

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05870

研究課題名(和文) 没入型バーチャルリアリティ環境における表情認識技術の構築

研究課題名(英文) Development of Facial Expression Recognition Technology in Immersive Virtual Environments

研究代表者

杉本 麻樹 (Maki, Sugimoto)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：50517399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、外部からの光学的な観測が難しい頭部装着型ディスプレイ内部での計測が可能な組み込み型光センサと機械学習を用いた表情認識技術を高度化することを目的に研究を推進した。基本表情のクラスを識別する手法を発展させ、表情の表出強度を推定し、合成した表情をアバターに反映できることを示した。また、基本表情クラスを識別するのみでは無く、低次元の光センサ情報から、高次元の顔表面の特徴点の位置を3次元再構成できることを確認した。更に、表情の多様性を考慮した機械学習として、視線や頭部方向を考慮した学習データセットを構築することで表情識別精度を頑健にできることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では学習データの多様性を考慮した機械学習を行なうことで、没入型バーチャル環境における表情認識精度を頑健にできることを示した。こうした、没入型バーチャル環境に対してユーザの身体情報を反映する技術基盤は、我々が没入型バーチャル環境においてソーシャルコミュニケーションを行なう上で必要となるものであり、実環境とバーチャル環境をシームレスに接続することに貢献するものである。また、本研究課題で開発を行なった組み込み型光センサと機械学習を用いる手法は、低次元のセンサ情報から高次元のユーザの状態を推定することにも活用できるため、様々な身体情報の認識を行なっていく上で重要な技術になると期待される。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project was to develop facial expression recognition technology using an embedded optical sensor array and machine learning, which enables facial expression recognition in a head-mounted display (HMD). Facial expression recognition in an HMD with an ordinal camera system is challenging due to occlusions. We developed a method for detecting basic facial expressions and extended it to estimate the intensity of each facial expression. We have shown that synthesized expressions can be rendered on avatars in a virtual environment. In addition to identifying the basic expression classes, we confirmed that it is possible to reconstruct high-dimensional 3D positions of feature points on a facial surface from the low-dimensional sensor values. Furthermore, we demonstrated that facial expression recognition accuracy was improved by making a training dataset that incorporates gaze and head direction as a machine learning method robust to the diversity of facial expressions.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：表情認識 ユビキタス光センシング HMD

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

没入型バーチャル環境は、ユーザに実環境と異なる体験を高い臨場感で提示することが行える。頭部装着型ディスプレイ(Head Mounted Display: HMD)の性能向上と手軽なデバイスの普及に伴い、数多くのデジタルコンテンツを VR 環境向けに開発する試みが行なわれている。VR 環境においては、実環境のユーザの状態計測を行う事によって、高いインタラクティブ性を有するシステムを開発することができる。モーションキャプチャ装置やハンドトラッキング装置などを用いて、実環境のユーザの四肢の動きや手形状などを同期したアバターに反映することで高い自己投射性を実現したシステムの構築が行なえる。一方で、HMD を用いた没入型の環境においては、外部からカメラなどを用いて計測を試みる場合、光学的な遮蔽が問題となるため、デバイスを装着した頭部の直接的な計測を行なうことは難しく、ユーザの表情を計測する手段は限定的であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、機械学習と装着型のデバイスに組み込んだ反射型光センサアレイを用いる事によって、光学的な遮蔽による問題を解決し、ユーザの多様な表情を認識する計測技術を構築することを目的とする。また、計測技術の高度化のために、取得しているセンサ情報から、表情の表出強度の推定、幾何的な形状の推定の一環として顔表面の特徴点の位置情報の 3 次元再構成、表情の多様性を考慮した機械学習による認識精度向上が可能であるかについても検証を進めることを試みた。

### 3. 研究の方法

本研究の具体的な研究方法としては、HMD 内部に組み込んだ反射型光センサを用いた計測システムから得られるセンサ値に対して機械学習と多変量解析を用いることによって、没入型バーチャル環境のユーザの顔表情を認識することができるかを検証した。また、提案手法の有用性を実証するために、認識したユーザの表情をバーチャル環境のアバターに反映するシステムを構築し、提案する手法が有効であることを示した。

### 4. 研究成果

#### (1) 基本表情クラス識別と表情表出強度推定

本研究の基盤技術として、頭部装着型ディスプレイを装着したユーザの表情を識別する組み込み型光センサと機械学習のシステムを構築しており、笑い・驚き・怒り・悲しみ・ニュートラルといった、基本表情の識別が可能であることを示すと共に、各表情の表出強度を階調値として推定することが可能であることを示した。基本表情識別においては、認識する表情クラスに対する訓練データを獲得し、機械学習に基づく表情毎の識別器を構成することにより、識別が可能であることを確認した。また、表情の表出強度を階調値として推定する為に、ユーザに対してバーチャル環境上のアバターを提示し、表出するべき表情強度の目安として、アバターの表情を時間遷移させることによる教示を行なうことで、機械学習のための訓練データとしてニュートラルから各基本表情に遷移する間の表情に対応するセンサ値を取得するシステムの開発を行なった。取得したデータに対して、回帰による表情の表出強度を推定する機械学習器を構成することによって、各基本表情の表出強度を推定することができることを示した。また、回帰の機械学習器を構成する以外の表情の表出強度を推定する手法として、表情クラスに対する所属確率を求めることでも表情の表出強度を得られることを確認した。

#### (2) バーチャル環境のアバターへの表情の反映

研究成果(1)で示した項目の実施結果を踏まえて、バーチャル環境上において複数の基本表情からアバターの顔表情を合成することを行なうシステムを構築し、提案手法によって実環境のユーザの表情をバーチャル環境上に反映することが可能であることを示した。表情の合成を行なう為に、アバターの各基本表情を表わすパラメータを用意し、このパラメータとニュートラルの表情のパラメータの差分に対して、機械学習によって推定された表情の表出強度を掛けることによって、アバターの表情パラメータ空間において、ニュートラルの表情を中心として各基本表情の表出強度として推定された重みを考慮した表情を合成することを行なった。こうした合成を行なうことで、複数の基本表情を基底として、ユーザの表情を再現することができることを確認した。提案する表情認識技術を基盤として、実環境のユーザの表情をバーチャル環境に反映することが可能であることを示した。

#### (3) 反射型光センサの多様性を考慮した光センサアレイの設計

本研究の実施期間においては、提案システムの実装として、複数の異なる計測特性を持つ反射型光センサを組み合わせることで、表情計測を行なうシステムの開発を行なった。反射型光センサは、発光素子である LED と、フォトトランジスタを組み合わせたものであるが、それぞれの素子の特性と組み合わせる光学系によって、有効な計測範囲が異なる特性を持った複数

の素子がある。一般にレンズ無しの素子は近距離での計測特性に優れるが、距離に応じた減衰が大きく、計測対象となる皮膚とセンサの距離が遠い条件においては、皮膚の隆起に対する感度が低くなる。また、レンズ付きの素子は設計された焦点付近の遠距離においける計測特性に優れるが、最適距離から逸脱した皮膚とセンサの距離が極めて近い条件や遠い条件においては、皮膚の隆起に対する感度が低くなる。そこで、本研究項目では、HMD 内部に組み込む反射型光センサを場所によって変更することによって、最適な計測特性を備えたセンサアレイの実装を行なった。こうした、反射型光センサの特性の違いを考慮した実装を行なうことによって、センサを装着する部位に応じて異なる皮膚とセンサの距離に幅広く対応することが出来る計測システムを構築することが出来た。また、組み込み型のマイクロコントローラユニットを用いることで、高速に表情を計測したセンサ値を取得できる枠組みを実装した。

#### (4) 顔表面の特徴点の幾何形状推定

組み込み型光センサから取得できている情報から、顔の幾何形状を推定した場合の精度を定量的に検討することを行なった。頭部装着型ディスプレイ内部に組み込んだ光センサと同様の構造を持つウェアラブルデバイスを使用し、ユーザの皮膚表面に装着した再帰性反射マーカの3次元位置を推定した条件における誤差を評価した。幾何形状の推定にあたっては、皮膚表面のマーカの3次元位置の主成分分析を行ない、顔表情の変化に伴う皮膚変形の主要な要素を求めた上で、そのパラメータを反射型光センサの情報から推定する枠組みを構築し、高い精度での幾何形状の推定が行えることを確認した。この研究成果を通じて、本研究における表情認識システムが基本表情に基づいた識別のみではなく、詳細なユーザの顔の幾何形状の推定を行えるだけの情報量を持っていることを示せたと考えられる。

#### (5) 表情の多様性を考慮した機械学習による識別精度向上

頭部装着型ディスプレイを装着したユーザの表情を識別する組み込み型光センサと機械学習のシステムを構築しており、感情に対応した基本表情毎の識別と、表情の表出強度の推定を行ってきた。これらの研究の過程において、頭部の向きや視線方向等が基本表情の識別精度に影響を与えるという知見が得られている。定量的にこの影響を検討するための試みとして、頭部装着型ディスプレイ内部で提示する視覚情報として、視線方向毎に注視指標を提示し、視線方向を統制した条件において反射型光センサの情報を取得した。取得したデータから本表情の識別器を訓練する際に用いるデータとテストデータを、単一の視線方向のデータのみ用いた条件・各方向の視線方向のデータを用いた条件・全方向の視線方向のデータを同一に取り扱った条件において識別精度がどのように変化するかを検討した。この検討の結果として、視線方向が大きく変化する条件において良好な基本表情の識別率を得るためには、視線方向毎の訓練データを持つことで、単一の視線方向のデータのみを用いた条件より良好な識別率が得られることを確認した。

#### (6) 時系列のセンサ情報の解析

本研究期間においては、オンライン学習の可能性の検討として、個々のユーザが幾つかの表情を繰り返すデータを計測した条件において、センサ情報が時系列でどのように変化するかを解析した。この検討においては、基本表情に対する主成分を求めた上で、主成分空間において経時的にセンサ値がどのように分布するかを分析した。この結果、同一の表情を維持している間のセンサ値の相対的な変化は小さいが、同一の表情を繰り返し表出する条件においても経時的にはセンサ値の絶対的な分布位置は大きく変化していることが確認できた。これは、ユーザが同一の表情を作っている際にも、表情筋の動きは試行間の分散が大きい可能性と、HMD とユーザの皮膚表面の距離などの実験で統制していない要因が変動することによるセンサ値の分散が大きい可能性が考えられる。こうした結果から、適応的な機械学習を考慮することによって表情の認識精度を向上させられる可能性が示唆された。

#### (7) 実演展示を通じた有用性の検証

本研究で開発したシステムの有用性を検証するため、国際学会・展示会等での実演を通じて、多様な特性を持つユーザの表情を識別可能であることを検証した。具体的には、世界最大規模のコンピュータグラフィックスとインタラクティブシステムに関する国際会議である SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies と、DCAJ が主催する国内展示であるデジタルコンテンツエキスポ 2018 において実演展示を行ない、提案システムが多様なユーザの表情を識別可能であることを確認することができた。また、こうした実演展示を通じて、研究成果(5)を反映した視線や頭部方向の多様性を持つ学習データを取得して機械学習器を構成することが表情の識別精度に大きく貢献することを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 鈴木 克洋、中村 文彦、大塚 慈雨、正井 克俊、伊藤 勇太、杉浦 裕太、杉本 麻樹	4. 巻 22
2. 論文標題 AffectiveHMD: 組み込み型光センサを用いた表情認識とバーチャルアバターへの表情マッピング	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 379 ~ 389
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.22.3_379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中村 文彦、鈴木 克洋、正井 克俊、伊藤 勇太、杉浦 裕太、杉本 麻樹	4. 巻 22
2. 論文標題 母音認識を用いた訓練データの自動ラベリングに基づくHMD組み込み型光センサでの口元形状認識	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 523 ~ 534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.22.4_523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 浅野 直生、正井 克俊、杉浦 裕太、杉本 麻樹	4. 巻 23
2. 論文標題 反射型光センサを用いた眼鏡型ウェアラブルデバイスによる顔表情パフォーマンスキャプチャ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 197 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.23.3_197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 齊藤 千紗、正井 克俊、杉本 麻樹	4. 巻 62
2. 論文標題 反射型光センサアレイを用いた眼鏡型装置による作り笑いとは自然な笑いの識別	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1681 ~ 1690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20729/00213196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fumihiko Nakamura, Masaaki Murakami, Katsuhiro Suzuki, Masaaki Fukuoka, Katsutoshi Masai, and Maki Sugimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Analyzing the Effect of Diverse Gaze and Head Direction on Facial Expression Recognition with Photo-Reflective Sensors Embedded in a Head-Mounted Display	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中村 文彦, 鈴木 克洋, 正井 克俊, 伊藤 勇太, 杉浦 祐太, 杉本 麻樹
2. 発表標題 ヘッドマウントディスプレイに装着した光センサによる口元形状の識別
3. 学会等名 ヒューマンインタフェース学会デバイスメディア指向ユーザインタフェース研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木克洋, 中村文彦, 正井克俊, 伊藤勇太, 杉浦裕太, 杉本麻樹
2. 発表標題 反射型光センサを使用した没入型HMD装着時に利用可能な表情認識技術の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Katsuhiro Suzuki, Fumihiko Nakamura, Jiu Otsuka, Katsutoshi Masai, Yuta Itoh, Yuta Sugiura and Maki Sugimoto
2. 発表標題 Recognition and Mapping of Facial Expressions to Avatar by Embedded Photo Reflective Sensors in Head Mounted Display
3. 学会等名 IEEE Virtual Reality 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nao Asano, Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, Maki Sugimoto
2. 発表標題 Facial Performance Capture by Embedded Photo Reflective Sensors on a Smart Eyewear
3. 学会等名 International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments 2017 (ICAT-EGVE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅野直生, 正井克俊, 杉浦裕太, 杉本麻樹
2. 発表標題 反射型光センサを用いた眼鏡型ウェアラブルデバイスによる顔表情パフォーマンスキャプチャ
3. 学会等名 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上雅明, 正井克俊, 杉浦裕太, 杉本麻樹
2. 発表標題 頭部装着型ディスプレイにおける視線を考慮した表情認識の検討
3. 学会等名 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Murakami, Kosuke Kikui, Katsuhiro Suzuki, Fumihiko Nakamura, Masaaki Fukuoka, Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, and Maki Sugimoto
2. 発表標題 AffectiveHMD: facial expression recognition in head mounted display using embedded photo reflective sensors
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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