

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02738

研究課題名(和文)角膜フィードバックARの実現

研究課題名(英文)Realization of Corneal Feedback AR

研究代表者

清川 清(Kiyokawa, Kiyoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：60358869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：光学シースルー式頭部搭載型ディスプレイ(HMD)を用いた拡張現実(AR)において、角膜イメージングによりユーザ体験を最適化する、新しいARの構成法「角膜フィードバックAR」の研究開発に取り組んだ。具体的には、角膜反射像からHMD座標系における眼球中心座標を自動校正する手法や、角膜反射像を用いて誤差約1.7度の高精度で視線推定する手法を開発した。角膜反射像とシーンカメラの映像を頑健・高精度に対応付けする手法を開発し、これを発展させてアイコンタクトを自動判別するシステムを開発した。また、視線の動きから疾病性眼球運動を自動診断するシステムや注視点付近のみがスローモーションで見えるシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Targeting augmented reality (AR) using optical see-through head mounted displays (HMD), we worked on the research and development of a new AR concept "cornea feedback AR" that optimizes the user experience by corneal imaging. Specifically, we developed a method for automatically calibrating the eyeball center in the HMD coordinate system from corneal reflection images, and a method for accurately estimating the gaze direction with an error of about 1.7 degrees using corneal reflection images. We also developed a method to robustly and accurately match corneal images with images of a scene camera, and based on this, developed a system that automatically finds eye contacts. In addition, we developed a system that automatically diagnoses anomaly eye movement from gaze behaviors and a system that a user can replay a fast 3D motion at a slower speed slow around the area of point of gaze.

研究分野：拡張現実感

キーワード：拡張現実 角膜反射 視線推定 ユーザインタフェース

## 1. 研究開始当初の背景

エプソン Moverio シリーズなど、光学シースルー式 (Optical See-through, OST) 頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) が多数登場している (図 1)。OST-HMD を用いた拡張現実 (Augmented Reality, AR) は、ユーザの位置や姿勢に合った 3 次元情報を眼前の実環境に重畳表示することで直感的なコンピューティングを可能とする。

ビデオシースルー (Video See-through, VST) 式 AR では、重畳結果を再評価して AR シーンの高品質を再帰的に改善するようなアプローチが一般的である。これに対し、OST-HMD による AR では、実環境と HMD 映像がスクリーン上ではなくユーザの網膜上で合成されるため、実際にユーザがどのように AR シーンを見ているか分からないという問題があった。このため、位置ずれをはじめとする諸問題はある程度「仕方がない」と考えられてきた。感覚情報、特に視覚情報を拡張するという本来のコンセプトからはほど遠く、理想的な位置からずれた場所に、ユーザの意志と関係なく、適当な参考情報を見せる程度に留まっていたと言ってもよい。

一方、人間の角膜には周囲の視界が映り込んでおり、これを解析する角膜イメージングの研究が盛んになっている。そこで、角膜イメージングを用いてユーザが観察する AR シーンをシステム実行時に評価しながら最適な AR 体験を提供できるのではないかとこの着想に至った。



図 1: 光学シースルーHMD の例

## 2. 研究の目的

光学シースルー式 (OST) 頭部搭載型ディスプレイ (HMD) を用いた拡張現実 (AR) において、角膜イメージングによりユーザの実際の「見え」を AR システムのメインループの一部として取り込むことで、ユーザ体験を自動的に最適化する、まったく新しい AR の構成法「角膜フィードバック AR」を実現する。角膜フィードバック AR で初めて実現可能となる高度な機能として、眼球位置の実時間計測による (HMD 映像が意図した位置からずれて見える) 位置ずれの根本的解消、実環境と HMD 映像のコントラストなどの自動評価、ユーザが何にどの程度注目している

かに基づく適応的情報提示、などを開発する。これらに適した新たな角膜像解析手法、最適なカメラ配置を備えた新たな OST-HMD、などを開発し、角膜フィードバック AR を利用する際の要素技術を確立する。

図 2 に、本研究で新たに提案する「角膜フィードバック AR」の処理の流れを示す。A~C は本研究の 3 つの研究項目に対応する。一般的な AR (図 2 上) ではユーザの実際の「見え」を無視し、ユーザの頭部の位置姿勢に合わせて情報提示する。一方、角膜フィードバック AR (図 2 下) ではユーザの角膜像を取得し、それを解析することで様々な高度な機能を実現する。

角膜フィードバック AR が実現すれば、ユーザが見たいと感じたときだけ、その事物の情報を完璧に位置合わせして見ることができ、自身の視覚が真に拡張したと感ずるような AR システムを初めて実現できると考えられる。これにより、OST-HMD による AR の可用性を飛躍的に高め、手術支援やプラント管理など、ミッションクリティカルな用途でも安心して利用できるようになる。

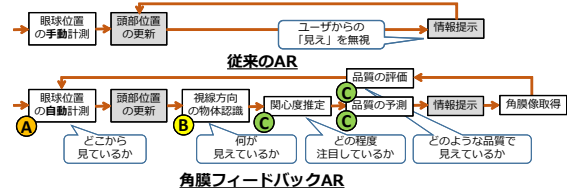


図 2: 従来の AR (上) と提案する AR (下)

## 3. 研究の方法

研究期間内に、特に以下の 3 つの機能を取り上げて検討する。

### 【(1) 自動校正】

HMD 座標系での眼球位置はユーザごとに異なる。また、HMD の着脱ごとにずれる。その結果生じる提示情報の位置ずれは AR の大きな課題であった。事前の校正で位置ずれを抑えられるが煩雑である。眼球位置が自動で得られれば、位置ずれのない高品質な AR になる。自動校正の従来法もあるが精度が劣り頑健でない。本研究項目では、中澤らの従来法を発展させ、HMD 映像と角膜反射像の対応から頑健かつ自動的に眼球位置を校正する。

### 【(2) 視線方向の物体認識】

多くの AR では、ユーザの興味や欲求を考慮せずに情報提示するため、不要不急の情報が溢れ重要な情報が埋もれがちになる。ユーザの視線方向にある物体を認識して情報提示すればこの問題を緩和できるが、従来法は視線推定に煩雑な校正を要する。本研究項目では角膜反射像と既知の画像を直接対応付

け、校正が不要で視距離によらない視線推定および視線方向の物体認識を実現する。竹村らの類似法や研究項目(1)の自動校正法では、実環境か HMD 映像の一方を対象とし、AR 状況下では使えない。そこで、インバースレンダリングの考え方で画像合成により視線推定する手法を検討する。

### 【(3) 適応的情報提示】

視線からユーザの内的状態を推定する研究は数多いが、AR との併用例は少ない。また、OST-HMD 越しに見える AR シーンの品質評価やそれに基づく情報提示は例がない。本研究項目では、視線の動きと角膜反射像から実際に視線方向に注意が向いているか否か、どの範囲や程度で関心があるかを推定する。また、HMD 映像を重畳表示した AR シーンの品質を事前に予測してコントラストやレイアウトの見やすい情報提示を行うと同時に、実際の「見え」の品質を角膜反射像から直接評価して予測モデルを更新する。

## 4. 研究成果

### 【(1) 自動校正】

平成 27 年度は、角膜反射像から眼球中心位置を得る手法を検討した(図 3) [J4]。まず、OST-HMD 越しに校正パターンを撮影し、アイカメラ座標系でのスクリーン形状を得た。次に、HMD 映像の角膜反射像をアイカメラで撮影した。角膜球と眼球が虹彩輪郭で交差する眼球モデルを用い、単一フレームの特徴点対応から角膜球の中心を求め、複数フレームで得た角膜球中心から眼球中心を求めた。得られた画像を解析し、既存手法に比べて安定的に自動校正できることを示した。

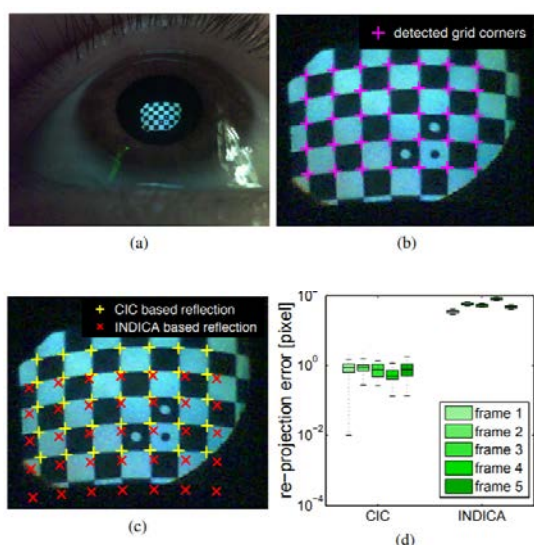


図3: 角膜反射からのHMD校正 (a)角膜像 (b)抽出特徴点 (c)提案/従来手法の再投影結果 (d)従来法(INDICA)との精度比較 [J4]

平成 28 年度は、アイカメラが HMD と分離着脱可能な場合の、アイカメラ・HMD・眼球の 3 者の位置関係の自動校正法を検討した(図 4) [C3]。アイカメラと HMD にそれぞれ複数の赤外 LED を配置し、それらの角膜反射像から 3 者の位置関係を求める。本手法は角膜フィードバック AR の実用化に向けた重要な成果と言える。また、角膜反射像から眼球の焦点位置を推定する手法についても検討した。第 3 プルキニエ像の画像上の位置と実際の焦点距離の対応から回帰モデルを学習する。焦点距離を推定できれば被写界深度を再現したより写実的な AR シーンをレンダリング可能であり、重要な成果と言える。また、角膜反射像からディスプレイ輝度を自動調整する基礎検討を開始した。

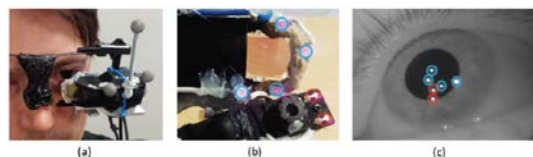


図4: 角膜反射を用いたアイカメラ・HMDの自動校正 (a)装置概観 (b)赤外LED(青/赤丸) (c)LEDの角膜反射像[C3]

平成 29 年度は、アイカメラが捉えた角膜像からのユーザ認証手法を開発した。角膜像には虹彩などの眼の情報に加えてHMDの映像や実世界の情景も写り込んでいるため、これらの反射成分を除去し、ユーザ認証する。具体的には、様々な視線方向に対応する角膜像を眼球座標系で統合し、反射成分を外れ値として除外することで眼球座標系での眼球の画素値を推定する。これを既知の虹彩画像DBと照合し、ユーザ認証を実現した。

全体に、当初計画通り角膜反射像から眼球中心位置などを校正する手法を順調に研究開発することができた。

### 【(2) 視線方向の物体認識】

平成 27 年度は、実環境と HMD 映像が混在する角膜反射像から、インバースレンダリングにより視線推定することを検討した。虹彩パターンおよび実環境の映り込みを無視し、HMD 映像のみが角膜に反射する状況で、視線推定を行った。その結果、視線推定は可能であるが安定性に問題があることが分かった。次に、角膜反射を用いて虹彩輪郭上の特徴点が存在する画像上の位置を絞り込み、安定的に虹彩輪郭を抽出して姿勢推定する方法を考案し実装した(図 5) [C2]。その結果、誤差約 1.7 度で視線推定が行えた。

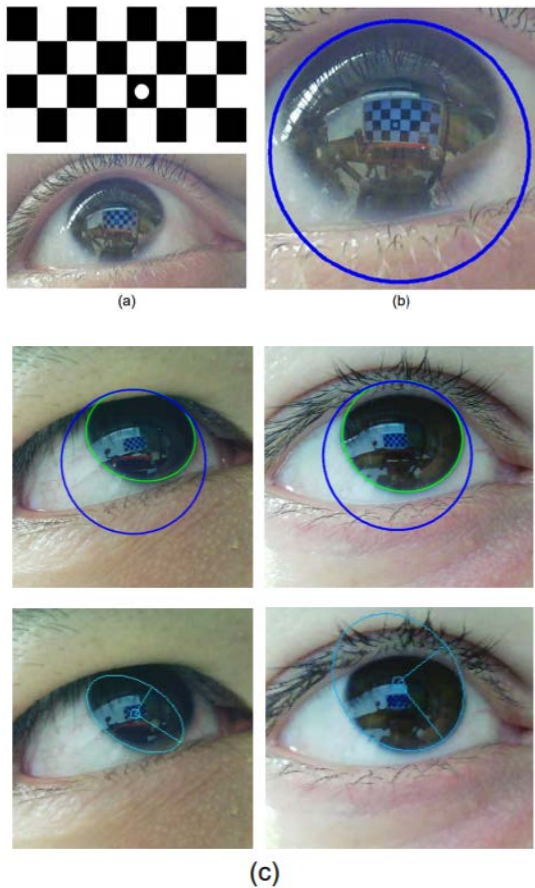


図 5: 角膜反射による高精度視線推定 (a) 格子パターンと角膜像 (b)推定された角膜球 (c)上段: 提案手法により検出した虹彩, 下段: 従来手法より検出した虹彩[C2]

平成 28 年度は、角膜反射像と外界を直接撮影するシーンカメラの対応付をより頑健に行う手法を検討した (図 6, 図 7) [J3]。従来 3.37 度程度の対応付け精度を 1.05 度程度に改善した。また、角膜反射像から虹彩パターンを分離する手法について基礎検討を開始した。

平成 29 年度は、深層学習を用いて角膜像から撮影位置を推定する手法を開発した。さらに、深層学習を用いて可視光画像から瞳孔検出する手法を開発し、これを用いて注視点推定を行った。具体的な応用例として、対面話者とのアイコンタクトの有無[J1]や頻度などを実時間で記録するシステムを開発し、介護の現場において可用性を確認した。分担者の中澤は本研究成果を発展させ、「優しい介護」を実現するための CREST プロジェクトを平成 29 年度より実施している。

全体に、視線方向の物体認識を行う直接的な研究に関しては想定したほどの大きな成果が得られなかったが、それ以外の大きな成果がいくつか得られた。例えば、高精細なシーンカメラとの高精度の位置合わせ手法として RANRESAC(Random Resample Consensus)というノイズに頑健な手法を提案し、対応付け誤差を従来の 3 分の 1 以下に低減した。また、角膜像・注視行動データベースを作成し

た。さらに、可視光画像から注視点推定を行う新たな手法を開発し、アイコンタクトの頻度などから介護の良し悪しを自動的に判別するシステムに昇華させたことは大きな成果と言える。

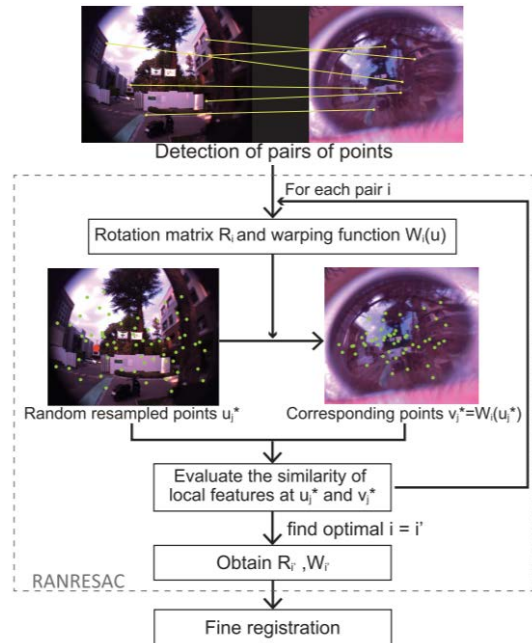


図 6: 角膜反射像とシーンカメラの高精度の対応付けのアルゴリズム[J3]

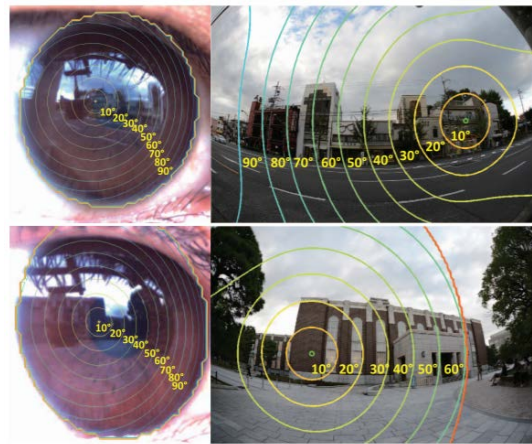


図 7: 角膜反射像とシーンカメラの高精度の対応付けの例[J3]

### 【(3) 適応的情報提示】

平成 27 年度はビデオシースルーHMD と両眼視線追跡装置を用い、視線や眼のジェスチャ (瞬目や凝視など) を用いた適応的情報提示手法を検討し、視線追跡を用いた関心度推定モデルについて基礎的検討を行った。また、角膜イメージング法と赤外線 LED、カメラを組み合わせた HUD (Head Up Display) を構築し、システムの試作及び評価を行った。本システムは、ディスプレイ・ハーフミラーおよびディスプレイ領域を認識する LED 群からなり、映像の重畳提示をキャリブレーション

ョンフリーで実現できる。

平成 28 年度は、視線や目のジェスチャを用いた適応的情報提示手法について引き続き検討した。また、視線の振舞いを自動解析する研究から派生して、HMD に提示した画像指標を追跡する眼球運動を解析することで、パーキンソン病の可能性を自動的に診断するシステムを構築した (図 8) [J2]。本システムは VR に関する最難関の国際会議に採択され高い評価を得た。また、適応的情報提示の一環として、頭部運動から HMD に表示されるビデオ映像の視野角を自動的に調節する、視覚拡張システムを構築した。

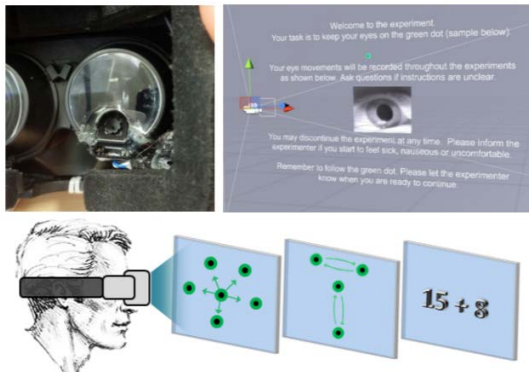


図 8: 視線検出を用いた疾病性眼球運動の自動診断[J2]

平成 29 年度は、視線や目のジェスチャを用いた適応的情報提示手法について引き続き検討した。具体的には、実時間三次元再構築と組み合わせ、視線を向けた範囲だけがスローモーションに見える AR システムを開発した (図 9) [C1]。素早い三次元の動作を再確認したいようなスポーツや舞踊などへの応用が考えられる。また、同様の技術を応用して、屋内意匠や組立作業などを支援する AR システムも開発した。

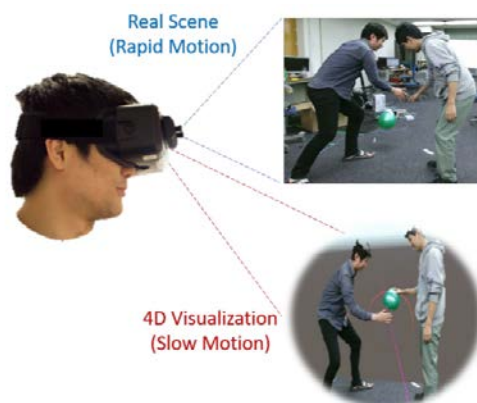


図 9: 注視点付近のみがスローモーションで見える AR システム[C1]

全体に、適応的情報提示については当初予定から少しずつ異なる方向性に研究が発展した。例えば、視線からの関心度推定などの応用については想定したほどの進展が見られなかった一方で、視線の振舞いからパーキ

ンソン病を自動診断するシステムを構築するなど、学界で高く評価されるシステムを構築することができた。従って、全体として研究はおおむね順調に進展したと言える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 1 件)

[J1] (査読あり) Yu Mitsuzumi, Atsushi Nakazawa, and Toyoaki Nishida, "DEEP eye contact detector: Robust eye contact bid detection using convolutional neural network," British Machine Vision Conference (BMVC2017), pp. 1-12, 2017. <https://bmvc2017.london/programme-1/>

[J2] (査読あり) Jason Orlosky, Yuta Itoh, M Ranchet, Kiyoshi Kiyokawa, J Morgan, and H. Devos, "Emulation of Physician Tasks in Eye-tracked Virtual Reality for Remote Diagnosis of Neurodegenerative Disease," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), Mar., 2017. doi: 10.1109/TVCG.2017.2657018.

[J3] (査読あり) Atsushi Nakazawa, Christian Nitschke, Toyoaki Nishida, "Registration of eye reflection and scene images using an aspheric eye model," Journal of the Optical Society America, Vol. 33, pp. 2264-2276, 2016. doi: 10.1364/JOSAA.33.002264

[J4] (査読あり) Alexandor Plopski, Yuta Itoh, Christian Nitschke, Kiyoshi Kiyokawa, Gudrun Klinker, and Haruo Takemura, "Corneal-Imaging Calibration for Optical See-Through Head-Mounted Displays," IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics (TVCG), Vol. 21, No. 4, pp. 481-490, 2015. doi: 10.1109/TVCG.2015.2391857

[学会発表] (計 7 5 件)

[C1] (査読あり) Tao Tao, Photchara Ratsamee, Yuki Uranishi, Kiyoshi Kiyokawa, Tomohiro Mashita, and Haruo Takemura, "An Interactive 4D Vision Augmentation of Rapid Motion," Proc. Augmented Human 2018, Seoul, Feb. 2018. doi: 10.1145/3174910.3174934

[C2] (査読あり) Alexander Plopski, Christian Nitschke, Kiyoshi Kiyokawa, Dieter Schmalstieg and Haruo Takemura: "Hybrid Eye Tracking:

Combining Iris Contour and Corneal Imaging," Proc. of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 20th Eurographics Workshop on Virtual Environments (ICAT-EGVE 2015), Oct. 2015. doi: 10.2312/egve.20151327

- [C3] (査読あり) Alexander Plopski, Yuta Itoh, Jason Orlosky, Christian Nitschke, Kiyoshi Kiyokawa, Gudrun Klinker, "Automated Spatial Calibration of HMD Systems with Unconstrained Eye-cameras," Proc. of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2016, Sep., 2016. doi: 10.1109/ISMAR.2016.16

[図書] (計9件)

- [B1] (査読なし) 清川 清, "AR 向けヘッドマウントディスプレイの研究動向", in "VR/AR 技術の開発動向と最新応用事例", 技術情報協会, 2018. ISBN : 978-4-86104-694-0 (11 ページ)
- [B2] (査読なし) Christian Nitschke and Atsushi Nakazawa, "The Wiley Handbook of Human Computer Interaction: Corneal Imaging," John Wiley & Sons, Ltd, 2018. doi: 10.1002/9781118976005.ch21

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清川 清 (KIYOKAWA, Kiyoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号 : 6 0 3 5 8 8 6 9

### (2) 研究分担者

間下 以大 (MASHITA, Tomohiro)

大阪大学・サイバーメディアセンター・准教授

研究者番号 : 0 0 4 6 7 6 0 6

中澤 篤志 (NAKAZAWA, Atsushi)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号 : 2 0 3 6 2 5 9 3