

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：94301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03269

研究課題名（和文）再帰性反射マーカを持つ眼球運動計測用コンタクトレンズに関する基礎検討

研究課題名（英文）Study on contact lens device with retro-reflection markers for human eye-movement measurements

研究代表者

内海 章（Utsumi, Akira）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・インタラクション科学研究所・研究室長

研究者番号：80395152

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではコンタクトレンズ上に形成した再帰性反射マーカールの反射パターンを光学的に追跡することで3軸の眼球運動を高精度で計測する手法について検討した。市販コンタクトレンズの素材であるPDMS（ポリジメチルシロキサン）によるデバイス試作を進め、コンタクトレンズ上の4か所に再帰性反射構造（コーナーキューブ）を平面上に稠密配置したマーカールパターンを形成した。試作デバイスを豚眼上に装着して行った評価実験によって再帰性反射の特性により広範囲で安定したマーカール観測ができること、マーカールパターンの観測による眼球の回旋運動を含む3軸の眼球運動計測が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

眼球運動には水平・垂直の2軸の回転に光軸まわりの回転（回旋）を加えた3軸の回転運動があり、これら3軸の眼球運動を高精度で計測できてはじめて目の動きと脳活動の関係を完全に理解できる。本研究では、再帰性反射マーカールをコンタクトレンズ上に配列し、眼に装着したコンタクトレンズ上のマーカールの反射パターンを光学的に追跡する低侵襲の手法によって3軸眼球運動計測が可能となることを、実際にコンタクトレンズ型デバイスを作成して確認した。提案手法による安定した高精度の3軸の眼球運動計測が実現されれば、眼球運動に関してこれまで装置の制約で十分に検討が進まなかった認知科学、医学等の幅広い分野の学術の発展に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated a method to measure human eye-movements including rotations in three axes (horizontal, vertical, and torsional) using a contact lens device equipped with retro-reflection optical markers. We built four sets of planarly arranged retro-reflection markers on a contact-lens-like device made of PDMS (polydimethylsiloxane), which is a commonly used material for making a soft contact lens. We evaluated our method with putting the device on a pig eye. We confirmed that the marker positions can be easily detected on the captured images based on the property of retro-reflection where the markers are illuminated from the front position and observed with a camera located near the illumination. We also confirmed eye movements including three axes rotations can be detected based on the marker positions.

研究分野：ヒューマンインタフェース、コンピュータビジョン

キーワード：眼球運動計測 コンタクトレンズ 再帰性反射 回旋運動

## 1. 研究開始当初の背景

「目は心の窓」といわれるように目の動きと脳の活動には密接な関わりがある。そのため、眼球運動の計測には、認知科学、人間工学に関する基礎的研究、視線に基づくマーケティング調査等の産業応用まで幅広い分野のニーズがある。

眼球運動は3種類の異なる脳神経（動眼神経核、滑車神経核、外転神経核）によって制御される6種類の外眼筋によって支えられており、水平・垂直の2軸の回転に光軸まわりの回転(回旋)を加えた3軸の回転運動がある。従って、これら3軸の眼球運動を高精度で計測できてはじめて目の動きと脳活動の関係を完全に理解できるようになるといえる。例えば、医療分野では眼球運動を3つの回転軸について精密に検査することで障害の生じている神経経路を特定し中枢系疾患を含む疾病の正確な鑑別を行うことが可能となる。

しかし、現在広く利用されている瞳孔角膜反射法、EOG法などの眼球運動計測手法はいずれも水平・垂直の眼球運動のみを計測対象としており、原理上回旋運動を捉えることが難しい。一部には強膜反射法を発展させて回旋運動を計測する試みもあるが[1]、強膜反射には人種差・個人差が大きく実用化は容易ではない。また、瞳孔角膜反射法では眼球表面における鏡面反射成分である角膜反射像を観測するために照明とカメラの配置条件に厳しい制約があり瞼・睫毛等によるオクルージョンの影響を受けやすい、EOG法では計測する眼電位が時間経過とともにドリフトを生じるため定期的な再キャリブレーションが不可欠である、など従来法には計測の安定性の面でも問題がある。

一方で、金属コイルを埋め込んだコンタクトレンズ状のデバイスを眼に装着し、頭部周辺に配置した対向のコイルで発生した磁界により生じる電位を計測することで眼球運動を計測するサーチコイル法は、極めて高い精度と3軸の眼球運動計測を可能とする方法として知られている[2]。しかし、サーチコイル法では目に装着したコイルを外部の装置と有線で接続する必要があり、装着に麻酔を要するなど被計測者への負担は大きい。装置も大掛かりとなるため、広く利用されるには至っていない。サーチコイル法のように高精度の3軸計測を可能としながら、人への負担が少ない安定した計測手段の実現が望まれる。

## 2. 研究の目的

本研究で検討する眼球運動計測手法は、再帰性反射マーカータを持つコンタクトレンズを被計測者の眼に装着し、マーカータパターンを外部から光学的に計測することによって3軸の眼球運動を安定に計測する独自の方式である。眼球運動計測手法として広く利用されている瞳孔角膜反射法が、参照点であるプルキニエ像に対する相対的な瞳孔位置の水平および垂直方向の変位を画像計測する方法であるため、眼球の回旋運動を原理的に計測できないのに対して、本手法では眼球運動をコンタクトレンズ型デバイスの姿勢変化として直接計測するため、水平・垂直・回旋の3軸の眼球運動を計測することが可能となる。

提案手法は、眼球運動をコンタクトレンズの運動として計測する点でサーチコイル法と共通性があるが、サーチコイル法が眼球に装着したサーチコイルと外部機器を常時無線で接続する必要があり、被計測者の負担が極めて大きいのに対して、本手法ではコンタクトレンズ型デバイスを装着しその運動を光学的に遠隔から計測するため、被計測者の負担が小さい点に利点がある。反射マーカータの照明には通常近赤外光を利用するが、可視光で照明することで眼球運動を目視観察するための補助デバイスとして使用することも想定される。

再帰性反射マーカータ付きレンズは、生体安全性を考慮し、市販の使い捨てコンタクトレンズで広く用いられているPDMS（ポリジメチルシロキサン）樹脂のみを利用して作成する。再帰性反射構造としてよく知られているコーナーキューブは垂直に組み合わせられた3枚のミラーによって実現されるが、本研究ではPDMSの背面に空気層を設けることで屈折率の差から全反射を生じさせてコーナーキューブを機能させ、コーナーキューブをコンタクトレンズ形状のデバイス上に配列し、マーカータ観測による高精度の3軸眼球運動計測を実現する(図1)。

本研究によって既存の手法に比べて格段に安定した高精度の眼球運動計測を実現できれば多くの学術分野への波及効果が考えられる。特に3軸の眼球運動計測については、医療分野への応用可能性が高い。眼球運動と脳

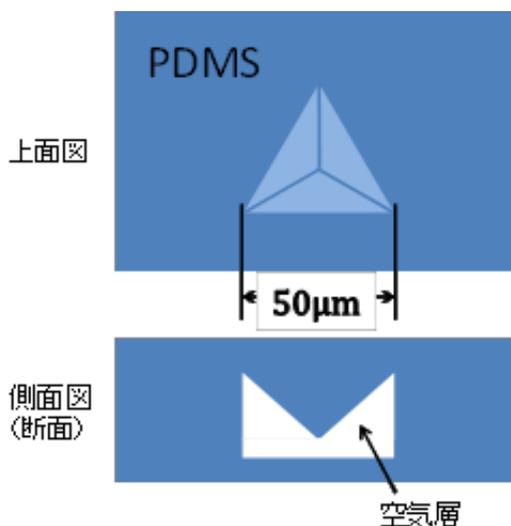


図1 PDMS上に形成したコーナーキューブのイメージ(背面に設けた空気層による全反射を利用)

の密接な関わりから、眼球運動に関連する疾病は眼や耳の末梢系の障害から脳梗塞・脳腫瘍などの中枢系の疾患まで多岐に渡る。眼球運動の精密な計測はこれらの疾患の正確な鑑別を可能とする。例えば眼球運動に関連する代表的な症状にめまいがあるが、めまいを訴えて耳鼻科を受診する患者の約 20%程度が中枢系のめまいであるといわれており、めまいの要因を正確に鑑別することはこれらの重篤な疾患の早期発見にも寄与できると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究で検討を進める 3 軸眼球運動計測法は、眼球上に装着したコンタクトレンズ型デバイスを画像計測することによってサーチコイル法と同様の安定した 3 軸眼球運動計測を可能とするものである。コンタクトレンズ型デバイスを市販の使い捨てソフトコンタクトレンズと同じ PDMS のみで作成することで、安全性が高く被計測者の負担が小さい計測手段となることが期待される。同手法を利用することで、回旋運動を含む 3 軸の眼球運動計測が可能となり、既存の視線計測技術のような認知科学分野等でのヒトの注意・興味の推定といった目的にとどまらず、医療分野においてめまい・眼球運動障害について障害の有無や程度を的確に把握できる情報を提供できる。本研究では、研究期間内に市販ソフトコンタクトレンズと同じ素材である PDMS（ポリジメチルシロキサン）によるコンタクトレンズデバイスの成型方法について検討し、実際に PDMS により再帰性反射マーカを一体化したコンタクトレンズが作成できることの確認を進めた。さらに、マーカパターンを外部から光学的に計測することによって回旋運動を含む眼球運動を安定に計測できることを確認した。

### 4. 研究成果

本研究では、眼球運動計測における上記コンタクトレンズ型デバイスの有効性を確認するため、以下に述べるように PDMS によるデバイスの形成方法の確立、デバイス試作、性能評価を進めた。

まず PDMS を基材として再帰性反射構造を形成する手法について検討した。ソフトコンタクトレンズに素材として使用される PDMS によってコーナーキューブ構造による光学マーカを作成するために、半導体製造工程に用いられるフォトレジストに対する精密な露光制御によって形成した成型型を利用して PDMS を成形する手法と、金属の切削加工によって作成する精密金型に樹脂を充填することで成形した PDMS を得る手法について検討した。その結果、前者のフォトレジストによる方法では安価に複雑な形状を得ることが可能である一方で現像時間・硬化条件・脱気処理の制御における難易度が高く安定した成型型の形成が困難であり、精密金型を利用して樹脂型を形成する方法が PDMS 成形において精度・安定性の面で有利であることを確認した。

精密金型を用いたコンタクトレンズ型デバイスの成型においては、精密金型によってコンタクトレンズ型デバイスを直接成形する方法では同一形状のデバイスを低コストで安定して作成することが難しいため、精密金型を利用してまず樹脂 (PP (ポリプロピレン)) 製の型を作成し、PP 型によってコンタクトレンズ型デバイスを成形する方法を採用した。最終的に、精密金型により再帰性反射構造を持つ樹脂型を作成し、コンタクトレンズ形状 (球面形状) の PDMS デバイスを作成した。試作デバイスでは、コンタクトレンズ上の 4 か所に再帰性反射構造を平面上に稠密配置したマーカパターンを形成した。マーカパターンは画像処理における認識の容易さを考慮し非対称配置とした。試作デバイスを豚眼上に装着し、同軸落射照明によるカメラ撮影によって評価画像を撮影した。評価画像を解析し、再帰性反射の特性による広範囲で安定したマーカ観測ができること、マーカパターンの観測によって眼球の回旋運動を含む 3 軸の眼球運動計測が可能であることを確認した。以下では、各項目について説明する。

まず、フォトレジストに対する精密な露光制御による成形結果について述べる。フォトレジストによる手法には、露光制御によって様々な形状を容易に作成できるという利点がある。本研究においては、コーナーキューブの配置の異なる多種類のデバイスを安価に作成することにつながるため、同手法による試作を試みた。図 2 はフォトレジストの露光制御により作成したコーナーキューブの顕微鏡写真である。同図左にみられるように、稠密配置したコーナーキューブが作成できていることが分かる。しかしながら、同図右に示す通り、検討した試作方法では作成した形状の平面性が十分ではなく満足な反射性能が得られないことが明らかになった。これに対し

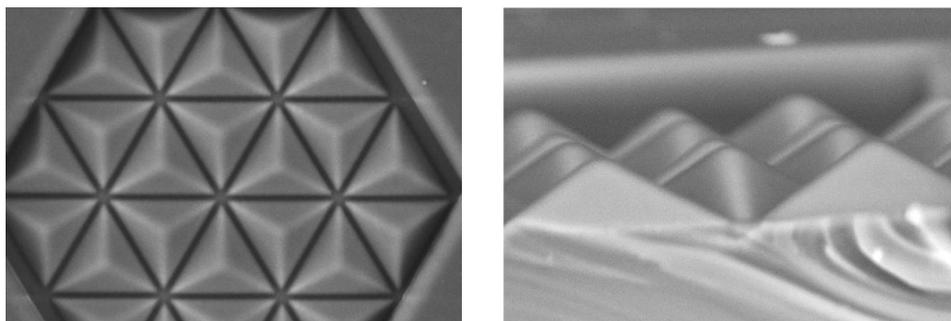


図 2 フォトレジストによるコーナーキューブ形成結果

て、精密金型によって作成した形状では、高い平面性が得られる（図3）。そのため、以後の試作は精密金型による方法を用いた。

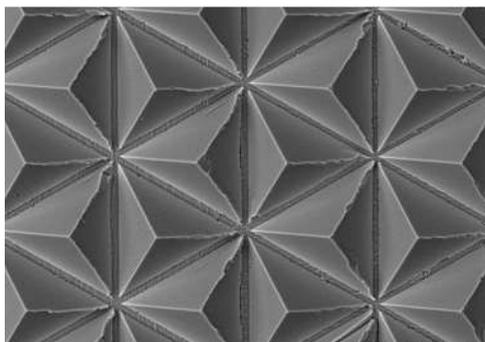


図3 精密金型によるコーナーキューブ形成結果

最終的に試作したコンタクトレンズデバイスの外観を図4（左）に示す。ここに見られるようにコーナーキューブによる再帰性反射構造を稠密に配置することで形成したマーカーターンをレンズ周辺の同一円周上の4か所に配置した。同軸落射照明によるマーカーターン部の撮影像を同図右に示す。コーナーキューブによる再帰性反射によってマーカーターンが鮮明に観測できていることが確認できる。

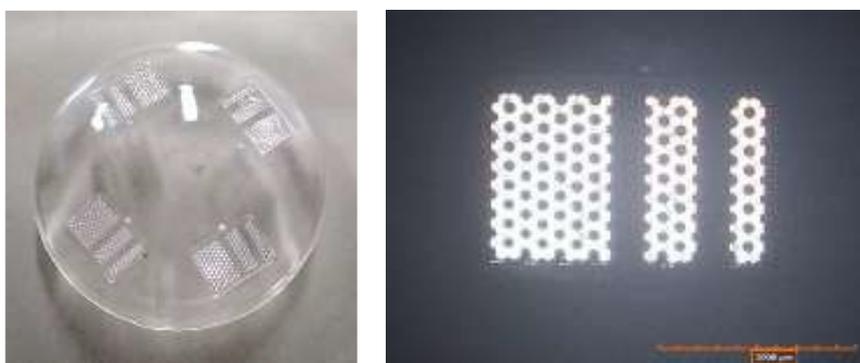


図4 試作したコンタクトレンズデバイス（左）とマーカーターン反射像（右）

試作したコンタクトレンズデバイスを豚眼に装着し性能評価を行った（図5）。ここでは黒目部が上方に向くように豚眼を配置し、黒目にかぶせるようにコンタクトレンズデバイスを装着した。豚眼を回転ステージ上に載せて、同軸落射照明を持つカメラによって角度を変えながら撮影した。提案手法ではマーカーターンの持つ既知の明暗パターンを探索することで、撮影画像内から容易にマーカーターンを検出することができる。図6に撮影画像からのマーカーターン検出例を示す。このようにデバイス上に配置された4個のマーカーターンが適切に検出されている。検出されたマーカーターンの位置および形状の変化から、画像内のコンタクトレンズデバイスの位置および姿勢が算出される。図7に本実験における回旋運動の検出例を示す。本手法によりコンタクトレンズデバイスの回旋運動が適切に検出できていることがわかる（計測誤差約0.1度）。瞳孔角膜反射法、EOG法などの従来の眼球運動計測手法では、原理上眼球の回旋運動を計測することは困難であったが、提案手法では回旋運動を含む眼球運動を高精度に計測できることを確認した。

さらに本研究では、眼球運動計測に関連する研究として、機械学習による顔形状・眼球パラメータ推定手法、視認推定を利用した視覚探索タスク支援についても併せて検討を進めた。



図5 豚眼に装着したコンタクトレンズデバイス

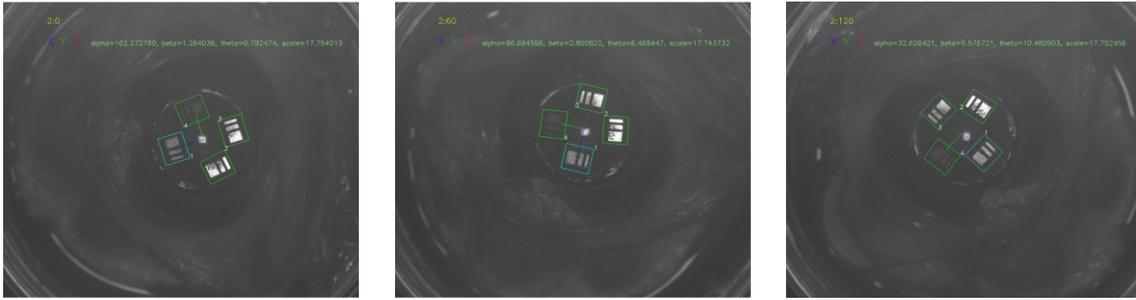


図6 マーカー検出例（回旋運動）

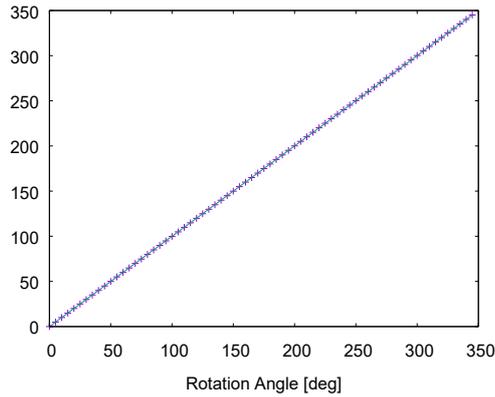


図7 回旋運動の検出結果（横軸：回転ステージの角度、縦軸：検出された回転角度）

以上述べたように、本研究では 3 軸の眼球運動の高精度計測を可能としながら被計測者への負担の小さい方法として、再帰性反射マーカーをコンタクトレンズ上に配列し、眼に装着したコンタクトレンズ上のマーカーの反射パターンを光学的に追跡する方法について検討した。マーカーに再帰性反射機能を持たせることで観測方向からの照明により高コントラストで安定したマーカー観測が可能となるため、コンタクトレンズ上に配置した再帰性反射マーカーの配列パターンを光学的に追跡することで、水平・垂直に回旋運動を加えた 3 軸の眼球運動を計測できる。本研究では、低侵襲の光学的手法によって 3 軸眼球運動計測が可能となることを実際にコンタクトレンズ型デバイスを作成して確認した。提案手法による安定した高精度の 3 軸の眼球運動計測によって、今後、眼球運動に関してこれまで装置の制約で十分に検討が進まなかった認知科学、医学等の幅広い分野の学術の発展に寄与できると考えられる。

- [1] 橋本勉, 牧孝郎, 坂下祐輔, 西山潤平, 藤吉弘亘, 平田豊, “瞳孔径変化による虹彩パターン伸縮のモデル化と眼球回旋運動計測への応用”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-D, No. 1, pp. 39-46, 2010.
- [2] Dale Roberts, Mark Shelhamer and Aaron Wong, “A New “Wireless” Search-Coil System”, Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA2008), pp. 197-204, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 施 真琴, 内海 章, 山添大丈, 李 周浩
2. 発表標題 顔形状パラメータの逐次更新により個人適応を行う顔姿勢推定ネットワークの提案
3. 学会等名 電子情報通信学会 パターン認識メディア理解研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Sei, Akira Utsumi, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee
2. 発表標題 Network Structure for Personalized Face Pose Estimation Using Incrementally Updated Face-Shape Parameters
3. 学会等名 The 5th Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原園 征志, 内海 章, 窪田 哲也
2. 発表標題 視聴覚情報呈示を用いた頭部装着型歩行支援手法に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto SEI, Akira UTSUMI, Hirotake YAMAZOE, Joo-Ho LEE
2. 発表標題 Accuracy Enhancement in Face-pose Estimation Network Using Incrementally Updated Face Shape Parameters
3. 学会等名 The 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 施 真琴, 内海 章, 山添 大丈, 李 周浩
2. 発表標題 顔形状パラメータの逐次更新により個人適応を行う眼球パラメータ推定ネットワーク
3. 学会等名 第23回 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 峻亮, 施 真琴, 内海 章, 山添 大丈
2. 発表標題 視認推定に基づく視覚探索タスク支援とVR環境における有効性評価
3. 学会等名 第25回一般社団法人情報処理学会シンポジウム インタラクション2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山添大丈ほか	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 564
3. 書名 生体情報センシングと人の状態推定への応用	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	肥塚 泉  (Koizuka Izumi)  (10211228)	聖マリアンナ医科大学・医学部・教授   (32713)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	不二門 尚  (Fujikado Takashi)  (50243233)	大阪大学・生命機能研究科・特任教授     (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関