

眼球運動・瞬目を実現する眼窩エピテーゼの開発

Development of orbital epithesis for realizing eye movement and blink

○藤田丈詩*, 星崎みどり*, 南斉俊佑*, 成田王彦*, 高野裕史*, 長縄明大*

○ Takeshi Fujitai*, Midori Hoshizaki*, Shunsuke Nansai*, Kimihiko Narita*, Hiroshi Takano*, Akihiro Naganawa*

*秋田大学

*Akita University

キーワード： 眼窩エピテーゼ (Orbital epithesis), 瞬目動作 (Blinking), 眼球運動 (Eye movement), 眼電位 (Ocular potential), 信号分離 (Signal separation)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学情報データ科学部
長縄 明大, Tel.: (018)-889-2726 E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

エピテーゼとは、病患や外傷等によって欠損した身体組織に対し、装着することで外観を補う人工の補綴物である。特に瞼や眼窩組織に対して使用されるものは眼窩エピテーゼと呼ばれ、装着することで健常者と同様の外観を再現することができるため、患者の社会復帰の一助となっている。しかし、現在使用されている眼窩エピテーゼには、眼球運動や瞬目を再現する機能はないため、表情に左右差が生じてしまい、他者とのコミュニケーションの際に違和感を与える場合がある。この問題を解決するためには、エピテーゼの目が健側と同調して瞬目を行う、あるいは、眼瞼の形態と視線が一致している必要があることが報告がされている¹⁾。しかしながら、眼窩エピテーゼの瞬目機能に関する研究²⁾は多く存在するが、実用化に至ったものはなく、眼球運動機能に関する研究については、ごくわ

ずかしに行われていない。また、眼球運動・瞬目機能を有する人型ロボット等は存在するが、駆動機構の大きさが眼窩領域に収まるものではないため、これらの技術を実用化に適用することは不可能である³⁾。



Fig. 1: 眼窩エピテーゼ Orbital epithesis

そこで著者らは、健側と同期して眼球運動・瞬目を再現する眼窩エピテーゼの開発を行っている。これまでの研究では、眼球運動および瞬目のシステムについて検討してきたが、眼球運動

と瞬目の信号が混在すること、エピテーゼでの再現動作が実際の健側の動作に対して遅延すること、駆動機構サイズが眼窩領域に収納不可能なこと等の課題点が存在する⁴⁾⁵⁾。そのため本研究では、眼球運動と瞬目の信号分離方法、眼窩領域に収納可能な駆動機構について検討する。

2. システム構成

本章では、2.1節で眼球運動・瞬目の検出方法および駆動システムについて、2.2節で獲得したデータのフィルタ処理について述べる。

2.1 眼電図法

健側の眼球運動・瞬目の測定手法として、眼電図法を採用する。眼電図法は、人間の角膜が正、網膜が負に帯電していることを利用し、この電位差(眼電位)を検出することで、視線方向や瞬きを非侵襲的に検出する手法である。Fig. 2に眼電位と視線方向の関係を示す。眼電位は目周辺の皮膚に電極を貼ることで測定することができ、本研究では、Fig. 2赤部で記される、目頭付近と目尻付近の2点間から左右方向の眼球運動を、Fig. 2黄部で記される上眼瞼付近と下眼瞼付近の2点間から、瞬目を検出する。図の通り、眼電の電位変化と眼球の回転角度はほぼ比例関係であるため、眼電位から視線方向を導出することができる。

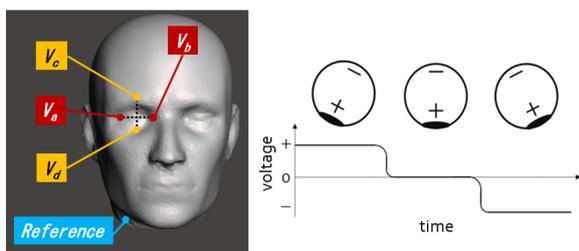


Fig. 2: 眼電図法 Electrooculography⁵⁾

ここで、本研究で構築した、眼窩エピテーゼのシステム構成を、Fig. 3に示す。健側の動作

信号を、前述の眼電図法によって獲得する。測定される眼電位は0.001~0.3 mVと非常に小さいため、計装アンプで増幅し、マイコンに入力する。マイコン内で、眼球運動と瞬目を分離し、ノイズのフィルタ処理を行った後、駆動信号として各動作のアクチュエータに出力し、エピテーゼで眼球運動と瞬目を再現する。

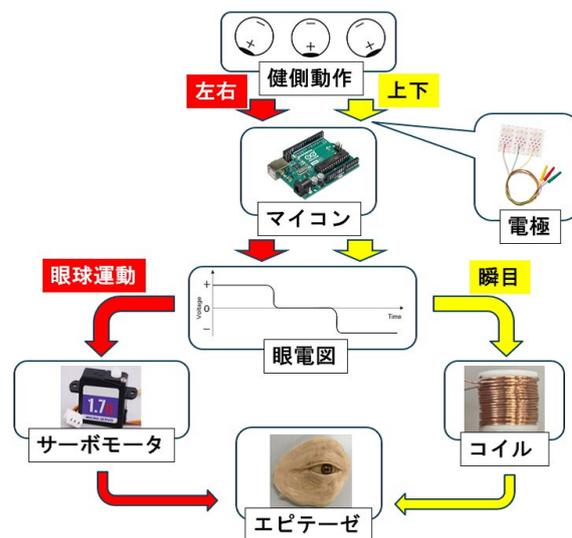


Fig. 3: システム概要図 System overview diagram

2.2 フィルタ設計

フィルタ処理について、本研究ではバンドパスフィルタによる処理を適用する。バンドパスフィルタは、高周波数帯のノイズを除去するローパスフィルタと、眼電位のドリフトの影響を抑えるハイパスフィルタによって構成される。初めに、ローパスフィルタの伝達関数を以下に示す。

$$L(z) = \left(\frac{1-a}{1-az^{-1}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 a は任意の定数であり、眼電位の周波数解析の結果、眼球運動および瞬目の周波数帯は0.1~10 Hzであったため、10 Hz以上の周波数帯を減衰させるよう、適切な値を設定させる必要がある。先行研究よりここでは $a = 0.5$ と定める⁶⁾。

続いて、ハイパスフィルタについて記述する。

眼電位は、どの2点間から測定しても、基本的に眼球運動と瞬目が混在しているため、眼球運動検出用と瞬目検出用に、それぞれ異なるハイパスフィルタを適用する。眼球運動検出用のハイパスフィルタの伝達関数を以下に示す。

$$H_1(z) = \left\{ \frac{b(1-z^{-1})}{1-bz^{-1}} \right\}^2 \quad (2)$$

ここで、 b は任意の定数であり、値を小さくすることで強いフィルタがかかり、ドリフトを緩和することができるが、矩形波に近い波形が崩れやすくなるため、適切な値を選定する必要がある。先行研究よりここでは $b = 0.9997$ と定める⁶⁾。

眼球運動の検出結果として、Fig. 4に、左右の眼電位に上記フィルタを適用したものを示す。図の通り、ローパスフィルタの適用により、高周波のノイズが除去され、ハイパスフィルタの適用により、ドリフトの影響が低減していることが分かる。バンドパスフィルタ適用後に、2つの閾値を定め、その範囲内で眼球角度を設定することで、リアルタイムで視線方向を算出し、駆動信号としてアクチュエータに出力する。

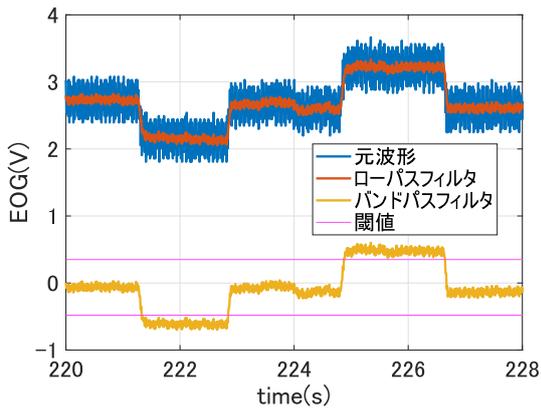


Fig. 4: 眼球運動 検出結果 Eye movement detection result

さらに、瞬目検出用のハイパスフィルタの伝達関数を以下に示す。

$$H_2(z) = 1 - z^{-c} \quad (3)$$

ここで、 c は任意の定数であり、この処理によって信号を疑似微分している。瞬目は眼球運動と比較して、短い時間内に大きな波形の変動を示すため、この微分処理により、瞬きの信号を顕著に表すことができる⁷⁾。実際の眼電位にフィルタを適用した結果、ここでは $c = 5$ と定める。

瞬目の検出結果として、Fig. 5に、上下の眼電位に上記フィルタを適用したものを示す。図の通り、ローパスフィルタの適用により、高周波のノイズが除去され、ハイパスフィルタの適用により、瞬目時の信号が顕著に現れていることが分かる。バンドパスフィルタ適用後に、2つの閾値を定め、一定の時間内に2つの閾値を通過した場合は瞬目を行ったと判定し、駆動信号としてアクチュエータに出力する。

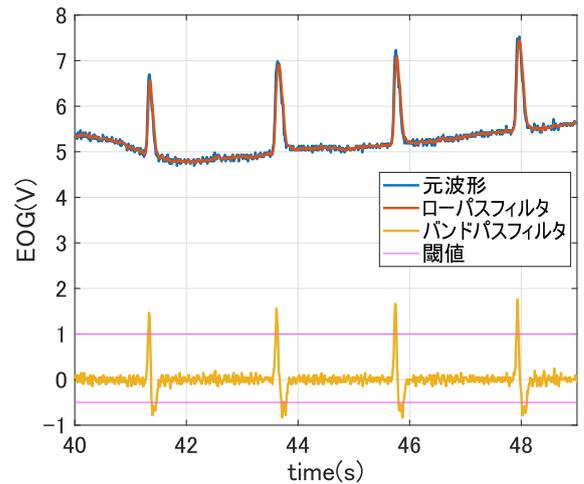


Fig. 5: 瞬目 検出結果 Blink Detection Result

これらの閾値は使用者に合わせて変更することができ、眼電位の振幅の個人差に対応することができる。

3. 駆動機構

本章では、3.1節で駆動機構の設計について、3.2節で瞬目機構用のコイルについて述べる。

3.1 機構の設計

人間の視線の可動範囲は、平均 ± 45 deg であるが、意図しない限り、 ± 25 deg を超える視線角度に眼球を動かすことはないことが報告されている⁸⁾。そこで本研究では、眼球の視線範囲を ± 30 deg として設計した。また、上下方向の眼球の動きは比較的小さいため、本研究では、左右方向のみの眼球運動と瞬目を再現する機構を検討する。

先行研究で野々宮が製作した眼球運動・瞬目機構は、幅 33 mm，高さ約 49 mm，奥行 47 mm であり、これは眼窩に収まるサイズではなかった。その原因として、瞼パーツの閉眼に大きなトルクを要する構造であり、また採用したサーボモータは、眼窩表面の寸法を参考に選定されたため、眼窩深部で使用するには大きすぎたこと挙げられる⁴⁾。また、高橋が設計した機構は、瞬目機能は有していないが、マイクロサーボモータを2つ採用することで、全方向への眼球運動を再現しながら、幅 24 mm，高さ 29 mm，奥行 37 mm までの小型化に成功している。しかしながら、このサイズでも眼窩領域には僅かに収まりきらなかった⁵⁾。

これらを踏まえて、本研究ではマイクロサーボモータを採用し、瞬目機構の空間を十分に確保することで、より小さいトルクで閉眼する設計を検討する。Fig. 6 に駆動機構構造を示す。図に示す通り、サーボモータの回転軸を下側に設けて、眼球上部に組み込んだ瞼パーツを、電磁石の反発を利用して開閉する。また、皮膚パーツを設けることで、装着時に外部から見えない眼球の強膜部分を可能な限り削除し、大幅な小型化を図った。皮膚パーツを除いたサイズは幅 36 mm，高さ 27 mm，奥行 37 mm となっており、過去の試作品より一部大きくなっているが、眼窩領域に収納することを考慮し、深部の幅と高さを徐々に小さくなるよう設計しているため、頭蓋骨模型の眼窩に収納した状態で、問題なく動作することが確認できた。

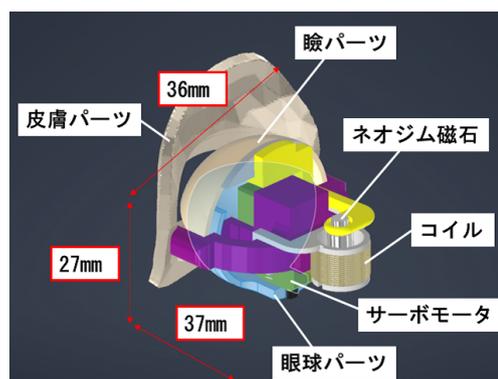


Fig. 6: 眼球運動・瞬目機構 Eye movement and blinking mechanism

3.2 コイルの選定

前章で述べた通り、瞬目機構には、電磁石を使用している。これは、瞬目の時間が0.15~0.20秒と非常に短いため、高い応答性を有するアクチュエータを考慮した結果の採用であるが、一方で、コイルは発熱しやすく、体内での使用が想定されるエピテーゼにおいて、眼窩組織に侵襲がある危険性は無視できない。許容できるコイルのサイズは内径 8 mm，外径 10 mm，長さ 6 mm であり、発熱量と発生磁場の2点から、体内でコイルは使用可能かを判断し、適切なエナメル線の線形と巻数を選定する。人間の瞬目は、1分間に通常 22 回程行われているため⁹⁾、本研究では5種のコイルに対して、単三形電池2本(3 V)と抵抗 10 Ω を直列に接続し、3秒に1回の通電を5分間行った際の温度変化を、K型熱電対によって測定した。また、コイルに対して30秒間電流を流した際の磁場の最大値を記録した。温度変化と磁場の最大値を、以下に示す。

Table 1: 磁場 Magnetic field measurement results

エナメル線	磁場 (mT)
$\Phi 0.12 \times 35$ 巻	1.31
$\Phi 0.12 \times 70$ 巻	1.48
$\Phi 0.32 \times 15$ 巻	1.20
$\Phi 0.32 \times 30$ 巻	2.29
$\Phi 0.55 \times 10$ 巻	0.93

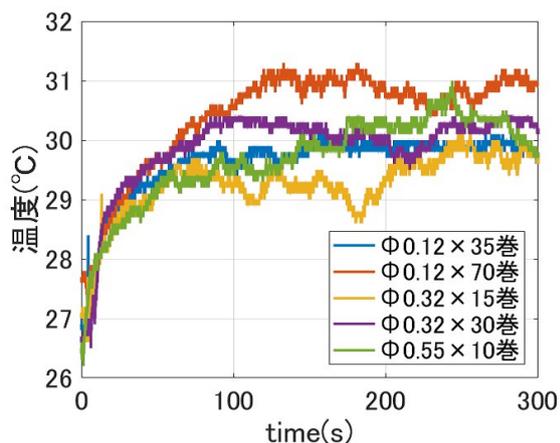


Fig. 7: 各種コイルの温度変化 Temperature changes in various coils

Fig. 7で記されるように、いずれのコイルの場合も、約100秒ほどで初期値から4°Cほど上昇がみられるが、それ以降は目立った温度変化はみられなかったため、体内で使用しても問題ないと判断する。そのため Table 1 より、発生磁場が最も大きい $\Phi 0.32 \times 30$ 巻を、最も効率が良いコイルとして採用する。

4. 駆動試験

本試験は、インフォームドコンセントを実施した健常者1名を対象とし、眼球運動と瞬目をを行った際の眼電位を測定した。なお、電極は3M社製のRedDat 2269TPを用いた。初めに、視点から67 cmの位置にマーカーを設置し、中心(110°)・左(80°)・右(140°)の順に視線を移動した際の眼電位を測定し、眼球運動機構を駆動させた。Fig. 8に実際の動作の様子を、Fig. 9に波形データを示す。

Fig. 8より、健側と連動して駆動装置が動作していることが確認できる。また、Fig. 9より、眼電位の上昇・下降に伴いサーボモータ出力角度も上昇・下降していることが分かる。波形から出力角度に30 ms程の遅れが生じているが、駆動時には認識できない程の誤差であるため、問題ないと判断する。



(a) 中心



(b) 左



(c) 右

Fig. 8: 眼球運動機構の駆動 Driving the eye movement mechanism

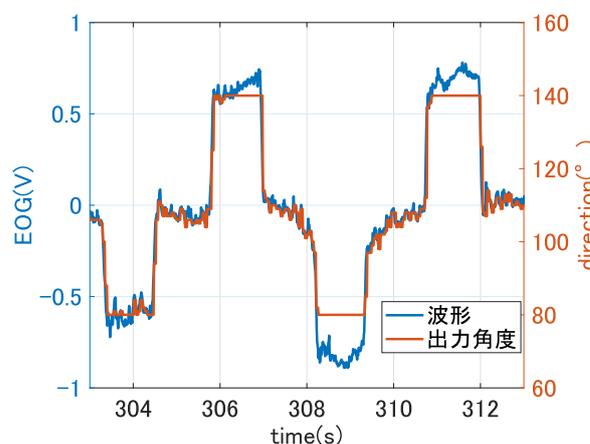


Fig. 9: 眼電図と出力角度の比較 Comparison of electrooculogram and output angle

続いて、随意性瞬目を2秒毎に1回行った際の眼電位を測定し、瞬目機構を駆動させた。Fig. 10に実際の動作の様子を、Fig. 11に波形データを示す。



(a) 健側瞬目



(b) エピテーゼ瞬目

Fig. 10: 瞬目機構の駆動 Driving the Blinking Mechanism

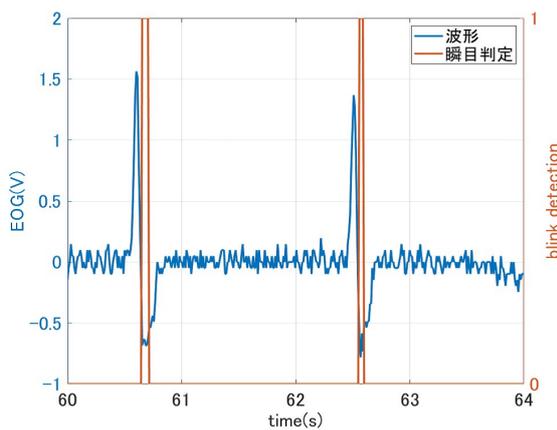


Fig. 11: 眼電図と瞬目判定 Electrooculogram and blink detection

Fig. 10 より、健側と連動して駆動装置が動作していることが確認できる。一方で、Fig. 11 より、ドリフトの影響はほとんど現れていないが、波形から瞬目判定までに 60 ms 程の遅れが生じており、こちらは駆動時に若干の違和感を感じるため、再度フィルタの設計を検討する必要がある。

5. 結言

本研究では、健側の動きに同期して眼球運動と瞬目を再現する眼窩エピテーゼの開発を目的

とし、眼電図法による動作検出方法および眼窩領域に収納可能な駆動装置について検討した。機構の収納には成功したが、実用化に至るにはより空間に余裕を持たせる必要があること、また瞬目の判定時間が遅いことが課題として挙げられる。今後の計画として、機構のさらなる小型化、遅延を低減させた瞬目検出方法を検討し、眼窩エピテーゼの開発を目指す。

本研究の一部は JSPS 科研費 25K16007 の助成を受けたものである。関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 松浦正朗, 山本勝己, 椋本裕行, 加倉加恵, 城戸寛史: まばたきするエピテーゼの開発, 福岡歯科大学学会雑誌, pp.31-32, 2010
- 2) 本田雅規, 新美敦, 野阪泰弘, 上田実, 柏田耕志, 福本一朗: オッセオインテグレートドインプラントを維持源とした能動眼瞼付きエピテーゼの1例, 日本口腔外科学会雑誌, Vol.42, No.4, pp454-456, 1996
- 3) Chaoqun Xiang, Tao Yun, Zhiwei Li, Xingyu Lu, Chi Yang, Jing Li, Chunfeng Wang, Yisheng Guan: Humanoid robot eyeballs driven by bubble artificial muscles, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 378, 1 November 2024, 115744
- 4) 野々宮由美香, 高橋日向子, 田中清志, 南斉俊佑, 星崎みどり, 福田雅幸, 長縄明大: 瞬き・眼球運動を実現する眼窩エピテーゼの開発, 計測自動制御学会東北支部 第 346 回研究集会 資料番号 346-9
- 5) 高橋日向子, 田中清志, 南斉俊佑, 星崎みどり, 福田雅幸, 長縄明大: 眼球運動を実現する眼窩エピテーゼの開発, 計測自動制御学会東北支部 第 350 回研究集会 資料番号 350-1
- 6) 高橋日向子: 眼窩エピテーゼにおける眼球運動装置の開発, 秋田大学先進ヘルスケア工学院, 修士論文, 2024
- 7) 湯瀬裕昭, 田多英興: 瞬目の自動検出と瞬目波形解析, J-STAGE, 30 巻, 50 号, pp331-337, 1994
- 8) 崔明根, 坂本大介, 小野哲雄: パーチャルリアリティにおける極端な視線角度を用いた視線入力手法の検討, 情報処理学会インタラクシオン 2022: INT22001
- 9) Kazuo Tsubota, Katsu Nakamori: Dry Eyes and Video Display Terminals, The New England Journal of Medicine, Volume 328, No.8, February 25