracking.org/DUET\_2011/DUET\_2011.html).
- [10] Hennessey, C.: Framework for colocated synchronous Dual Eye Tracking, DUET 2012: Dual Eye Tracking Workshop at CSCW (2012).
- [11] Nagamatsu, T., Iwamoto, Y., Kamahara, J., Tanaka, N. and Yamamoto, M.: Gaze Estimation Method based on Aspherical Model of Cornea: Surface of Revolution about Optical Axis of Eye, *ETRA '10*, pp.22–24 (2010).
- [12] Yamamoto, M., Nagamatsu, T. and Watanabe, T.: Development of Eye-Tracking Pen Display Based on Stereo Bright Pupil Technique, Proc. 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications (ETRA '10), pp.165–168 (2010).
- [13] Nagamatsu, T., Yamamoto, M. and Sato, H.: MobiGaze: Development of a gaze interface for handheld mobile devices, CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '10), pp.3349–3354 (2010).
- [14] Yamamoto, M., Komeda, M., Nagamatsu, T. and Watanabe, T.: Development of Eye-Tracking Tabletop Interface for Media Art Works, *Proc. ACM Interna*tional Conference on Interactive Tabletops and Surfaces 2010, pp.295–296 (2010).
- [15] Nagamatsu, T., Yamamoto, M., Sugano, R. and Kamahara, J.: Mathematical Model for Wide Range Gaze Tracking System Based on Corneal Reflections and Pupil Using Stereo Cameras, *Proc. Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA '12)*, pp.257–260 (2012).
- [16] 苧阪良二,中溝幸夫,古賀一男編:眼球運動の実験心理 学,名古屋:名古屋大学出版会 (1993).
- [17] Morimoto, H.C. and Mimica, R.M.: Eye gaze tracking techniques for interactive applications, *Proc. Computer Vision Image Understanding*, Vol.98, No.1, pp.4– 24 (2005).
- [18] Dong, H.Y. and Myung, J.C.: A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion, *Proc. Computer Vision Image Understanding*, Vol.98, No.1, pp.25–51 (2005).
- [19] Ohno, T., Mukawa, N. and Yoshikawa, A.: FreeGaze: A gaze tracking system for everyday gaze interaction, Proc. 2002 Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '02), pp.125–132 (2002).
- [20] Guestrin, E.D. and Eizenman, M.: Remote point-of-gaze estimation with free head movements requiring a singlepoint calibration, Proc. 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBS 2007), pp.4556-4560 (2007).
- [21] Nagamatsu, T., Kamahara, J. and Tanaka, N.: 3D Gaze Tracking with Easy Calibration Using stereo Cameras for Robot and Human Communication, Proc. 17th International Symposium on Robot and Human Interac-

tive Communication (IEEE RO-MAN 2008), pp.59–64 (2008).



## 江川 晃一

2014年,関西学院大学大学院理工学 研究科修了.同年,シャープ株式会社 入社,現在に至る.在学時,視線イン タラクションの研究に従事.



## 山本 倫也 (正会員)

2002 年京都大学大学院エネルギー科 学研究科博士後期課程修了.同年,岡 山県立大学情報工学部情報システム工 学科助手,2007 年同助教,2009 年関 西学院大学理工学部人間システム工学 科准教授,現在に至る.身体的インタ

ラクション,コミュニケーション支援の研究に従事.2005 年ヒューマンインタフェース学会論文賞,2005年情報処理 学会第66回全国大会大会奨励賞等受賞.ヒューマンイン タフェース学会,日本バーチャルリアリティ学会,日本原 子力学会,ACM 各会員.博士(エネルギー科学).



#### 長松隆 (正会員)

1996年京都大学大学院工学研究科電 気工学第二専攻修士課程修了.同年三 菱重工業(株)入社.1999年京都大学 大学院エネルギー科学研究科寄附講座 教員(助手相当).2000年神戸商船大 学商船学部助手.2003年神戸大学海

事科学部助手. 2007年同大学院海事科学研究科助教, 2009 年同講師, 2012年同准教授. 2014年ミュンヘン工科大学客 員研究員. ヒューマンインタフェース, 視線インタフェー スの研究に従事. ヒューマンインタフェース学会, 日本原 子力学会, ACM 各会員. 博士 (エネルギー科学).