

両眼モデルを用いた角膜表面反射画像の展開

須田 沙良^{*1} 町田 貴紀^{*2} 竹村 憲太郎^{*1*2}

Extracting Corneal Surface Image based on Binocular 3D Eye Model

Sara Suda,^{*1} Takanori Machida^{*2} and Kentaro Takemura^{*1*2}

Abstract – We have studied the method that estimates a point-of-regard using the corneal surface image, but the reflected area on corneal surface is smaller than the visual field. If the visual field can be captured continuously in daily life, it is expected to contribute the various research areas such as psychology. In this paper, we propose the method for generating image which covers the visual field based on the binocular 3D eye model.

Keywords : Corneal surface image, Binocular 3D Eye Model, Visual field

1. はじめに

近年、三次元眼球モデルを用いた視線計測技術は向上し、近赤外線を用いた高精度な視線計測^[1]だけでなく、Bernardo ら^[2]のように可視光での視線計測の研究も盛んに行われている。可視光の視線推定では、虹彩を追跡対象として視線計測を行う手法が一般的であるが、近年では角膜表面上に反射する外界情報に注目した研究も盛んに行われている^[3]。角膜表面反射画像の研究では、Nitschke ら^[4]によって超解像による高画質化も実現されている。また、角膜表面上の虹彩の模様は、外界情報を角膜表面から取得する上で妨げとなるが、Wang ら^[5]は角膜表面反射画像から虹彩の模様に依存しない画像の取得に成功しており、角膜表面に反射している外界情報の明瞭化も可能である。我々もこれまで単眼の角膜表面反射画像を用いた視線計測を提案し、光軸での視線計測では誤差約 9.5 度の精度で視線計測を実現している^[6]。しかし角膜表面反射画像で視野画像の生成を行う場合、取得可能な反射範囲が約 120 度であり^[7]、人の視野範囲の約 200 度^[8]を満たさないことがわかっていて、人の視野情報を常時取得することは、心理学など様々な分野への貢献が期待される。そこで本稿では広視野情報の取得が可能な両眼三次元眼球モデルを用いた角膜表面反射画像の展開手法を提案する。



図 1 虹彩領域の楕円近似
Fig. 1 The ellipse approximation for iris contours

2. 両眼の三次元眼球モデル

2.1 眼球モデル生成のための虹彩領域の取得

本研究では 2 つの眼球モデルを同一座標系に生成するため、両眼を 1 つのカメラで撮影したが、1 枚の画像で両眼を撮影することから目領域以外も多く映る。これによりカメラ設定が左右され角膜表面反射画像に適した設定とはならない。そこで、目領域以外の色の影響を最小にするため Gain をあげて撮影した。目を撮影すると一般的に虹彩は真円ではなく楕円となるため、画像上の左目右目それぞれの虹彩に対して、虹彩枠線と目尻、目頭の位置を手動で選択し、図 1 のように最小二乗法による楕円フィッティングを用い、両眼の虹彩領域を取得した。

2.2 両眼の眼球モデル生成

虹彩領域を示す楕円の長軸を r_{max} 、短軸を r_{min} 、虹彩の中心座標を (i_{Lx}, i_{Ly}) 、画像中心座標を (C_x, C_y) と定義する。また、角膜球の半径 r_C 及び、角膜球表面から眼球中心までの距離 r_{LE} 、角膜球中心から虹彩中心までの距離 d_{LC} 、虹彩の半径 r_L を表 1 のように解剖学データを基に設定し、これらの眼球パラメータ

*1: 東海大学院 工学研究科

*2: 東海大学 情報理工学部

*1: Graduate School of Engineering, Tokai University

*2: School of Information Science and Engineering, Tokai University

表 1 眼球モデルのパラメータ
Table 1 Parameters of the eyeball model

Kinds of eyeball parameters	Size[mm]
Radius of the corneal sphere	7.78
Distance between corneal surface and the eyeball center	13.00
Distance between the center of corneal sphere and the center of iris	5.60
Radius of the iris	5.60

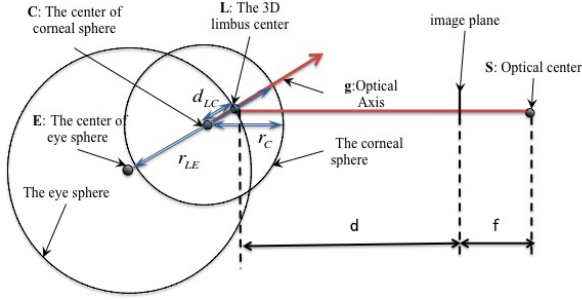


図 2 眼の幾何モデル
Fig. 2 Geometric model of eye

と楕円のパラメータを用いて両眼の三次元眼球モデルを図 2 に示した幾何モデルを用いて作成する。カメラの焦点距離を f とすると、三次元眼球モデル上の虹彩の傾き τ 及び、撮影した画像平面から角膜球上の虹彩中心までの距離 d はそれぞれ (1), (2) 式で算出される。また、これらを用いて三次元眼球モデル上の虹彩中心 \mathbf{L} は $z = d + f$ とすると (3) 式で求められる。

$$\tau = \pm \cos^{-1} \left(\frac{r_{min}}{r_{max}} \right) \quad (1)$$

$$d = f \frac{r_L}{r_{max}} \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \left[z \frac{i_{Lx} - C_x}{f}, z \frac{i_{Ly} - C_y}{f}, z \right]^T \quad (3)$$

画像上の虹彩の傾きを ϕ とおくと、後方強膜の中心と角膜球中心を通る光軸 \mathbf{g} は (4) 式で求められる。ただし、この計算は眼球が z 軸上にあることを想定していることから、角膜球中心の位置 \mathbf{C} とカメラのレンズ中心 \mathbf{S} に応じて、それぞれの光軸 \mathbf{g} を y 軸周りに θ 回転させる必要がある。左目の回転軸と右目の回転軸をそれぞれ $\mathbf{v}_L, \mathbf{v}_R$ とおくと、 $\mathbf{v}_L = [0, -1, 0]^T$ の単位ベクトルを回転軸として (5), (6) 式から回転行列 \mathbf{M} を算出し (7) 式を用いて θ 回転させている。右目も同様に回転軸 $\mathbf{v}_R = [0, 1, 0]^T$ として計算する。光軸 \mathbf{g}' を用いて角膜球モデルの中心 \mathbf{C} 、眼球モデルの中心 \mathbf{E} はそれぞれ (8) 式と (9) 式から算出され、図 3 に示すように同一座標系に両眼の眼球モデルが生成できる。

$$\mathbf{g} = [\sin(\tau) \sin(\phi), -\sin(\tau) \cos(\phi), -\cos(\tau)]^T \quad (4)$$

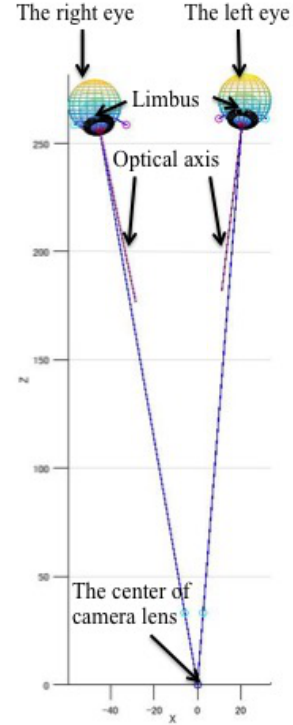


図 3 両眼の 3 次元眼球モデル
Fig. 3 Binocular 3D eye models

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 0 & -v_{Lz} & v_{Ly} \\ v_{Lz} & 0 & -v_{Lx} \\ -v_{Ly} & v_{Lx} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} + (\sin \theta) \mathbf{M}_r + (1 - \cos \theta) \mathbf{M}_r^2 \quad (6)$$

$$\mathbf{g}' = \mathbf{M} \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = -d_{LC} \frac{\mathbf{g}'}{\|\mathbf{g}'\|} \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -(r_{LE} - r_C) \frac{\mathbf{g}'}{\|\mathbf{g}'\|} + \mathbf{C} \quad (9)$$

3. 角膜表面反射画像の展開

角膜球面の反射画像展開には角膜球中心を座標系の中心とした図 4 のような幾何モデルを考える。三次元上の虹彩中心 \mathbf{L} を通るベクトルと角膜球との交点を \mathbf{P} 、カメラレンズ中心座標を \mathbf{S} とおき、 \mathbf{P} を基準とした接平面の各座標を \mathbf{T} と設定する。角膜表面は鏡面反射すると仮定し、(10) 式で \mathbf{T} の角膜球上の反射点を通る法線 \mathbf{N} は求められる。ここで、 x, y は (11) 式、(12) 式のような拘束が成り立つ。ただし、 $a = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}$, $b = \mathbf{S} \cdot \mathbf{T}$, $c = \mathbf{T} \cdot \mathbf{T}$, $d = |\mathbf{S} \times \mathbf{T}|^2$ であり、 $x > 0$,

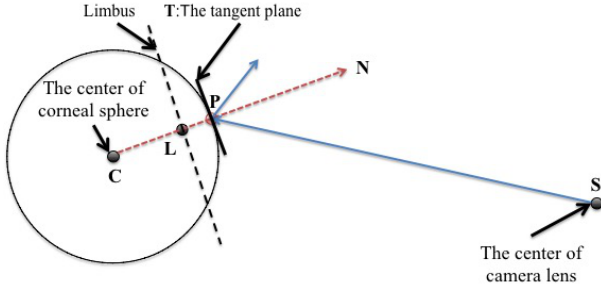


図4 反射点と眼球モデルの関係
Fig.4 Relationship between the eye model and reflection point.

$y > 0$ である。Nを求めることで接平面の各座標が反射する角膜球上の座標 \mathbf{R} が算出され、入力画像からそれぞれの \mathbf{R} の色情報を抽出することが可能となる。これにより、高解像度かつ球面に反射することで生じる歪みを除いた展開画像を取得することができる。図5と図6は屋内での入力画像(a)と展開画像の例となっている。右目及び、左目の展開画像がそれぞれ(b)(c)であり、いずれも建物、本棚や照明の輪郭線から歪みが除かれた画像となっていることがわかる。

$$\mathbf{N} = x\mathbf{S} + y\mathbf{T} \quad (10)$$

$$x = \frac{(-2y^2 + y + 1)}{(2by + 1)} \quad (11)$$

$$4cdy^4 - 4dy^3 + (a + 2b + c - 4ac)y^2 + 2(a - b)y + a - 1 = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{R} = r_C \frac{\mathbf{N}}{\|\mathbf{N}\|} \quad (13)$$

4. 虹彩領域のモデルベース探索

連続した両眼の角膜表面反射画像展開を行うため、虹彩領域の自動取得を行う。生成した眼球モデルの眼球中心を回転中心としてヨー、ピッチ方向に眼球モデルを回転させ、(14)式にあるように入力画像を2値化したのち反転させた画像 \mathbf{B} と回転させた眼球モデルの虹彩領域を投影した2値画像 \mathbf{I} の論理積の和が最大となる眼球モデルの角度を求めることで眼球の姿勢 $\hat{\theta}, \hat{\psi}$ を推定し、虹彩の探索を行う。これより、虹彩領域は図7に示すように自動取得し、連続的に展開画像を生成することが可能である。

$$\{\hat{\theta}, \hat{\psi}\} = \arg \max_{\theta, \psi} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n B_{ij} I_{\theta\psi ij} \quad (14)$$

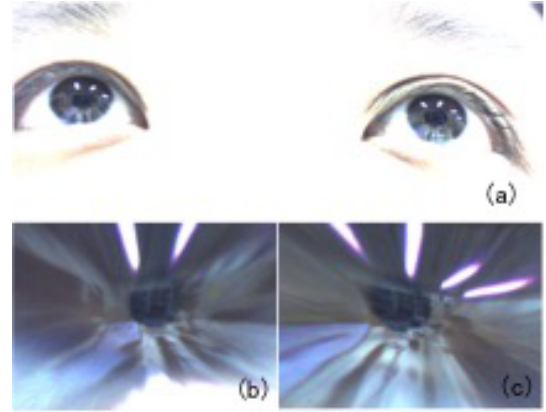


図5 屋内での両眼画像と展開画像。入力画像(a), 右目展開画像(b), 左目展開画像(c)

Fig.5 The binocular image (a) is captured indoors, and unwrapped images (b) and (c) are generated using the binocular image.

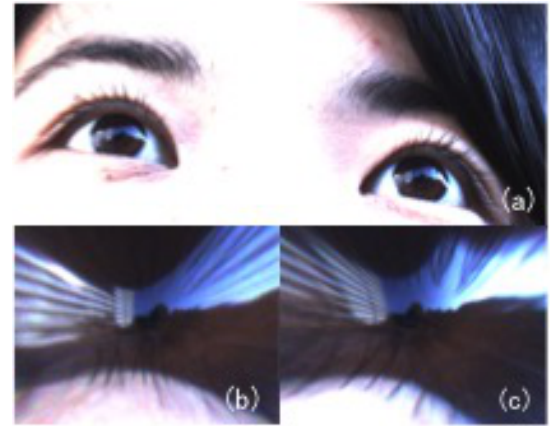


図6 屋外での両眼の画像と展開画像。入力画像(a), 右目展開画像(b), 左目展開画像(c)

Fig.6 The binocular image (a) is captured outdoors, and unwrapped images (b) and (c) are generated using the binocular image.

5. 外界情報の反射領域計測実験

5.1 実験条件

角膜表面に反射している外界情報の範囲を計測するため、実験を行った。85mm幅で色を変化させた画像を2つのディスプレイに表示させ、図8のように頭を固定した。また、顔の両脇にそれぞれ顔の中心から左右に180mm離れた場所にディスプレイを設置し、顔から300mm離して正面に設置したカメラから両眼を撮像した。本実験では、Point Grey Research社製のFL3-U3-88S2C-Cを用いて目領域を撮像し、片目約 400×350 pixelの解像度で取得している。取得した画像を基に、 1280×960 pixelの角膜表面反射画像を生成し、反射領域を確認する。また、撮像した画像



図 7 推定された虹彩領域
Fig. 7 Iris areas are estimated by the model-based iris tracking.

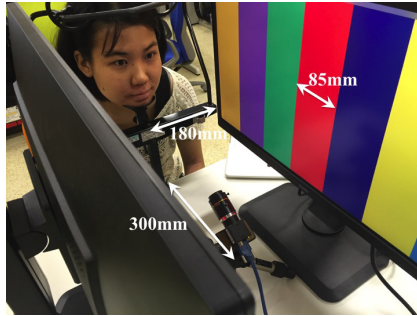


図 8 実験風景
Fig. 8 The snapshot of experiment

内の虹彩領域の両端から反射ベクトルを算出し反射角度の理論値を計算した。

5.2 実験の結果

実験の結果、図 9 のような画像が取得できた。両眼が映る画像 (a) から展開した画像内に反射しているディスプレイの範囲を確認すると右目 (b) と左目 (c) の展開画像は共に、ディスプレイに表示した黄土色の領域が角膜表面上に反射していることが確認できる。この範囲から反射角度を計算し、それぞれの目の反射角度を合計すると約 194.1 度の範囲の外界情報が角膜表面に反射していることがわかった。3 次元の眼球モデルから理論値を計算すると、反射角度は 170 度である。理論値と実測値に約 20 度の差が出た要因としては角膜球を真球としてモデルを生成しているためだと考えられる。理論値とはズレが生じたが、人の視野情報を両眼の角膜表面反射画像から取得することが可能であることが確認できた。

6. まとめ

本論文では、両眼の三次元眼球モデルを作成し、両眼の角膜表面反射画像から広視野の情報を得ることを実現した。また、先行研究^[7]では片眼の角膜表面反射範囲は 120 度となったが、両眼の角膜表面反射画像を用いることで 194.1 度まで取得範囲を拡大させることができた。角膜表面反射画像は、鮮明な角膜表面反射画像を取得するため Gain を上げて撮影しているが、Nitschke ら^[4]の超解像処理や Wang ら^[5]の虹彩模様の抽出を行えば、広視野かつ虹彩の模様に依存しない展開画像の取得が可能と考えられる。今後は広視野の

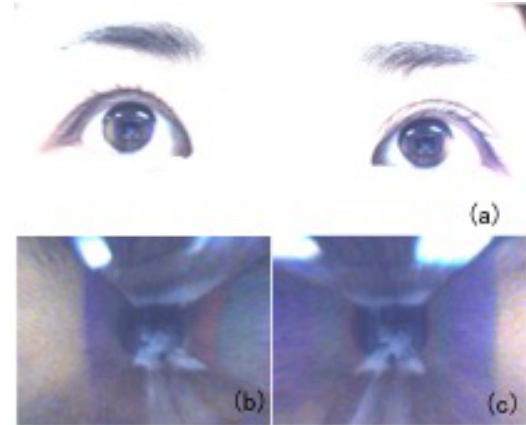


図 9 生成された視野画像。入力画像 (a)、右目展開画像 (b)、左目展開画像 (c)

Fig. 9 The generated image of visual field

鮮明な画像生成に取り組む予定である。

参考文献

- [1] Nagamatsu, T., Kamahara, J., et al.: Calibration-free Gaze Tracking Using a Binocular 3D Eye Model; CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.3613 - 3618 (2009).
- [2] Pires, B.R., Devyver, M., et al.: Unwrapping the Eye for Visible-Spectrum Gaze Tracking on Wearable Devices; IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp.369 - 376 (2013).
- [3] Nishino, K., et al.: Corneal Imaging System: Environment from Eyes; International Journal of Computer Vision 70, pp.23-40 (2006).
- [4] Nitschke, C., et al.: Super-Resolution from Corneal Images; 23rd British Machine Vision Conference, 22.1 - 22.12 (2012).
- [5] Wang, H., Lin, S., et al.: Separating Reflections in Human Iris Images for Illumination Estimation; International Conference on Computer Vision, Vol.2, pp.1691-1698 (2005).
- [6] Takemura, K., Yamakawa, T., et al.: Estimation of a focused object using a corneal surface image for eye-based interaction; Journal of Eye Movement Research, 7(3):4, 1-9 (2014).
- [7] 竹村, 須田: 日常生活における角膜表面反射画像を用いた視野映像の生成; 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 1C3-03 (2014).
- [8] Walker, H.K.: Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations. 3rd edition.; Butterworths (1990).