

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19800

研究課題名（和文）角膜上の環境反射像を用いた位置推定

研究課題名（英文）Localization using scene reflection on cornea

研究代表者

竹村 憲太郎（Takemura, Kentaro）

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：30435440

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、角膜表面に反射する環境の像を用いることで、環境を撮像するシーンカメラ無しに自己位置を推定することに挑戦した。レーザスキャナを用いて3次元環境地図を取得し、空間中の任意の位置・姿勢に対応した角膜反射画像を仮想的に生成した。また、得られた仮想角膜反射画像に対して角膜イメージングを適用し、得られた仮想接平面画像を入力として位置推定器を学習した。推定は実画像から取得した接平面画像を入力とするが、Visual SLAM等でも利用されているIMUを併用して、Monte Carlo Localizationを実装し、確率的な位置推定を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

頭部装着型の視線計測装置は環境カメラによるプライバシーの侵害があると指摘され、視線計測装置の常時利用を進める上で大きな課題となっていた。これに対して本研究は、角膜に反射する限られた情報から注視対象の情報に加えて、ユーザの位置を推定することを達成した。環境カメラの無い視線計測装置の実現可能性を示した本研究の成果は、プライバシーの問題を解決し、装着型のカメラシステムの普及に貢献すると期待しており、その社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：Localization was challenged using the scene reflection on the cornea without a scene camera that takes an environmental view. A 3D environmental map was obtained using a 3D LiDAR in advance, and the virtual eye images were generated on each position and rotation. Virtual tangent-plane images were generated as undistorted images from the obtained virtual eye images by applying corneal imaging. The estimator was trained using the virtual tangent-plane images. In the estimation, tangent-plane images were input to the estimator, and Monte Carlo Localization was implemented with IMU to enable probabilistic estimation.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：視線計測 位置推定

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまでの研究で、実空間とのインタラクションの実現に向けた視線計測技術に取り組んでおり、Visual SLAM を用いた 3 次元注視点の推定、3 次元地図を用いた注視対象推定を実現している。また、軽量・小型化やプライバシー保護の観点から環境カメラを必要としない角膜イメージングに取り組み、注視対象推定で成果を挙げている。角膜に反射する環境の像を用いた研究は、視線計測の分野で世界的にも広がりを見せたが、その応用は注視対象推定への利用に留まっており、環境カメラを代替するには不十分である。そのため、角膜表面に反射する像から新たな情報を抽出することができれば、応用範囲の拡大が期待できる。

2. 研究の目的

本研究課題では、「角膜上に反射する環境の像を用いることで、環境を撮像するカメラ無しに自己位置を推定する手法の確立」を目指す。

頭部装着型の視線計測装置を、実空間で常時利用可能なインタフェースとして捉えると、眼カメラで視線方向を算出することに加えて、環境カメラで頭部の位置・姿勢を推定することが重要である。しかしながら、従来採用されてきたカメラ 2 つのシステム構成では、注視点の推定にキャリブレーションが必要である。また、環境を撮像するカメラを常時装着することは、プライバシーの問題があり社会に受け入れられるには時間を要する。これら問題の解決には、角膜に反射する環境の像を歪みなく抽出する角膜イメージングが有効であると考え、研究開発に取り組んできたが、位置情報の推定には至っていなかった。そこで本研究課題は、角膜イメージングによる注視対象推定に加え、角膜表面上に反射する環境像を用いて位置・姿勢の推定を行う。

3. 研究の方法

(1) 3 次元地図構築と学習データの生成

本研究では、既知環境を対象に位置姿勢 (x, y, z) の推定を行うが、データ駆動型のアプローチで屋内照明が反射した角膜反射画像から、位置姿勢情報を算出するには、事前に各位置姿勢の眼画像が必要となる。しかし、すべての位置姿勢に対して画像を取得することは困難であるため、データを用意するための工夫が必要となる。そこで、図 1 に示すように、3 次元環境地図を 3D レーザスキャナ (Focus3D, Faro Technologies, US) を用いて構築することで学習に必要なデータを生成した。

具体的には、構築した 3 次元環境地図の任意の位置に眼球のモデルと眼カメラを配置し、レイトレーシングを行うことで仮想的に角膜反射画像を取得する。使用する眼球モデルは、眼球と角膜球の 2 つの球で構成され、成人の眼球サイズはほとんど同じ大きさであることから、解剖学で算出された眼球パラメータを基に、眼球の各パラメータを定義した。角膜反射環境像から抽出が容易な屋内照明に注目し、天井領域のみの角膜反射環境像をシミュレーションした結果が図 2 (a) となる。

これらの画像から照明領域のみを図 2 (b) のように抽出した後、図 2 (c) に示す角膜球の仮想接平面画像を生成する。接平面画像は、図 3 に示すように角膜球、接平面、カメラのレンズ中心の幾何的な関係から、逆レイトレーシングを行い接平面上の座標とカメラ画像上の画素の対応関係を明らかにすることで生成する。接平面画像を生成する理由としては、照明領域の特徴量を強調することや深層学習の入力には矩形の画像が適していることが挙げられる。



図 1 . 3 次元地図

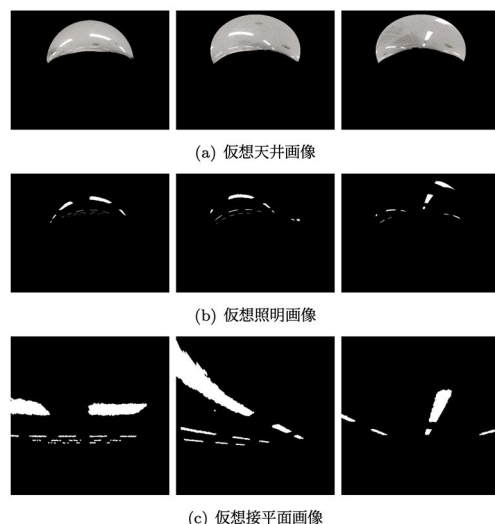


図 2 . 仮想接平面画像

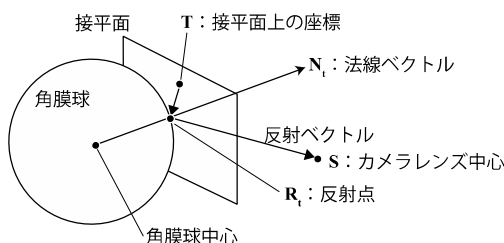


図 3 . 接平面

(2) 仮想接平面画像を用いた学習

3次元空間中の任意の位置・姿勢で生成した仮想接平面画像を用いて、位置姿勢推定器を SE-ResNet を用いて学習した。位置および角度の間隔はシミュレーションであることから自由に変更することが可能であるが、本研究では X 及び Y 座標を 0.5 m 間隔、角度は 45 度間隔とした。仮想接平面画像を用いて学習した位置推定器に対して、実際の眼画像から生成された接平面画像を入力することで、各位置姿勢に対する尤度を算出する。

(3) 角膜イメージングと IMU を用いた Monte Carlo Localization

近年は、IMU の精度が向上したこともあり、Visual SLAM 等においても積極的に利用されるようになってきている。そこで本研究課題でも、IMU を用いて位置推定の精度向上に取り組んだ。前述した SE-ResNet によって出力される各位置姿勢に対する尤度と、IMU で算出された相対的移動量を Monte Carlo Localization によって統合した。Monte Carlo Localization は、移動ロボットの位置推定で盛んに用いられる手法であり、本研究で提案する手法とも相性が良かった。

4. 研究成果

提案手法の評価として、大学構内にある一室 (10×10 m) を実験環境として 3次元環境地図を取得し、位置推定を行った。約 10 万枚の仮想接平面画像 (80×80 pixel) を訓練データとして、位置推定器を学習した。撮像した眼画像中で、瞬き等の影響で照明情報が抽出できなかったものは、予め除外して推定を行った。誤差算出に必要な真値は、LiDAR (UTM-30LX, HOKUYO, JP) を用いて計測したため、眼球の姿勢は評価対象外とした。Monte Carlo Localization に用いるパーティクル数は 1000 個とし、初期位置は既知とした。また、IMU の代わりに DeepVO を用いて移動量を算出する手法を採用した手法と比較を行った。

図 4 (a) は実際に実験環境で撮像した眼画像であり、そこからシミュレーションと同様に図 4 (b) の接平面画像を生成する。また、照明領域のみを抽出するため図 4 (c) に示すように、2 値化を行う。これらの画像を入力画像として位置姿勢推定を行った結果は、図 5 は示す通りであり、LiDAR で計測した真値 (赤色) と推定結果 (緑色) を比較すると、直線的な移動は精度よく推定できていることが確認できるが、一方で、回転時は誤差を抑える改良が必要であることが確認できる。

また、図 6 は実験協力者 5 名に対して IMU と DeepVO を用いて位置姿勢推定を行った結果である。誤差は、各時刻の真値と推定値のユークリッド距離であり、IMU を用いた場合の平均誤差は約 1.0 m、DeepVO を用いた際の平均誤差は約 3.4 m であった。IMU を用いたことで、眼画像のみを用いた位置推定よりも、高精度な推定が可能であることが確認できた。

推定には、誤差が修正しきれない問題点が確認されたが、これは照明パターンが周期的であることなどが原因と考えている。そのため、今後は照明領域だけではなく、角膜表面に反射するその他の情報も使用できるように屋内でも反射情報の鮮明な抽出に取り組む必要があると考えている。

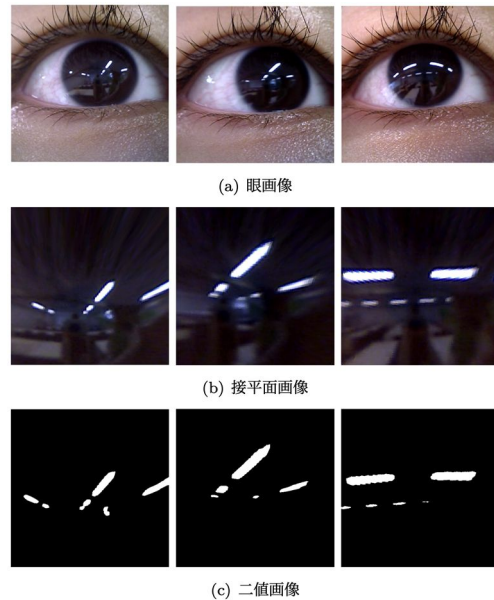


図 4. 眼画像から生成した接平面画像

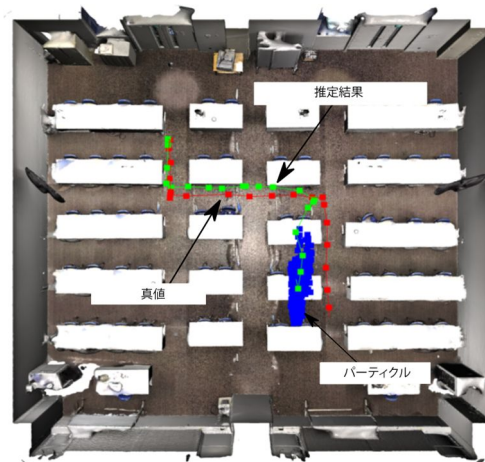


図 5. 位置推定結果

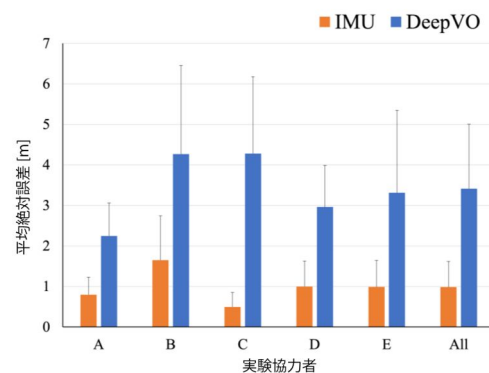


図 6. 位置推定結果の平均絶対誤差

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 3件）

1. 発表者名 Yuto Ito and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Estimating Focused Pedestrian using Smooth-Pursuits Eye Movements and Point Cloud toward Assistive System for Wheelchair
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Seida and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Eye Gaze Estimation using Imperceptible Marker Presented on High-Speed Display
3. 学会等名 The 13th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤雄仁, 竹村憲太郎
2. 発表標題 視線計測装置と LiDAR 間の幾何的な拘束が不要な歩行者に対する注視判定手法
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清田健登, 竹村憲太郎
2. 発表標題 高速液晶ディスプレイを用いた不可視な基準点の提示による注視点推定
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金井祐樹, 竹村憲太郎
2. 発表標題 屋内照明の角膜反射像とIMUを用いた位置推定
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Kanai and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Cooperative Eye Tracking and Localization Based on Corneal Imaging
3. 学会等名 The 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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	長松 隆 (Nagamatsu Takashi) (80314251)	神戸大学・海事科学研究科・教授 (14501)	

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
---------	---------