

研究報告書

「広領域・非装着型視線検出技術の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成26年3月

研究者: 中澤 篤志

1. 研究のねらい

本研究では「角膜イメージング法」を使った新しい注視点検出技術および関連技術の開発を行った。注視点検出とは人が見ているシーン中の点を推定する技術であり、興味・意図推定や心理状態の推定、コミュニケーション解析などに利用されている。特に私は本技術が乳幼児の発達障害の早期診断に有効であることに着目し、この用途に使用可能な技術の開発に取り組んだ。

「さきがけ」研究としての本取り組みの狙いは3つある。1つは角膜イメージング法による注視点計測手法の確立である。この方法は、人の角膜に反射する映像を撮影することで人がどこを見ているかを推定する。従来の視線検出法である PCCR 法に比べ非装着、校正不要、パララックス誤差がないという顕著な長所が得られる。一方角膜の表面反射は弱いいため、シーン光が暗い場合に推定が難しくなる。これを解決するため、シーンを時系列パターンで照明する手法を提案・実装し、有効性を確認した。また、角膜の反射光を頭部が動く状況下でも捉えられるように、カメラを格子状に配置し焦点パラメータを距離カメラを使って動的にチューニングするシステムを開発した。

2点目としては本技術を、注視点推定のみならず、他の手法や新しい情報獲得に用いるための理論・基礎技術・応用技術を確立することである。まず、眼球の表面反射系を計算するための手法を導いた。次に、人の注視方向が光軸とは異なることからこれを補正する手法を求めた。これらの基礎理論を用いて、眼球の表面反射光からシーンを高解像で復元する超解像復元法を開発した。また同理論およびランダムリサンプリングによるロバスト画像マッチング法を開発することで、シーンの画像と角膜表面反射画像を頑健に対応付ける手法を開発した。

3点目としては、コンピュータサイエンスとライフサイエンス・心理分野等を融合した新しい研究分野を立ち上げることである。私は乳幼児の行動解析のコンピューテーショナルなアプローチに着目し、この分野で先進的な研究をしている研究者を集めワークショップを開催し、将来的な継続研究分野として発展させるべく活動を行った。本グループには、「さきがけ」メンバーを始め日本で先進的な研究を行っている研究者、および NSF プログラム Computational Behavioral Science のメンバーが含まれ、活発な議論が行われた。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では「角膜イメージング法」を使った新しい注視点検出技術およびその関連技術の開発を行った。注視点検出とは、人が見ているシーン中の点を推定する技術であり、興味・意図推定や心理状態の推定、コミュニケーション解析などに盛んに利用されている。特に本研究では乳幼児の発達障害の早期診断に注視点推定が有効であることに着目

し、この用途に使用可能な技術を開発することを目的とした。

これを実現するため、私が従来から取り組んでいる角膜イメージング法を用いる手法を研究した。これは、人の角膜に反射する映像を撮影することで、目に入射するシーンからの光を直接捉える方法である。つまり、シーンの画像と角膜に反射した画像を直接対応付けることで、人がどこを見ているかを推定したり、人の周辺視の推定を行う。この方法を使うと、従来の視線検出法である PCCR 法に比べ非装着、校正不要、パララックス誤差がないという顕著な長所が得られる。一方角膜の表面反射は弱いため、シーン光が暗い場合に推定が難しくなる。

これを解決するため2種類のシステムを開発した。シーン点と角膜反射を頑健に対応付けるためには、シーンを照明すればよい。この考え方に基づき、シーンに赤外 LED によるスポット光を多数投影するシステム(LED-AP)を開発した。この装置は格子状に配置したパワー赤外 LED からなり、各々の点灯パターンを高速で切り替えることが可能である。格子の各 LED を異なる時系列パターンでコード化し、それを撮影した画像からパターンを復元することで各々の照明位置を復元し、シーン点と角膜反射点の対応付けを得る。これにより注視点を判別することが出来る。同様の考え方を用い、小型 LED マーカーとして搭載したシステムも開発した。この小型マーカーをオブジェクトに貼り付けることで、注視対象物を判別する構成も可能である。

乳幼児を対象にしたシステム開発は、ジョージア工科大学の James Rehg 教授のグループと中心に推進している。本グループでは、NSF Expedition プログラムの1つである Computer Behavioral Science プロジェクトを推進しており、乳幼児の行動解析や視線行動解析から、発達障害の診断手法を開発しようとしている。本研究はこのプロジェクトの視線検出装置の開発部分を担っており、乳幼児の動作に対して安定的に角膜表面反射の画像を取得できるカメラを開発している。本システムを構築し、実際の乳幼児の視線検出実験を行った。

(2) 詳細

研究テーマ A : 透視投影系における角膜イメージングの理論の導出

まず、角膜イメージング法の基礎技術となる、シーン光の眼球表面での反射問題についての定式化を行った。同様の研究は従来でもあったが、我々はこれを透視投影系において解析的に導出する手法を導いた(論文 1,2)。これにより眼球の撮影画像から、シーン光の状況を正確に推定することが可能となった。

研究テーマ B : アクティブライティングを用いた注視点推定法の研究

研究テーマ A で得られた結果を用いて、人の眼球の表面反射から注視点推定を行う手法を開発した。この問題を解決するに、以下の技術を開発した

1. 角膜反射画像から注視点からの光を推定する技術

人の眼球および角膜を球面と見なし、その3次元球面状の光の反射を計算することで、注視点からの光が角膜画像中のどこで反射したかを解析的に求める手法を開発した(図1左)。我々はこの点を GRP (Gaze Reflection Point)と呼ぶ。人の視線は眼球

の光軸とは多少ズレているため、これを補正する手法も開発した(図1右)。これにより眼球反射画像の GRP に対応したシーン点を求めれば、注視点も求まることになる。

2. アクティブライティングによりシーンと角膜反射点を対応付ける技術

一方、シーンと角膜表面反射画像を対応付けるのも難しい問題である。これは、角膜反射画像は品質が悪い(暗い、低解像度、ノイズが多い)という問題のためである。これを解決するために、シーンを時系列パターン光で照明し対応付ける手法を開発した。パワーLED とフレネルレンズをアレイ状に配置し、シーンにスポット光を照明する LED-AP (LED Array Projector)を開発した(図2左)。また同様の考え方をういて、小型のプログラマブル発光マーカーをシーン中のオブジェクトに貼り付け、注視対象物を検出する構成も開発した(図2右)。

この技術を実装し、実験により検証を行った。その結果、従来法(PCCR 法)と同様の性能(誤差平均0.7~0.9度)を示し、また従来法では誤差が大きくなることが知られている、奥行き変化がある状況でも安定した注視点推定が可能であることを示した。

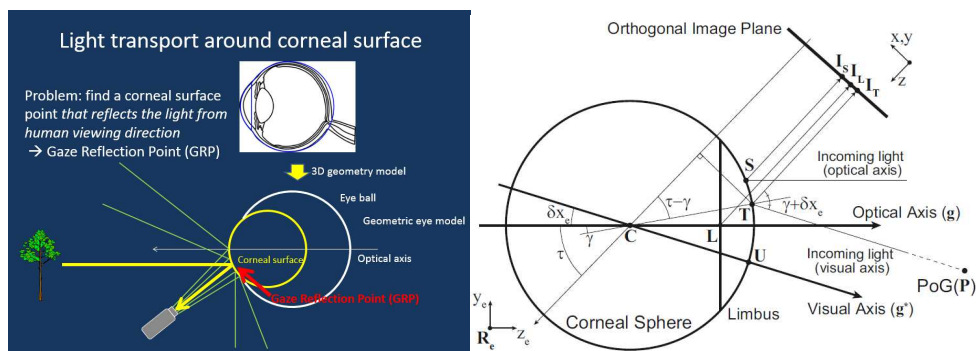
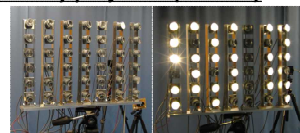
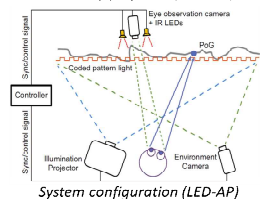


図1 角膜表面における表面反射系。(左)眼球の3次元モデルとシーンの反射像。(右)眼球の視線と光軸の差異を考慮した反射計算。

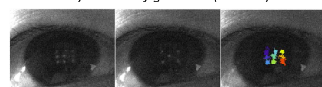
LED array projector (LED-AP)



LED array projector (42 LEDs)

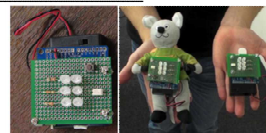


System configuration (LED-AP)

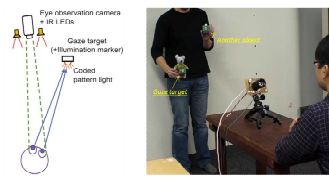


Corneal reflection images of a 9 LED config. (left, center) and a code recovery result (right)

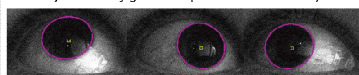
Coded LED marker



Coded LED marker



System configuration (Coded LED marker)



Corneal reflection images. Bright points are reflections of two markers. Magenta: Iris boundary, Yellow: GRP

図2 アクティブライティングによる視線検出法。左:LEDアレイによる方法, 右:発光マーカーによる方法

研究テーマ C :眼球表面反射からの超解像シーン推定法

研究テーマ A の基礎技術を使うと、角膜の表面反射画像からシーン画像の超解像復元を行う事が可能になる(発表論文4)、この流れおよび結果を図3(左)に示す、まず複数の角

膜表面反射画像から眼球の姿勢推定を行い、眼球面周囲の光線マップを推定する、これらの光線マップを位置合わせ(レジストレーション)し、注目領域周辺を中心とした局所平面に投影する、この投影した画像中で超解像処理を行う事で、図3(右)のような結果を得ることが出来る、このように本研究では、角膜の表面反射画像を複数組み合わせれば、比較的高解像なシーンの情報を復元できることを示した。



図3 角膜表面反射画像からの超解像シーン復元法。(左)手法の流れ、(右)結果。最上行:入力画像, 2行:眼球領域, 3行:単一画像からのシーン復元結果, 4行:複数画像から提案手法で超解像復元した結果, 5行:実際のシーン画像。

3. 今後の展開

今後は、本手法を利用し実際の乳幼児の視線検出システムとして実用していく事が目標となる。乳幼児の眼球表面反射計測システムはジョージア工科大学のグループと共同開発しており、現在同大学内にある Children Observation Lab での実験を計画している。まずは、完全にパッシブな画像を使って計測を行った後、状況に応じてアクティブ光を用いたシステムの導入を検討しているところである。

一方、近年の Glass system に代表されるヘッドマウントシステムの急速な注目度を考えると、ヘッドマウントシステムに視線検出装置を搭載しインタフェースとして利用する事が展開として考えられる。本研究を発展させヘッドマウントシステムに実装すべく、必要な技術を開発していくことが重要であると考えている。

4. 評価

(1) 自己評価

理論面について

角膜イメージング法の理論面については、本研究で十分な成果が上げられたと考えている。角膜イメージング法は従来から存在はしていたが、私の研究は、その新しい解析手法、人の個人誤差の補正手法、アクティブライティングの方法などを開発することで、視線検出システムとして十分な性能を持ち、また従来法よりも優れた点が多いことを見いだした。また、研究テーマ D(非公開事項)では、角膜イメージングの新たな基礎技術となる重要な方法を開発できたと考えている。またこれを発展させた研究テーマ E(非公開事項)では、角膜イメージング法

が従来の視線検出を超えた、新しい情報を提供することを示したものと考えている。

実応用面について

実応用面については、私は従来からつながりのあるジョージア工科大学のグループと共に、乳幼児のための遠隔角膜画像計測システムの開発に取り組んだ。ただし、本研究は初年度より準備していたものの、当初考えていた PTZ (Pan tilt zoom) カメラによる構成が、乳幼児の計測実験にはノイズとなることが議論の上で指摘されたため、計画変更を行い、カメラを格子状に配置し、それぞれのカメラのフォーカスを動的に制御するというシステムの開発を行った。このような経緯から、研究終了時間近にシステムが完成し、乳幼児に対する実験を開始できる状況になった。まだ本システムを実応用に供するには時間のかかる状況ではあるが、今後も精力的に問題点を発見し、来年・再来年度中を目処に実システムとして提供したいと考えている。

(2) 研究総括評価

本研究は、角膜イメージング法を用いて注視点検出技術の開発を行い、理論的にも実際的にも注目すべき成果を上げている。角膜イメージング法は、採択当時は余り注目されていなかったが、研究者の努力もあり、今日では広く知られる技術となった。本研究では、まず、多数の赤外 LED のスポット光を壁に投影し、その角膜反射から注視点を解析的に判別するシステムの開発に成功している。次に、一連の角膜反射画像を解析し、画像を複数組み合わせ高解像なシーンを復元することに成功している。特筆すべきは、本研究が一貫して乳幼児の心理状態の推定を目的に行われたことである。乳幼児の発達障害の早期発見・理解という社会課題を掲げつつ、基盤的な技術が研究され、国際特許の申請に至ったことを高く評価したい。今後も研究が継続され、ウェアラブルコンピューティングなどへの適用が行われることを期待したい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Atsushi Nakazawa and Christian Nitschke, "Point of Gaze Estimation through Corneal Surface Reflection in an Active Illumination Environment", 12th European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.159-172, 2012.
2. Atsushi Nakazawa and Christian Nitschke, "Equipment and Calibration-Free Eye Gaze Tracking (EGT) using Eye Surface Reflection and High-Framerate Programmable Illumination Projector", JST Workshop conjunction with IEEE-VR, 2011.
3. Atsushi Nakazawa, Christian Nitschke, "Point of Gaze Estimation through Corneal Surface Reflection in an Active Illumination Environment", 画像の認識と理解シンポジウム 2013.
4. Christian Nitschke and Atsushi Nakazawa, "Super-Resolution from Corneal Reflections", 23rd British Machine Vision Conference (BMVC), pp.22.1-22.12, 2012.
5. 中澤 篤志, ニチュケ クリスティアン, ラドコフ アレクサンダー, 竹村 治雄: "眼球の表

面反射と高速アクティブ光投影を用いた非装着・事前校正不要な注視点推定”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)講演論文集, pp. 41-48, Jul. 2011.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 3件

1.

発 明 者: 中澤 篤志

発 明 の 名 称: 注視点検出装置、注視点検出方法、個人パラメータ算出装置、個人パラメータ算出方法、プログラム、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体

特許権者: 独立行政法人科学技術振興機構

特許番号: 特許第5467303号

2.

上記1の国際特許移行をJSTにて決定済み

3. (出願まで非公開で願います)

発明の名称(仮): 眼球角膜表面反射と環境画像の自動位置合わせ法

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

受 賞

1. GRAPHICS と CAD 研究会優秀論文賞, 中澤篤志, 情報処理学会, 2011 年 11 月
2. 平成 25 年度コニカミノルタ画像科学奨励賞

国際シンポジウム主催

1. First International Symposium on Computer Behavior Science, Organizer, 2013 年 9 月.
URL: <https://sites.google.com/site/cbsshonan/>

招待講演

1. Atsushi Nakazawa, “Computational behavioral science – what’s going on in computer science about behavioral observation?”, Inuyama Comparative Social Cognition Symposium, 2014.
2. Atsushi Nakazawa, “Sensory techniques for Developing Interactive Agents”, 2013 Japan-Korea Workshop on Information, Communication and Robotics Technology Innovation for Population Aging, 2013.
3. Atsushi Nakazawa, Christian Nitschke, “Point of Gaze Estimation through Corneal Surface Reflection in an Active Illumination Environment”, 画像の認識と理解シンポジウム 2013.
4. Atsushi Nakazawa and Christian Nitschke, Corneal Imaging Technique: state-of-the-art theories and applications, Georgia Institute of Technology Tech Talk, 2013.

5. 中澤 篤志, ニチュケ クリスティアン:“眼球表面の光学系とその注視点検出への応用”, HI 学会コミュニケーション支援専門研究会, 2011.10.28.

論文

1. David Tsai, Matthew Flagg, Atsushi Nakazawa and James M. Rehg, “Motion Coherent Tracking Using Multi-label MRF Optimization”, International Journal of Computer Vision, DOI 10.1007/s11263-011-0512-5, <http://www.springerlink.com/content/b433v666376j8521/>, 2011.12.
2. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, Haruo Takemura, “Corneal Imaging Revisited: An Overview of Corneal Reflection Analysis and Applications”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications (CVA), Vol. 5, pp. 1–18, 2013.
3. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, Haruo Takemura, “Display-camera calibration using eye reflections and geometry constraints”, Computer Vision and Image Understanding, Volume 115, Issue 6, Pages 835–853, 2011.6.

国際会議

1. Norimichi Ukita and Atsushi Nakazawa, “Human Body-parts Tracking for Fine-grained Behavior Classification”, IEEE Workshop on Decoding Subtle Cues from Social Interaction in conjunction with ICCV 2013, 2013.
2. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa and Toyoaki Nishida, “I see what you see: Point of Gaze Estimation from Corneal Images”, Asian Conference on Computer Vision (ACPR2013), 2013.
3. Takuya Yasunaga and Atsushi Nakazawa, “Human-Computer Dance Interaction with Realtime Accelerometer Control”, ACM Multimedia 2012, pp.1157–1160, 2012.
4. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa and Haruo Takemura, “Practical Display-Camera Calibration from Eye Reflections using Coded Illumination”, First Asian Conference on Computer Vision, 2011.
5. Atsushi Nakazawa and Kensuke Yasufuku, “DISASTER SCENE ANALYSIS AND SIMULATION USING LASER RANGE IMAGES”, International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation, pp.265–272, Kobe, 2011.
6. Naoki Numaguchi, Atsushi Nakazawa, Takaaki Shiratori and Jessica K. Hodgins, “A Puppet Interface for Retrieval of Motion Capture Data”, Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '11), pp.157–166, 2011.
7. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, Haruo Takemura, “Eye Reflection Analysis and Applications”, International Computer Vision Summer School (ICVSS2011), 2011.

国内会議

1. 中澤篤志, ニチュケ クリスティアン, 角膜イメージング法を用いた校正無し注視点推定, 第 31 回 日本ロボット学会 学術講演会, 2013.
2. Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, "Super-Resolution Scene Reconstruction from Corneal Reflections", 画像の認識と理解シンポジウム 2013.
3. 中澤篤志・クリスティアン ニチュケ, "角膜イメージング法を用いたパララックス誤差に頑健な注視点推定法", 画像センシングシンポジウム 2013.
4. 沼口直紀, 中澤篤志, 白鳥貴亮, ジェシカ ホギンス: "センサ内蔵人形インタフェースを用いた大規模モーションキャプチャデータの検索手法", 信学技報, vol. 111, no. 430, PRMU2011-193, pp. 41-46, 2012 年 2 月 9 日.
5. 安永 卓哉, 中澤 篤志, 竹村 治雄: "加速度センサによるユーザコントロールを導入した音楽に合った舞踊動作の自動生成", 研究報告音楽情報科学研究会(MUS), 2012-MUS-94, Vol.25, pp.1 - 6, 2011.1.27.
6. 沼口直紀, 中澤篤志, 白鳥貴亮, ジェシカ ホギンス: "センサ内蔵人形を用いたモーションキャプチャデータの検索手法", 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会 145, 2011.11.17.
7. 安永卓哉, 中澤篤志, 竹村治雄: "加速度センサによるユーザコントロールを導入した音楽に合った舞踊動作の自動生成", 第 4 回楽天開発シンポジウム, 2011.11.19.
8. 中澤 篤志, ニチュケ クリスティアン, ラドコフ アレクサンダー, 竹村 治雄: "眼球の表面反射と高速アクティブ光投影を用いた非装着・事前校正不要な注視点推定", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)講演論文集, pp. 41-48, Jul. 2011.
9. ニチュケ クリスティアン, 中澤篤志, 竹村治雄, "新しいインタラクション技術およびシーン理解のための眼球姿勢推定および反射解析に関する研究", コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM177-2011), 2011.