法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

赤外線を用いた非接触瞳孔径測定手法

Koike, Mikiya / 小池, 実輝哉

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院情報科学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編
(巻 / Volume)
18
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
6
(発行年 / Year)
2023-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00026284

赤外線を用いた非接触瞳孔径測定手法
Non-contact Measurement of Pupil Diameter using Infrared Light

小池 実輝哉 *
Mikiya Koike
法政大学大学院　情報科学研究科　情報科学専攻
Email: 21t0007@cis.k.hosei.ac.jp

***Abstract*—Medical reports said that the autonomic nerves such as sympathetic and parasympathetic nerves caused changes in pupil diameter regardless of the user's intention. Based on this idea, this paper proposed a non-contact pupil diameter measurement method to show internal information such as stress and emotion. A pupil diameter measurement system mainly consists of a device and an algorithm. For a device, infrared camera is usually used to take advantage of the different absorption rates of infrared light in the pupil and iris. In this paper, we assembled an infrared camera by remodeling a commercially available web camera. For an algorithm, we proposed a method that first detects the iris region from the facial video using MediaPipe and directly calculates the pupil diameter using the pixel gradient information in that region. Experimental results showed that the mean absolute error (MAE) was 3.9 px and the mean absolute percentage error ($MAPE$) was 24.5 % for 51 subjects. Our proposed system showed the highest accuracy compared to existing algorithms. As an application domain, we measured temporal changes in pupil diameter while playing PC games. Six subjects in this experiment showed the similar tendency of the changes.**

1. はじめに

昨今，新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響拡大により，仕事，授業，医療機関の受診など日常生活の一部が「対面」から「非対面」へと変化している．この生活様式の変化は，ポストコロナ社会でも維持し，更なる活動が「非対面」になることが予想される.「非対面」の場が増えると，人と接する機会の減少や生活様式の変化等により，身体のリズムが崩れ，自律神経系への影響が心配される．自律神経系は身体に様々な反応を起こすため，それを日常生活の中で定期的に確認することの重要性が高まっており，ヘルスケア関係の機器が増えている．そこで，本研究は自律神経系の異常を早期発見するために，身体反応を確認できるツールを提案する．

自律神経系に関わる身体反応の指標として，瞳孔，心拍 (心拍数や RRI)，まばたき (回数や強弱)，表情，発刊量，脳波などが挙げられる．発刊量と脳波に関しては，肌と接触させて測定する必要があり，被験者に負担がかかる．まばたきと表情に関しては，意識的に変化を加えることができるため，正確に内部状態を可視化することができない．心拍に関しては，心拍数は高い精度で測定することが出来るが，RRI は環境等によるノイズが多く，現在の技術では十分な精度が期待できない．そこで，本研究では，意識的に変化を加えることができない「瞳孔径」に着目し，非接触的な測定方法を検討し，人物の内部状態の解析を行った．

* Supervisor: Prof. Satoru Fujita

2. 瞳孔について

2.1. 瞳孔反応

眼球の色がついている領域が虹彩であり，その中央にある「黒目」と呼ばれている領域が瞳孔である [1]．瞳孔反応は主に，神経支配によるもの，生体内活性物質によるもの，瞳孔動揺，その他の 4 種類に分けることができる．神経支配によるものは，心理的ストレッサーの影響によるものであり，人間の心理的変化があったときに瞳孔変化が起こるとされている．生体内活性物質によるものは，化学的ストレッサーの影響によるものであり，たばこやアルコールを摂取した際に瞳孔変化が起こるとされている．瞳孔動揺は，定常条件下の刺激が無い状態でも生理的に 0.05Hz から 0.8Hz の周期的な動揺が見られるものであり，比較的安定していると言われている．その他に関しては，環境変化などの物理的ストレッサーによるものである．一般に，明るい場所では瞳孔が収縮し (縮瞳)，暗い場所では瞳孔が拡大する (散瞳)．人間の内部状態を解析するためには，神経支配による瞳孔径変化に着目する必要がある．

2.2. 神経支配による瞳孔径変化

自律神経 (交感神経，副交感神経) により，自分の意志とは無関係に瞳孔径が変化する．Hess の論文では，interest(興味)，emotion(感情)，motivation(動機) で散瞳し，distasteful(好みでない味)，unappealing(さえない) で縮瞳することを明らかにした [2].

また，近年ではデジタル化が進み，ディスプレイを見る時間が増えることによる視覚疲労が問題視されており，疲労度の早期発見に関する研究もある．例えば，kim らの研究 [3] では，コンテンツの種類により視覚疲労度に差があり，瞳孔径を客観的な指標として利用することの有効性を評価していた．

このように，瞳孔径という指標が様々な分野において応用されている．

3. 瞳孔径の測定機器と検出方法

3.1. 瞳孔径測定機器

日本人を含むアジアの人々は瞳孔と虹彩は似たような配色であるため，区別することが難しい．そこで，本研究領域では瞳孔と虹彩における赤外線光の吸収率が異なる特性を利用するために，赤外線カメラと近赤外線 LED で機器構成されていることが多い．近赤外線光の波長領域は，虹彩では反射し，瞳孔では反射しないという特性があり，該当波長領域の光を利用することで瞳孔と虹彩の区別を可能としている．しかし，近赤外線 LED を瞳孔領域に照射すると，明るい反射領域ができてしまうことがある．この反射領域を角膜反射領域とい

い，測定する際に考慮する必要がある．先行研究では，この角膜反射を利用して瞳孔領域の検出に役立てたり，瞳孔径測定する際には角膜反射領域を除去したりして，対処していた．

瞳孔径測定機器は，覗き込み型，眼鏡型，置きカメラ型に分けることができる．覗き込み型は，医療機器としても扱われており，非常に精度が高い．しかし，測定する際に被験者が機器を覗き込む必要があり，他作業と併用することができない．また，高価な点も欠点である．眼鏡型は，眼鏡に瞳孔径を測定する機器が装着されたものを指す．眼鏡に装着することで，自由な頭の動きに対応することができ，比較的安価な機器で構成することができる．しかし，装着されたカメラの位置が正面ではないため，正確な瞳孔検出や瞳孔径測定は難しい．さらに，眼鏡が皮膚と接触しなければならないため，被験者に測定時の負荷が加わる．置きカメラ型は，代表例としてアイトラッキングカメラが挙げられる．アイトラッキングカメラは視線位置の推定が主目的であるため，視線位置の推定に利用する瞳孔輪郭と中心座標を抽出することができる．しかし，Tobii Pro などのアイトラッカー [4] は，システム操作などは容易に使用することができるが，非常に高価である．また，視線のトラッキングが主目的であるため，瞳孔径の測定精度が保障されていない．

本研究では，他作業と併用できること，非接触であることを条件に置きカメラ型の機器を採用した．しかし，アイトラッカーや専用機器は非常に高価であるため，市販の Web カメラを改造し，容易に利用できる測定機器を提案した．

3.2. 瞳孔検出

3.2.1. 画像差分法

画像差分法は，明瞳孔画像と暗瞳孔画像の差分から，瞳孔領域を抽出する方法である [5]．異なる波長の光源を 2 つ用意し，赤外線カメラの周りを 2 重リング状で構成する．隣り合うフレームにおいて，順に異なる波長の光源を点灯させて撮影し，前フレームとの差分を取ることで瞳孔領域を抽出することができる．

3.2.2. 画素の勾配情報を利用する手法

Li らは，Starburst[6] というアルゴリズムを提案した．このアルゴリズムは，画素の勾配情報と反復法を利用する特徴がある．まず，瞳孔の中心座標を求め，その周囲の勾配情報から瞳孔輪郭の特徴点候補を抽出する．さらに，特徴点候補の周囲の勾配情報から瞳孔輪郭の特徴点候補を増やしていく．検出された特徴点候補に対して，RANSAC を用いた楕円フィッティングを利用し，より最適な瞳孔形状を推定することができる．

3.2.3. エッジベースの手法

エッジベースの手法は，エッジを基に瞳孔の形状を推定する手法である．エッジ検出では，主に Canny edge[7] を適用することが多く，検出性能が高いとされている．

Swirski らは，Canny edge を利用した基本的な手法 [8] を提案した．まず，Haar-Like の特徴量で瞳孔・虹彩領域を検出する．検出された領域から画素値のヒストグラムを求め，K-means 法で明るいクラスタと暗いクラスタの 2 つに分類する．瞳孔は暗い画素値で構成されているため，暗いクラスタに分類された画素でマスク画像を生成し，そのマスク画像の中で大きな塊を瞳孔領域として抽出する．その後，Canny edge で抽出したエッジの特徴点に対して，RANSAC を用いた楕円フィッティングを適用し，瞳孔の形状を推定する．

Fuhl らは，Exclusive Curve Selector(ExCuSe)[9] というアルゴリズムを提案した．このアルゴリズムは，エッジの選別を行う特徴がある．エッジを抽出後に，曲線エッジ，暗い画素を含むエッジ，長いエッジを抽出するためのフィルタリングを行う．フィルタリングしたエッジの特徴点に対して，最小二乗法を適用して瞳孔の形状を推定する．

ExCuSe[9] を応用した Ellipse Selector(ElSe)[10] というアルゴリズムが提案された．このアルゴリズムは，エッジと楕円の選別を行う特徴がある．エッジの選別は，ExCuSe[9] と同様の処理を行う．そして，独立したエッジごとに最小二乗法を適用し，楕円の形状を推定する．検出された楕円に対して，(1) 楕円の短辺と長辺の比率，(2) 楕円面積，(3) 楕円の内側と外側の画素比率，の指標で瞳孔の可能性が低い楕円を除去する．残った楕円に対して，画素値が低く，長辺と短辺の比率が 1 に近い楕円を選択し，その楕円を瞳孔の形状とする．

Santini らは，The Pupil Reconstructor(PuRe)[11] というアルゴリズムを提案した．このアルゴリズムは，瞳孔の理論的な指標に基づくエッジの選別と楕円の選別を行う特徴がある．まず，ExCuSe[9] と同様の処理でフィルタリングを行う．各エッジに対して，k-cosine chain approximation method でエッジを支配する特徴点の集合を近似する [12]．得られた各エッジに対して，最小瞳孔径や最大瞳孔径を瞳孔の生理的な指標を基に近似し，そのパラメータによるフィルタリングを行う．残ったエッジの集合の中で，3 つの評価値を基に最適な楕円を選択する．すなわち，(1) 楕円の短辺と長辺の比率，(2) 楕円を形成するエッジが角度を成して分散されているのか，(3) 楕円の内側と外側の画素比率，を基に最適な楕円を決定する．

3.2.4. 機械学習を利用する手法

近年では，機械学習を利用したアルゴリズムも提案されており，Kim らのセマンティックセグメンテーションを利用したアルゴリズム [3] が代表例である．まず，入力画像に対して Google によって提案された DeepLab V3+[13] で瞳孔領域を抽出する．次に，抽出された瞳孔領域に対してエッジ検出を行い，楕円の候補を抽出する．楕円の候補に対して，楕円の短辺と長辺の比率と楕円サイズでフィルタリングし，最適な楕円を決定する．

3.2.5. 既存アルゴリズムの問題点

既存アルゴリズムには，3 つの問題点がある．1 つ目は，アルゴリズム内で用いられる閾値設定の困難さである．例えば，エッジ検出する際に用いられる Canny edge や 2 値化画像で用いられる画素などが閾値として挙げられる．これらの閾値は，撮影された環境に依存するもので，実験環境に応じて閾値を設定する必要がある．

2 つ目は，瞳孔と虹彩の境界画素の見極めづらさである．瞳孔と虹彩の境界部分が滲んでいることが多く，どの画素を境界とするのかが困難である．

3 つ目は，機械学習におけるデータセット依存問題である．人種によって眼球の色は異なるため，より汎用的なシステムを作成するためには多種多様な人種のデータセットが求められる．

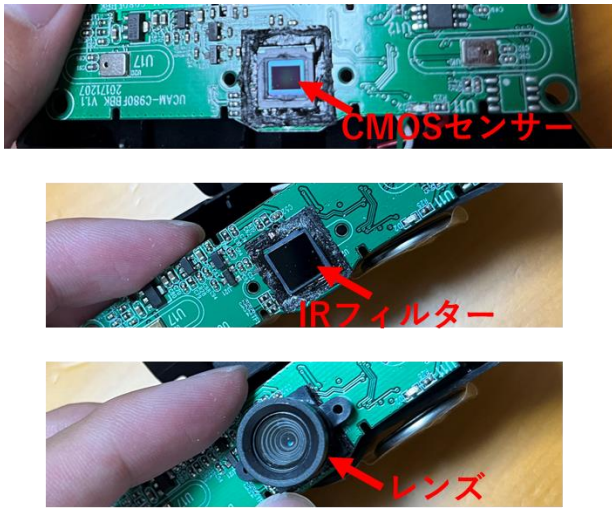

図 1. 改造赤外線カメラの 3 層構造

本研究は，できるだけ閾値を使用せずに，画素の勾配情報から瞳孔径を算出するアルゴリズムを提案した．また，先行研究では瞳孔の形状を推定していたが，直接的に瞳孔径を算出することで測定精度の向上を目指した．

4. 提案システム

4.1. 測定機器

ELECOM の超高精細 FullHd 対応 800 万画素 Web カメラ (UCAM-C980FBBK) を用意した．このカメラは通常の Web カメラと同様に内部方向から，撮影素子として利用されている CMOS イメージセンサー，赤外線の波長領域をカットする IR カットフィルター，レンズの 3 層で構成されている．本研究では，虹彩と瞳孔における赤外光の吸収率が異なる特性を利用するため，IR カットフィルターを除去する必要がある．そこで，レンズを取り外し，CMOS イメージセンサーに傷がつかないように IR カットフィルターを除去する．CMOS センサーに少しでも触れてしまったり傷をつけてしまうと，撮影したフレームにノイズが生じたり，Web カメラが壊れてしまう可能性があるため注意が必要である．さらに，可視光領域は必要ないため，除去した IR カットフィルターの代わりに FUJIFILM 光吸収・赤外線透過フィルター (IR フィルター)IR82 を装着する．この IR フィルターは，740nm 以下の波長領域は透過しない．以上より，カメラの内部方向から，CMOS イメージセンサー，IR フィルター，レンズの順で構成することで，独自の赤外線カメラを作成した (図 1).

赤外線カメラを作成することができたが，近赤外光を照射する機器が存在しないため，Wurth Elektronik 850Nm 赤外線 LED を別に用意し，カメラに取り付けた．近赤外線を照射する機器は，夜間の防犯目的が多く，光量を自動調整する機能が付いている．しかし，それらを利用してしまうと光量の変化に伴い，瞳孔径変化に影響を与えてしまうため望ましくない．そのため，本研究では安価で，光量の自動調整機能が付いていない部品を探し，Wurth Elektronik 850Nm 赤外線 LED を利用することとした．独自に作成した赤外線カメラに近赤外線 LED を装着させた機器を「改造赤外線カメラ」と呼ぶ．

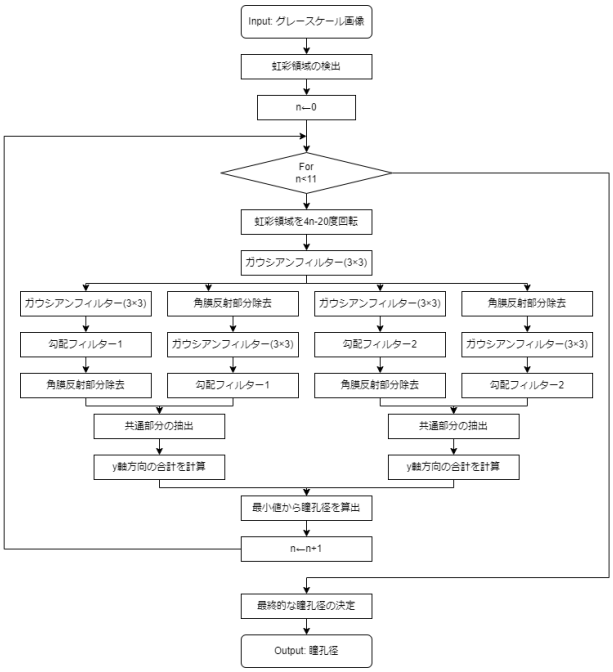

図 2. 提案手法　アルゴリズム

配置場所は，他作業と併用できることを条件にしているため，パソコン画面の下部に設置することを想定している．撮影する動画は，フレームレート 15FPS，解像度 2048 × 1536 である．

4.2. アルゴリズム

本研究では，画素の x 軸方向の勾配情報から直接的に瞳孔径を算出するアルゴリズムを提案する．アルゴリズム全体を図 2 に示す．提案手法は，虹彩領域の検出，角膜反射領域の除去と瞳孔径の算出，最終的な瞳孔径の決定の 3 ステップで構成する．

4.2.1. 虹彩領域の検出

改造赤外線カメラで撮影した動画フレームをグレースケール画像に変換し，MediaPipe[14] で虹彩領域を検出する．MediaPipe とは，Google が提供している手検出や顔検出など 15 種類の Machine Learning(ML) ソリューションのことである．本研究では，MediaPipe の虹彩検出を利用し，検出された虹彩座標に対して上下左右に 20pixel を追加して抽出した (以下，虹彩画像と呼ぶ).

4.2.2. 角膜反射領域の除去と瞳孔径の算出

方針として，虹彩画像を回転させ，各角度で図 3 に示すように瞳孔径を測定する．まず，虹彩画像を [-20 °，20 °] の範囲で 4 ° ずつ回転する．角膜反射領域が瞳孔の端に存在すると，x 軸方向で瞳孔径を測定するのが難しい． しかし，画像を 4 ° ずつ回転させることで，瞳孔径とする対象部分を変えることができるため，ある角度では角膜反射部分を含まない測定を可能にする．また，回転角度を [-20 °，20 °] の範囲に限定する理由は，過度に回転させてしまうとまぶた付近の勾配が強調されてしまう可能性があるからである．

回転させた虹彩画像に対して，画像内の小さなノイズを除去することを目的に，3 × 3 のガウシアンフィルターを適用する．

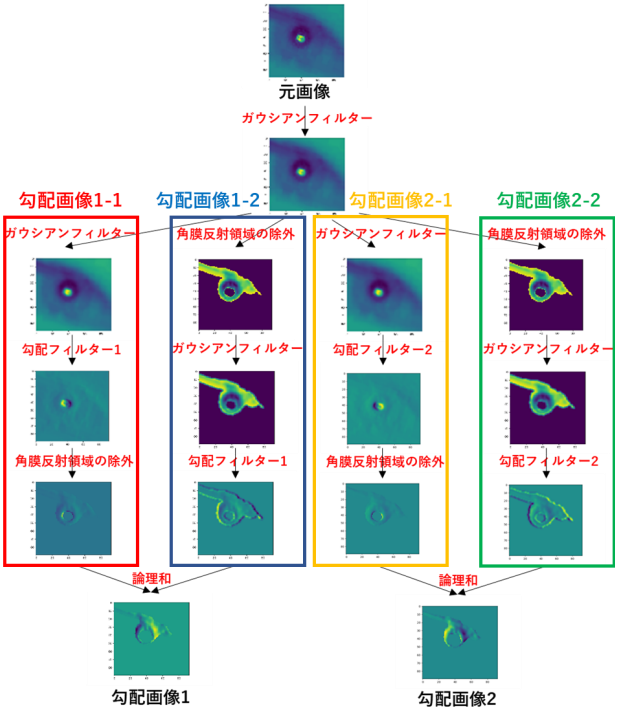

図 3. 角膜反射領域の除去の流れ

次に 4 枚の勾配画像を作成する．1 枚目の勾配画像は，3 × 3 のガウシアンフィルター，x 軸方向の勾配フィルター 1，角膜反射領域の除外を順に適用して作成する (図 3 の赤枠内，勾配画像 1-1)．2 枚目の勾配画像は，角膜反射領域の除外，3 × 3 のガウシアンフィルター，x 軸方向の勾配フィルター 1 を順に適用して作成する (図 3 の青枠内，勾配画像 1-2)．3 枚目の勾配画像は，3 × 3 のガウシアンフィルター，x 軸方向の勾配フィルター 2，角膜反射領域の除外を順に適用して作成する (図 3 の黄枠内，勾配画像 2-1)．4 枚目の勾配画像は，角膜反射領域の除外，3 × 3 のガウシアンフィルター，x 軸方向の勾配フィルター 2 を順に適用して作成する (図 3 の緑枠内，勾配画像 2-2)．

角膜反射領域の除外に関しては，虹彩画像における画素値のヒストグラムを作成し，画素値が高い 80%のピクセルを 0 にする．また，x 軸方向の勾配フィルターに関しては，瞳孔の両端を強調させたい．そのため，勾配フィルター 1 は図 4 のカーネル，勾配フィルター 2 は図 5 のカーネルを作成し，カーネル係数との積和を取る．勾配画像 1-1 と 2-1 は，角膜反射領域の勾配が強く現れ，瞳孔領域の勾配はある程度現れる．勾配画像 1-2 と 2-2 は，角膜反射領域の勾配が弱めに現れ，瞳孔領域の勾配は 1-1 と 2-1 の勾配画像と同じ値で現れる．そこで，勾配画像 1-1 と 1-2 の論理和，勾配画像 2-1 と 2-2 の論理和を取ることで角膜反射領域を除去し，互いに共通している瞳孔領域の勾配情報のみを抽出することができる．論理和を取った画像をそれぞれ勾配画像 1 と勾配画像 2 と呼ぶこととする．

次に，それぞれの勾配画像の y 軸方向の合計値を算出する．勾配画像 1 の y 軸方向の合計値は図 6 に，勾配画像 2 の y 軸方向の合計値は図 7 示す．図 6 の赤枠部分と図 7 の赤枠部分より，瞳孔部分の左端と右端が最小値として現れていることが分かる．このピーク間のピクセル数を測定することで瞳孔径を測定することができる．

以上の処理を，回転させた各画像にも同様に行う．

表 1. 実験結果

	Starburst[6]	Swirski[8]	ExCuSe[9]	ElSe[10]	PuRe[11]	提案手法
$MAE(px)$	17.4	37.5	16.1	16.7	6.4(4.7)	3.9
$MAPE(\%)$	102.7	203.3	89.9	92.1	35.2(26.0)	24.5

4.2.3. 最終的な瞳孔径の決定

1 フレームに対して，回転させた画像ごと 11 個の瞳孔径が測定される．その中には，角膜反射領域の影響により短く測定されてしまったデータも存在する．そこで，11 個のデータの中で最大値のデータを最適な瞳孔径とする．

5. 実験

5.1. データセット

先行研究で利用した評価用データセットは，眼鏡型の機器で撮影しており，瞳孔領域が大きく写された画像が多い．しかし，本研究は置きカメラ型の機器で撮影することを条件にしているため，瞳孔領域が大きく写された画像は評価の対象にならない．そのため，評価用データセットは独自に用意した．

男性 39 名，女性 12 名の被験者の顔映像を撮影し，撮影された動画の中からランダムで 1 フレーム抽出し，左右の瞳孔を評価用データセットとした． 改造赤外線カメラと顔の位置関係は被験者が日常パソコンを扱う距離に保ってもらい，被験者の目線はノートパソコンのディスプレイの中央付近を見てもらった．データセットにおける瞳孔径の正解値は，撮影した被験者以外の 4 名に測定してもらい，その平均値とした．

比較対象のアルゴリズムは，Starburst[6]，Swirski らが提案したアルゴリズム [8]，ExCuSe[9]，ElSe[10]，PuRe[11] とする．これらのアルゴリズムは，目の検出などのアルゴリズムが含まれていないため，本研究で利用した MediaPipe[14] で虹彩検出を行い，虹彩画像を各アルゴリズムに適用することとした．

アルゴリズム別に平均絶対誤差 (Mean Absolute Error) と平均絶対パーセント誤差 (Mean Absolute Percentage Error) を計算し，これらの指標を基に評価する．

5.2. 実験結果

他アルゴリズムとの比較を，表 1 に示す．PuRe は瞳孔領域を検出できない場合が多く，誤差が大きくなってしまうため，瞳孔検出できなかった場合を除外した結果を括弧内に示した．提案手法の MAE は 3.9px，$MAPE$ は 24.5%であり，最も高い精度を示した．

提案手法は，虹彩画像を [-20°，20°] の範囲で 4° ずつ回転させて瞳孔径を測定した．ある角度では角膜反射領域の影響により瞳孔径とする対象部分が短くなってしまったが (図 8)，他の角度では図 9 のように瞳孔径とする対象部分が変わっている．また，図 8 は 11px，図

0	-1	0
-1	0	3
0	-1	0

図 4. カーネル 1

0	-1	0
3	0	-1
0	-1	0

図 5. カーネル 2

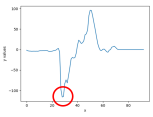

図 6. 勾配画像 1 の y 軸合計値

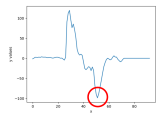

図 7. 勾配画像 2 の y 軸合計値

9 は 15px と推定した．この画像の正解値は，16.6px であり，より高い精度での測定を可能としていた．

誤差が大きかった例を図 10 に示す．瞳孔と虹彩の境界が明確になっていないため，小さな値で瞳孔径が推定され，誤差が大きくなっていた．他の誤差が大きい瞳孔画像も，図 10 と同様に瞳孔と虹彩の境界が分かりにくい画像が多かった．一方で，誤差が小さかった瞳孔画像は図 8，9 で撮影された画像のように，瞳孔と虹彩の境界が明確になっている画像が多かった．

6. PC ゲーム中の瞳孔径変化

ノートパソコンでのゲームプレイ中における瞳孔径の時間的変化を測定した．被験者には，マウス操作のみで遊べるイライラ棒のようなゲーム [15] をプレイしてもらった．プレイ中は，頭が前後に動くことが多く，瞳孔のスケールが変化してしまうため，スケールを調整するために瞳孔径評価値を式 (1) に定めた．

$$ratio = \frac{dp}{di} \tag{1}$$

dp は提案手法で求めた瞳孔径，di は MediaPipe[14] で求めた虹彩の直径を示している．しかし，まばたきや測定ノイズの影響により，データが欠けていたり，外れ値が含まれている場合があるため，データの補間を行う．まず，まばたきの影響によるデータ欠陥部分を式 (2) で埋め合わせを行う．

$$ratio\,[i] = \begin{cases} \dfrac{\sum_{k=1}^{5} ratio\,[i-k]}{5} & (ratio\,[i] = 0) \\ ratio\,[i] & (otherwise) \end{cases} \tag{2}$$

次に，測定ノイズの影響による外れ値除去を行う．指数加重移動平均により小さなウィンドウごとに傾向を算出し，その小さなウィンドウ内でデータのばらつき具合である標準偏差を求め，標準偏差の 2 倍以上離れてるデータを，式 (2) と同様の処理で埋め合わせを行う．

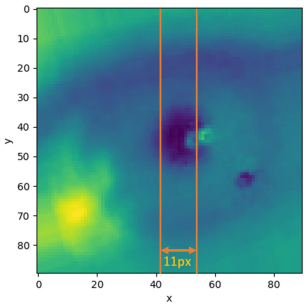

図 8. 角膜反射の影響を受けた (11px)

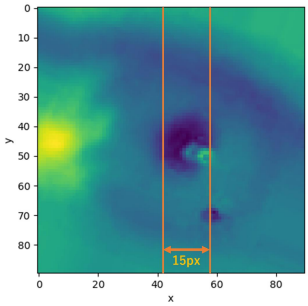

図 9. 角膜反射に影響を受けていない (15px)

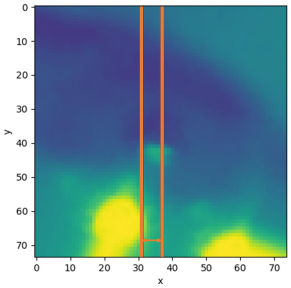

図 10. 誤差が大きい例

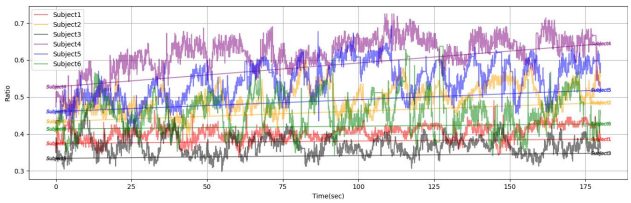

図 11. ゲーム中の瞳孔径変化

ウィンドウサイズは，90 フレーム (6 秒) に設定している．この試行を 10 回繰り返した後に，指数加重移動平均で傾向を求める．そして，左目と右目の瞳孔径変化の平均を最終的な瞳孔径の傾向とする．

被験者 6 名による実験結果を，図 11 に示す．また，極小値を抽出し，最小二乗法で近似した直線も同時に示した．Subject2，Subject4，Subject5 の被験者はゲームの後半に向かい，近似直線の傾きが大きく，瞳孔径が拡大していることが分かる．これは，ゲーム序盤に比べて脳に負荷が加わり，交感神経が活性化していることが考えられる．他の被験者の近似直線の傾きは 0 に近く，ゲームの序盤と後半で瞳孔径に変化がないことが分かる．

7. 考察

7.1. 測定機器に関して

提案手法の推定誤差が大きいフレームを図 12，図 13，図 14 に示した (被験者に合意を得た)．図 12 は，眼鏡を付けていた被験者のフレームであり，眼鏡と近赤外線 LED の角度によっては近赤外線 LED が反射してしまい，推定精度が悪くなってしまった．図 13 は，瞳孔内における角膜反射領域が大きいことが原因で推定精度が悪くなってしまった．角膜反射領域は，被験者の目と改造赤外線カメラの距離が大きくなってしまうと，瞳孔領域に対する角膜反射領域の割合が大きくなってしまう．図 14 は，撮影環境の影響により瞳孔領域と虹彩領域の画素値の差が小さくなってしまい，推定精度が悪くなってしまった．測定機器の留意点として，眼鏡と近赤外線 LED の角度を調整すること，目と改造赤外線カメラの距離を大きくしすぎないこと，目の部分に近赤外線 LED が十分に照射されていることが挙げられる．

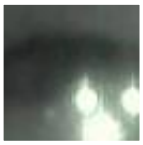

図 12. 眼鏡による反射の影響

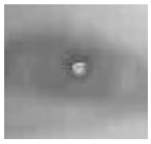

図 13. 角膜反射領域の大きさが影響

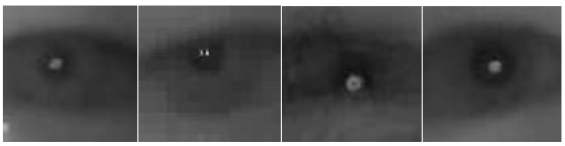

図 14. 環境による影響

7.2. アルゴリズムに関して

提案手法と Starburst は，画素の勾配情報を利用するモデルとして類似していたが，提案手法の方が精度が良かった．これは，Starburst は虹彩付近 360° 方向の勾配情報を利用しており，まぶたやまつ毛が原因で精度が悪化したと考えられる．一方で，本研究で利用したアルゴリズムは虹彩画像を [-20°，20°] の範囲で 4° ずつ回転させており，まつ毛やまぶた付近の勾配情報を除くことで誤測定を防ぐことができた．このように，勾配を x 軸方向に指定し，虹彩画像の回転する角度を限定することで精度向上に寄与することができた．

エッジベースの手法の中では PuRe の精度が最も高かったが，提案手法より精度が低かった．これは，瞳孔の生理的な指標，Canny edge のパラメータ，エッジ選別の指標，2 値化画像生成する際の指標などの閾値設定で上手く検出されていないことが原因であると考えられる．閾値による 2 値化画像の生成を例に挙げる．虹彩画像を図 15 に，虹彩画像の画素値を含めた 3 次元モデルを図 16 に示す． 図 15 で暗い画素値で示している部分，図 16 で赤枠で囲われた部分が瞳孔領域を示している．また，図 15 で瞳孔中心付近の緑と黄で示している部分，図 16 で緑枠で囲われた部分が角膜反射領域を示している．このように，瞳孔領域と角膜反射領域は他の部分に比べて明らかに画素値に差があるが，瞳孔と虹彩を切り分ける画素値は，切り分ける部分によって値が異なることが分かる．本研究では，角膜反射領域を除外する際にパラメータを使用したが，他のパラメータは使用せずに最小限に抑えることで環境変化に耐性のあるアルゴリズムを提案できた．

先行研究で最小二乗法や RANSAC を用いた楕円フィッティングを利用し，瞳孔の形状を推定するアルゴリズムが提案されていた．最小二乗法は，全ての特徴点がインライアであることが前提条件で利用し，楕円の形状を推定する．特徴点が瞳孔の一部であるという確実性が求められるため，瞳孔以外の特徴点が含まれてしまうと推定精度が落ちてしまう．一方で，RANSAC を用いた楕円フィッティングは，1 部の特徴点が外れ値の可能性があり，少ないデータ数で楕円形状を求める試行を繰り返し，最適な楕円を推定する．試行回数によっては計算コストが高くなってしまったり，瞳孔に直接関係ない特徴点から楕円を推定している可能性があるため，推定精度が落ちてしまう欠点がある．このように，楕円推定することで瞳孔径測定の精度に影響を与えてしまうことがあるため，本研究で利用した直接的に瞳孔径を算出する方法は有効であったと考えられる．

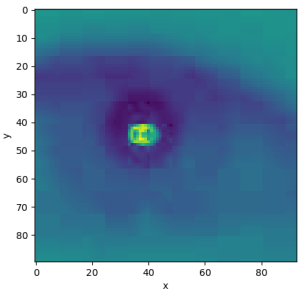

図 15. 虹彩 2 次元モデル例

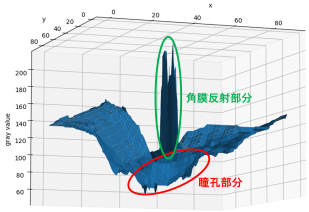

図 16. 虹彩 3 次元モデル例

8. まとめ

本論文では，安価な改造赤外線カメラの作成と画素の x 軸方向の勾配情報から直接瞳孔径を算出するアルゴリズムを提案した．提案手法は，MAE が 3.9px，$MAPE$ が 24.5%の精度で推定でき，他アルゴリズムに比べて最も高い精度を示した．一方で，人物の内部状態の可視化に関しては，瞳孔径と内部状態の関係性を定量的に評価することができなかった．今後は，瞳孔の未知な部分を明らかにし，瞳孔径と人物の内部状態に関する更なる研究が求められる．

参考文献

[1] Santen, “虹彩と瞳孔の不思議,” 2017. [Online]. Available: https://www.santen.co.jp/ja/healthcare/eye/eyecare/wonders/iris.jsp

[2] E. H. Hess, “Attitude and pupil size,” *Scientific american*, vol. 212, no. 4, pp. 46–55, 1965.

[3] T. Kim and E. C. Lee, “Experimental verification of objective visual fatigue measurement based on accurate pupil detection of infrared eye image and multi-feature analysis,” *Sensors*, vol. 20, no. 17, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4814

[4] tobii, “Tobii pro nano.” [Online]. Available: https://www.tobii.com/ja/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-nano

[5] 村手広仁 and 海老澤嘉伸, “高照度下における瞳孔と角膜反射検出法の提案,” **映像情報メディア学会誌**, vol. 64, no. 12, pp. 1903–1911, 2010.

[6] D. Li, D. Winfield, and D. Parkhurst, “Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches,” in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05) - Workshops*, 2005, pp. 79–79.

[7] J. Canny, “A computational approach to edge detection,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, no. 6, pp. 679–698, 1986.

[8] L. Świrski, A. Bulling, and N. Dodgson, “Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images,” in *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications*, 2012, pp. 173–176.

[9] W. Fuhl, T. Kübler, K. Sippel, W. Rosenstiel, and E. Kasneci, “Excuse: Robust pupil detection in real-world scenarios,” in *International conference on computer analysis of images and patterns*. Springer, 2015, pp. 39–51.

[10] W. Fuhl, T. C. Santini, T. Kübler, and E. Kasneci, “Else: Ellipse selection for robust pupil detection in real-world environments,” in *Proceedings of the Ninth Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 2016, pp. 123–130.

[11] T. Santini, W. Fuhl, and E. Kasneci, “Pure: Robust pupil detection for real-time pervasive eye tracking,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 170, pp. 40–50, 2018.

[12] C.-H. Teh and R. Chin, “On the detection of dominant points on digital curves,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 8, pp. 859–872, 1989.

[13] L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation,” in *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 2018, pp. 801–818.

[14] Google, “Mediapipe.” [Online]. Available: https://google.github.io/mediapipe/

[15] ひといきゲーム，“イライラ棒アクションゲーム【プリズムライト】.” [Online]. Available: http://hitoikigame.com/blog-entry-7196.html