

角膜反射の限界点に着目した 視線計測におけるカメラと光源の移動可能範囲の導出

横田 杏里† 山本 倫也† 廣江 葵†† 長松 隆††
† 関西学院大学理工学部 †† 神戸大学大学院海事科学研究科

1 はじめに

角膜反射法は、光源の角膜上での反射像（プルキニエ像）をカメラで撮影することで、高精度な視線計測を実現する手法である。これは視線計測において重要で、江川らが複数の光源やカメラの組み合わせで視線計測可能範囲を広げる手法を提案する [1] 一方、廣江らのプルキニエ像を用いない手法では精度が低下する [2]。プルキニエ像を用いない glint-free と呼ばれる方法も提案されているが、実用段階にはない [3]。

プルキニエ像を撮影可能な領域は、従来は gaze cone と呼ばれ、約 35 度の眼球の回転角度 θ_{max} による円錐形でモデル化されていた。著者らは、8 本のアーム上の 141 個の LED と、その中央に配置したカメラで、角膜反射を撮影可能な領域を計測する Corneal Reflection Measurement Device (CRMD) を開発し [4]、この計測を試みている。本研究ではさらに、角膜反射の限界点に着目することで、カメラと光源の移動可能範囲を導出している。

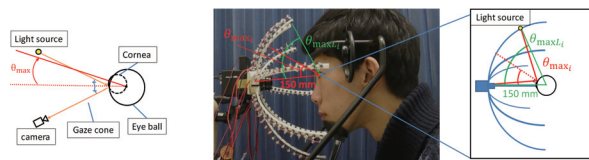


図 1: gaze cone とその計測のための CRMD[4]

2 カメラと光源の移動可能範囲のモデル

眼球は、大小 2 つの球が組み合わさった形状をしている。小さな球は角膜で、この表面でプルキニエ像が撮影可能となる。ここで、角膜上の点 R_0 における反射を考えると、光源 L_0 からの光が法線ベクトル N_0 を対称に反射し、カメラ C_0 に達する。この入射角と反射角の最大値は理論的には 90 度であるが、実際にはこれより小さい θ_{ref_max} になると考えられる (図 2)。ここで

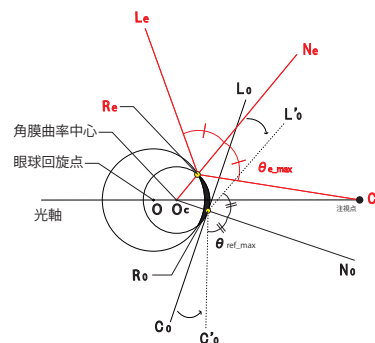


図 2: 光軸上にカメラを固定し角膜反射の限界点を求めるモデル

R_0 が角膜のエッジ R_e にある場合、反射の法線ベクトルは N_e である。ここが、角膜反射の限界点である。この N_e を中心軸とする範囲内に光源とカメラを置けば、プルキニエ像が撮影できる。この点 R_e を求めるには、光源とカメラの双方を動かしてもよいが、図 2 では、カメラを眼球の光軸上 C_e に固定し、光源の位置を角膜のエッジで反射するところまで動かせばよい。CRMD は、この方法で θ_{max} を求めている。ただし、限界点での角 θ_{e_max} はおよそ gaze cone の中心角 θ_{max} と等しくなり、 θ_{ref_max} の実測値がこれらより十分大きいことが前提となる。

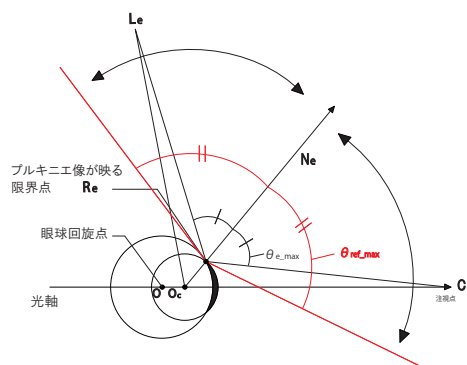


図 3: 限界点の法線を基準とする光源とカメラの移動可能範囲

これを踏まえると、図 3 のように、限界点 R_e を基準にすると、プルキニエ像を撮影可能な最大範囲、つまり光源とカメラの移動可能範囲は、 $\theta_{e_max} + \theta_{ref_max}$ か

Derivation of Movable Range of Cameras and Light Sources in Eye-tracking Considering Limit of Corneal Reflection
†Anri Yokota †Michiya Yamamoto ††Mamoru Hiroe ††Takashi Nagamatsu
†School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University
††Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

ら $\theta_{e_max} - \theta_{ref_max}$ である。この範囲内で、光源からカメラへの入射角と反射角は等しいため、法線ベクトルが同一であれば、光源とカメラの位置を入れ替えることができる。これは、限界点における光源とカメラの移動可能範囲であるが、角膜上の点つまり光軸と法線のなす角が限界点の内側にあれば、どの点でもこれと同じことが成り立つ。

3 $2\theta_{ref_max}$ と θ_{e_max} の計測

まず図4に示す角膜反射計測装置を開発した。これは、9個の赤外線LED光源とカメラがそれぞれアームに取り付けられており、各アームを0度から180度の範囲で1度刻みで回転させられる装置である。

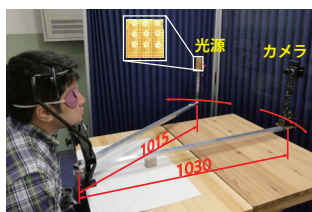


図4: 角膜反射計測装置

最大反射角 $2\theta_{ref_max}$ は、光源とカメラのなす角を180度から徐々に小さくして計測した。実験協力者は5人であった。この結果、平均は168度であった(表1)。この角度は、前述の θ_{e_max} の2倍よりも十分に大きいため、光軸上にカメラを固定すれば限界点を計測できることが明らかとなった。

表1: 計測結果

	平均[度]	最大	最小	SD
最大反射角 $2\theta_{ref_max}$	168	173	164	3.7
光源移動による θ_{e_max}	39.5	42.5	35	2.4
光源一体型カメラによる θ_{e_max} (個人間での θ_{e_max} の差)	40.1 (+0.6)	42 (+2.0)	36 (0)	2.0 (0.7)

θ_{e_max} は、カメラを正面に固定し光源を動かして計測した。限界点を計測する際、図5のように小さかった点が大きくなり、その後再び小さくなった。これは、角膜と強膜の交点になだらかな形状になっており、乱反射が起きたためと考えられる。そこで、図5の(a)を限界点とした。

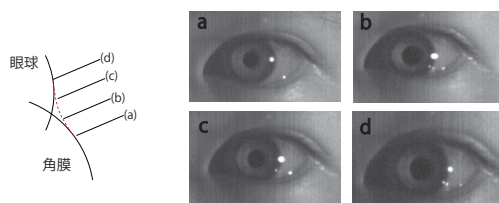


図5: 限界点の決定

実験協力者7人に対して限界点を計測した結果を表1示す。平均は39.5度であった。

θ_{e_max} が計測できたかを評価するために、光源とカメラを同じ位置に置き、法線上で角膜反射を起こす光源一体型カメラによる計測結果と比較した(表1に示す)。結果は、平均誤差は0.6度となり、正確に θ_{e_max} が計測できたと言える。

4 おわりに

本研究では、角膜反射の限界点に着目し、モデルによりカメラと光源の移動可能範囲を導出した上で、計測装置の開発と角度の計測を行った。また光源一体型カメラによる評価で、これらの有効性を明らかにした。今後は、瞼によるオクルージョンも考慮したモデルに発展させたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 16H02860, 16H03225 等の支援によって行われた。ここに感謝する。

参考文献

- [1] 江川 晃一, 山本 倫也, 長松 隆: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.11, pp.2476-2486, (2014).
- [2] 廣江 葵, 長松 隆, G. Rigoll: 車用広範囲視線計測装置に関する研究, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2016DVD-ROM 論文集, pp.381-386, (2016).
- [3] K. Dierkes, M. Kassner, and A. Bulling: A novel approach to single camera, glint-free 3D eye model fitting including corneal refraction, Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Article 9, 9 pages, (2018).
- [4] M. Yamamoto, R. Matsuo, S. Fukumori, and T. Nagamatsu: Modeling corneal reflection for eye-tracking considering eyelid occlusion, Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '18), Article 95, 3 pages, (2018).