

[研究助成 (A)]

ウェアラブル視線推定システムのための眼瞼皮膚歪みセンサ

2251033

研究代表者
(助成金受領者)

東京大学 生産技術研究所

准教授

松 久 直 司

[研究の目的]

視線は、人間の意図、注意、認知状態、さらには神経学的機能を反映する重要な生体情報であり、ヒューマンコンピュータインターフェース、VR/AR、運転支援、ヘルスケア、リハビリテーション、意思伝達支援など幅広い分野での応用が期待されている。特に、手指や発話による入力が困難な状況において、視線は人間と機械を自然につなぐ有効な情報入力手段となる。そのため、日常生活の中で負担なく装着でき、長時間にわたって安定して視線情報を取得できるウェアラブル視線推定技術の実現は、人間と機械の調和を促進する上で重要な課題である。

従来の視線推定技術としては、カメラを用いたビデオ眼球運動計測 (VOG)、眼電図 (EOG)、コンタクトレンズ型デバイスなどが提案されてきた。しかし、VOG は高い空間精度を有する一方で、カメラや赤外照明などの光学系を必要とし、周囲の光環境、まつ毛や眼瞼による遮蔽、装着位置のずれの影響を受けやすい。また、装置が大型化しやすく、日常生活での自然な装着には制約がある。EOG はカメラを必要としない利点を有するが、皮膚電極との接触状態や皮膚湿度の変化により信号がドリフトしやすく、連続的かつ高精度な角度推定には課題が残る。コンタクトレンズ型デバイスは眼球運動を直接計測できる可能性を持つものの、眼表面への直接装着を必要とするため、長時間使用時の違和

感や安全性、受容性の面で課題がある。申請時の比較表でも、本研究はこれらの従来法に対して、装着性、環境依存性、長期安定性、低侵襲性を同時に満たす新しい視線推定法として位置づけられていた。

本研究の目的は、眼球運動に伴って眼瞼周辺の皮膚が特徴的に変形すること (図 1) に着目し、その微小な皮膚歪みを超柔軟な伸縮性歪みセンサで計測することにより、カメラを用いない新しいウェアラブル視線推定システムを実現することである。眼瞼皮膚は非常に柔らかく、従来の硬いセンサを貼付すると皮膚本来の変形を妨げてしまう。そのため、本研究では、皮膚の自然な動きを阻害しない薄膜・低剛性の伸縮性歪みセンサを開発し、下眼瞼周辺に貼付することで、眼球運動に伴う局所的な皮膚変形を多点で取得することを目指した。さらに、得られた複数の抵抗信号を用いて、眼球運動角度を連

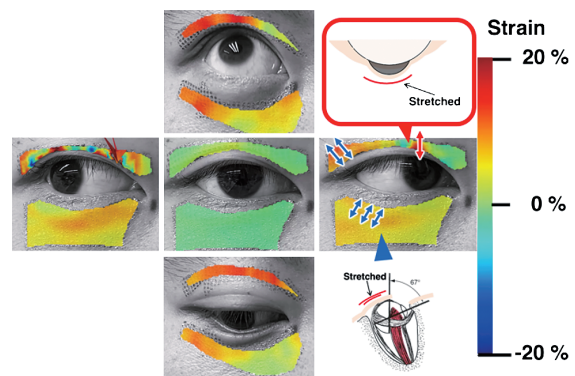


図1 デジタルイメージ相関法を用いた視線による眼瞼歪みのマッピング。異なる視線の方向に応じてユニークな歪パターンを形成していることがわかる。

続的に推定するアルゴリズムを構築することを目標とした。

具体的には、第一に、眼瞼の動きを妨げない超柔軟な金マイクロクラック型歪みセンサを作製し、下眼瞼周辺に安定に貼付できるデバイス構造を確立する。第二に、眼球運動に対してどの部位の皮膚歪みが有効な情報を含むかを明らかにし、センサの貼付位置と感度方向を最適化する。第三に、多点歪みセンサから得られる時系列抵抗信号を解析し、水平・垂直方向の眼球運動角度を推定する機械学習モデルを構築する。これにより、カメラ、眼表面への直接接触、大型光学系に依存しない、軽量・低侵襲・プライバシー保護性の高い視線推定技術の基盤を確立することを目指した。

[研究の内容, 成果]

本研究は、以下の3ステップに分けて進められた。

- (1) 超柔軟伸縮性歪みセンサの開発
- (2) センサ貼付位置最適化
- (3) 視線推定アルゴリズムの構築

(1) 超柔軟伸縮性歪みセンサの開発

本研究で用いた歪みセンサは、柔軟なエラストマー基材上に金薄膜を形成し、その金薄膜中に生じるマイクロクラック構造を利用して歪みを抵抗変化として読み出すものである。合計膜厚が僅か数 μm のため、皮膚の皺にまで密着できる(図2a)。金マイクロクラック型歪みセンサでは、伸長に伴って金薄膜中の微小な亀裂構造が開閉し、導電経路が変化するため、わずかな皮膚変形に対しても大きな抵抗変化を得ることができる。この特徴は、変形量の小さい眼瞼皮膚の歪み検出に適している。また、金は化学的に安定であり、生体表面に貼付するウェアラブルデバイスの電極材料として扱いやすい利点を有する。

具体的には、SEBS系エラストマー、PMMA

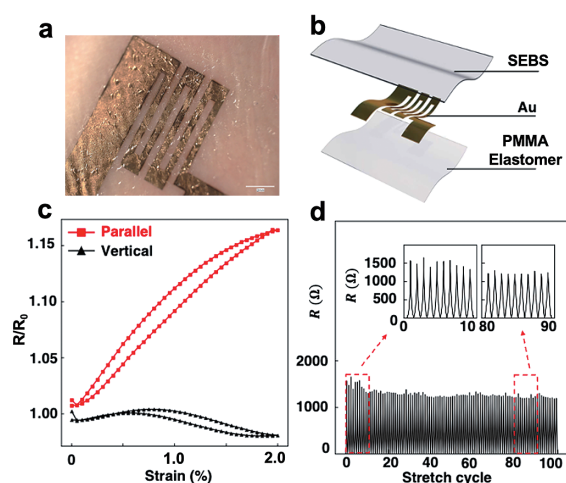


図2 超柔軟伸縮性歪みセンサ。(a) センサが皮膚の皺にまで密着する様子。(b) センサ構造。(c) センサの抵抗変化-歪み特性。(d) センサの繰り返し歪特性。

系エラストマー、Au 薄膜を組み合わせた多層構造の柔軟歪みセンサを作製した(図2b)。センサは、眼瞼周辺の曲面かつ動的に変形する皮膚に追従できるよう、薄膜化と柔軟化を重視して設計した。作製プロセスでは、犠牲層を用いた薄膜形成、レーザー加工によるセンサパターン形成、熱蒸着によるAu 薄膜形成を組み合わせることで、皮膚貼付に適した柔軟センサ構造を実現した。論文草稿中では、センサが皮膚表面に密着して貼付され、眼球運動に伴う下眼瞼周辺の皮膚変形を抵抗信号として取得する構成が示されている。

作製したセンサについて、まず基礎的な電気機械特性を評価した(図2c)。センサに一方方向の伸長を加えたところ、伸長方向に依存して抵抗変化が大きく異なる異方的な歪み応答を示した。特に、金マイクロクラックの開閉に敏感な方向では、伸長に伴って相対抵抗変化が明確に増加した一方、直交方向では抵抗変化が小さく抑えられた。このような異方的応答は、単に歪みの大きさを検出するだけでなく、皮膚変形の方法性を分離して取得する上で有用である。眼球運動に伴う眼瞼皮膚の変形は、水平視線移動と垂直視線移動で異なる空間分布と方向性を持つため、本センサの異方性は視線推定において重要な特徴となった。

また、繰り返し伸長試験により、センサが反復変形に対して安定した抵抗応答を示すことを確認した（図 2d）。眼瞼周辺に貼付する視線推定デバイスでは、眼球運動、瞬目、表情変化などにより多数回の微小変形が加わるため、繰り返し変形に対する安定性は不可欠である。本研究で開発した金マイクロクラック型センサは、繰り返し伸長時にも抵抗応答を維持し、連続計測に適した機械的耐久性を示した。

(2) センサ貼付位置最適化

次に、開発した柔軟歪みセンサを用いて、眼球運動検出に適したセンサ貼付位置と感度方向の最適化を行った。眼球運動に伴う眼瞼周辺の皮膚変形は一様ではなく、眼の内側、中央、外側で異なる変形パターンを示す。また、水平視線移動と垂直視線移動では、皮膚の伸長方向や変形量が異なると考えられる。そのため、視線推定に有効な情報を取得するためには、単にセンサを眼瞼付近に貼付するだけでなく、どの位置に、どの方向に感度を持つセンサを配置するかを系統的に検討する必要がある。

図 1 に示すように視線移動に伴って眼瞼皮膚に特徴的な歪み分布が生じることを確認していた。特に、下眼瞼周辺は視線移動に伴う歪みを示す一方で、上眼瞼に比べて瞬目や開閉動作による大きな変形の影響を受けにくく、センサを安定に貼付しやすい部位であることが分かっていた。そこで本研究では、下眼瞼周辺を主な計測対象とし、貼付位置とセンサ感度方向を変えながら、眼球運動に対する抵抗応答を評価した。

実験では、下眼瞼周辺を内側、中央、外側の三つの領域に分け、それぞれの位置に 0° 方向および 90° 方向の感度パターンを持つセンサを貼付した（図 3a）。 0° 方向と 90° 方向のセンサは、センサパターンの向きにより、互いに直交する方向の皮膚変形に対して異なる感度を持つように設計した。これにより、眼球運動によって生じる皮膚歪みの大きさだけでなく、変形方向に関する情報も取得できるようにした。

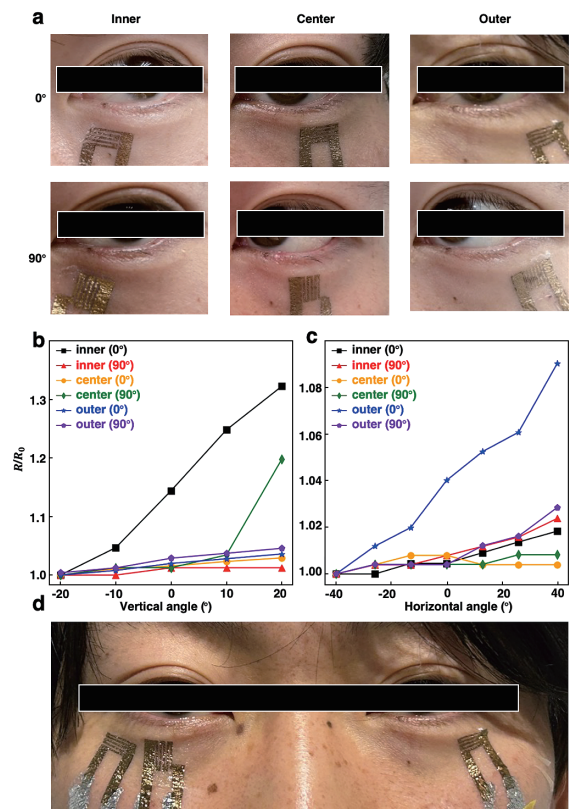


図 3 センサ貼付位置最適化。(a) センサ位置と方向。(b) 眼球を垂直方向に動かした際のそれぞれのセンサの抵抗変化。(c) 眼球を水平方向に動かした際のそれぞれのセンサの抵抗変化。(d) 最終的なセンサの取り付け位置と方向。

垂直方向の眼球運動に対する応答を評価したところ、内側位置に貼付した 0° 方向センサが最も大きな抵抗変化を示した（図 3b）。視線を上下に移動させると、内側下眼瞼付近に比較的大きな皮膚変形が生じ、 R/R_0 は約 1.00 から約 1.32 まで増加した。また、中央位置に貼付した 90° 方向センサも垂直方向の眼球運動に対して明確な応答を示し、下眼瞼中央部にも垂直視線移動に関する有効な情報が含まれることが分かった。

一方、水平方向の眼球運動に対しては、外側位置に貼付した 0° 方向センサが最も顕著な応答を示した（図 3c）。視線を左右に移動させると、左右の下眼瞼外側領域に非対称な皮膚変形が生じ、その変化を外側センサが高感度に検出できた。水平方向の視線移動では、片側の皮膚が伸長し、反対側では異なる変形が生じるため、左右両側に外側センサを配置することで、水平

角度に対応した相補的な信号を取得できることが分かった。

ただし、感度だけでなく、実用上の装着安定性も重要である。内側位置は垂直方向の眼球運動に対して高い感度を示したが、鼻に近く顔面形状の影響を受けやすいため、長時間の貼付ではセンサの浮き、ずれ、剥離が生じやすい可能性があった。また、鼻周辺の皮膚変形や表情変化の影響も受けやすく、視線以外の信号が混入する懸念がある。そのため、最終的なセンサ配置では、信号感度と装着安定性の両方を考慮し、内側センサは採用しなかった。

最終的には、左右外側に 0° 方向センサを1つずつ、下眼瞼中央に 90° 方向センサを1つ配置する三点構成を採用した（図 3d）。左右外側センサは水平視線移動に伴う左右非対称な皮膚変形を検出し、中央センサは垂直視線移動に伴う下眼瞼中央部の変形を検出する。この三点構成により、水平・垂直方向の眼球運動に関する情報を、少数のセンサで効率的に取得できるようになった。以上の結果から、本研究では、眼瞼皮膚歪みを用いた視線推定に適した実用的なセンサ貼付位置と感度方向を明らかにした。

(3) 視線推定アルゴリズムの構築

最後に、最適化した三点配置の柔軟歪みセンサから得られる抵抗信号を用いて、眼球運動角度を連続的に推定するアルゴリズムを構築した（図 4a）。眼瞼皮膚歪みから視線を推定するためには、単一の抵抗値を視線方向に単純に対応させるだけでは不十分である。眼球運動に伴う皮膚変形は非線形であり、センサの貼付状態、皮膚との機械的結合、センサのヒステリシス、瞬目や微小な表情変化などの影響を受ける。そのため、多点センサから得られる時系列信号を統合的に解析し、水平・垂直方向の眼球運動角度へ変換する回帰モデルが必要である。

実験では、左右外側および下眼瞼中央に貼付した三つのセンサから、眼球運動中の抵抗信号を同時に取得した。被験者は画面上に提示され

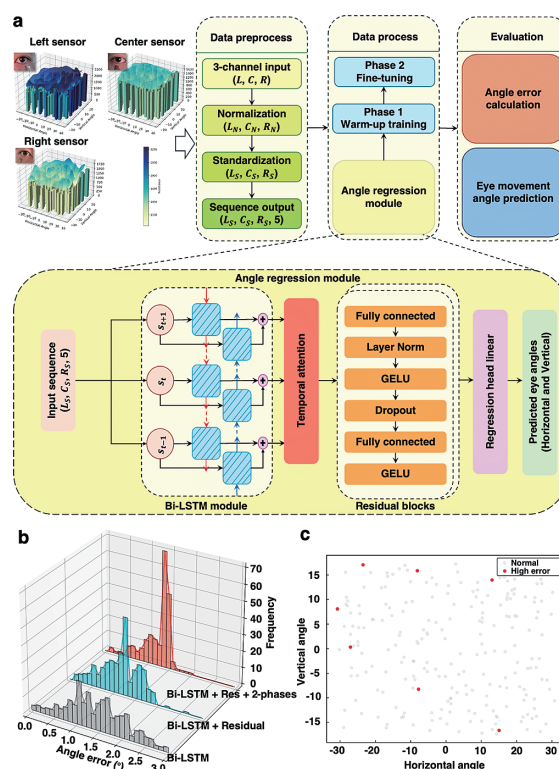


図4 視線推定アルゴリズムの構築。(a) 機械学習アルゴリズム全体像。(b) 異なるアルゴリズムと視線角度誤差の関係。(c) 大きな誤差を示した点の図示。

た視標を注視し、その際の三チャンネル抵抗信号と、対応する水平・垂直方向の眼球運動角度を記録した。論文草稿では、15個の視標位置を用い、規則的な視標提示とランダムな視標提示の両方を含む実験を行った。合計100回の並列試験により4500サンプルを取得し、そのうち3600サンプルを学習用、900サンプルを評価用として用いた。

取得した三チャンネルの抵抗信号は、まず各センサの初期抵抗値に対する相対変化として正規化した。これは、センサごとの初期抵抗値が、作製ばらつき、貼付時の圧力、皮膚との接触状態によって変化するためである。初期抵抗値で正規化することにより、絶対抵抗値の違いではなく、眼球運動に伴う変形由来の信号変化を抽出できるようにした。さらに、正規化後の信号を標準化し、各チャンネルの数値スケールを揃えることで、機械学習モデルの安定な学習を可能にした。

次に、標準化した信号を短い時系列データとして再構成した。これは、金マイクロラック型歪みセンサと皮膚との組み合わせでは、現在の視線位置だけでなく、直前の変形履歴が抵抗信号に影響するためである。たとえば、同じ視線位置であっても、その直前に上方向から移動した場合と下方向から移動した場合では、皮膚の緩和挙動やセンサのヒステリシスにより、抵抗信号がわずかに異なる可能性がある。この履歴依存性を考慮するため、本研究では時系列信号を扱える双方向 LSTM、すなわち Bi-LSTM を中核とする回帰モデルを構築した。

さらに、Bi-LSTM で抽出した時系列特徴に対して、Residual MLP ブロックを組み合わせた。Residual MLP ブロックは、非線形な特徴変換を行うことで、眼球運動と抵抗信号の複雑な対応関係を表現する役割を持つ。また、残差接続を用いることで、学習の安定性を保ちながら、皮膚の局所的なずれ、瞬目、微小な顔面運動などに由来する非視線性の揺らぎを抑制することを目指した。加えて、長時間装着時には、センサと皮膚の機械的結合状態が変化し、一部のデータに大きな誤差が生じる可能性がある。そこで、初期学習後に高誤差サンプルを同定し、その影響を低減して再学習する二段階学習を導入した。

構築したアルゴリズムの有効性は、モデル構成を段階的に比較するアブレーション実験により評価した（図 4b, c）。まず、Bi-LSTM のみを用いたベースラインモデルでは、平均角度誤差は約 1.62° であり、誤差分布は比較的広く、 3° 程度までの誤差が見られた。次に、Residual

MLP ブロックを加えたモデルでは、平均角度誤差が約 1.18° まで低下し、非線形特徴抽出の有効性が確認された。さらに、Bi-LSTM, Residual MLP ブロック、二段階学習を組み合わせた最終モデルでは、平均角度誤差が約 0.74° まで低減した。これは、ベースラインモデルと比較して約 54.3% の誤差低減に相当する。

以上の結果から、眼瞼皮膚歪みという間接的かつ柔らかい生体信号であっても、適切なセンサ配置と時系列回帰モデルを組み合わせることで、VOG 法に迫る高精度な視線推定を実現できることが示された。本成果は、カメラを用いず、眼表面にも接触せず、皮膚貼付型の柔軟センサのみで視線関連情報を取得できることを示すものであり、申請時に掲げたウェアラブル視線推定システムの実現に向けた重要な進展である。将来的には、被験者数を増やした検証、個人差を補正するキャリブレーション手法、瞬目や表情変化に対するロバスト性向上、長時間装着時の安定性評価を進めることで、日常生活中で利用可能な視線入力インターフェースやヘルスケアモニタリング技術へと展開できると考えられる。

[成果の発表、論文など]

- [1] Naoji Matsuhisa “Unperceivable designs of on-skin wearable electronics” The 4th Global Conference of Innovation Materials (June 2026).
- [2] Luyangyu Tong, Hinata Mitomo, Djadda Warda, Takashi Jono, Koji Takahashi, Ken Johkura, Naoji Matsuhisa, “A Flexible and Wearable Eye Tracking System Integrated with AI for Long-term and Real-world Monitoring” The 4th Global Conference of Innovation Materials (June 2026).