

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：37112
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2020～2022
課題番号：20K12761
研究課題名(和文) 環境センサと移動ロボットを連携した見守りシステムのための深層学習・認識機能の開発

研究課題名(英文) Development of deep learning and recognition functions for a monitoring system based on the combined use of environmental sensors and a mobile robot

研究代表者
佐竹 純二 (SATAKE, Junji)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号：60392726
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：環境センサと移動ロボットを連携させて人物の状態確認を行う見守りシステムの開発を行った。天井カメラを用いて人物の転倒などの異常を検知し、移動ロボットが転倒人物に近づいて呼吸推定を行う。
特に本研究では、見守りシステムの認識性能を向上させるため、機械学習の技術を取り入れた。転倒人物の姿勢を正しく認識するため、画像ベースの機械学習であるCNNを用いて転倒姿勢を推定する方法を開発した。また、Kinectの距離画像を用いて人物の胸の動きを取得し、距離変動の波形を学習させ、正常な呼吸とそれ以外を判別する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では移動ロボットが人物に近づいて状態確認を行う見守りシステムの開発を行ってきた。ユーザがセンサを装着する方法ではないため、ユーザの負担が小さく、システムに未登録のユーザにも対応できる。また、ロボットが移動することで、従来の監視カメラなどでは計測できない詳細な情報を取得できる。さらに、環境センサと連携することで、移動ロボット単体よりも高度な観測を行える。
なお、本研究が対象とする計測技術は、特に福祉・介護の分野で重要な技術であり、見守りシステムが自動化できれば人員不足の問題などを解消できる。また、詳細な状態確認が可能になれば、より安心・安全な社会を実現することができる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a monitoring system based on the combined use of an environmental sensor and a mobile robot. Ceiling camera is used to detect anomalies such as a fall of a person, and a mobile robot approaches the fallen person to estimate respiration.

In order to improve the recognition performance of the monitoring system, we adopted machine learning technology. We developed a method for estimating the pose of a fallen person using CNN, which is image-based machine learning. In addition, we developed a method to acquire chest movements using Kinect and determine whether breathing is normal or not.

研究分野：医療福祉工学関連

キーワード：見守りシステム 移動ロボット 呼吸推定 機械学習

1. 研究開始当初の背景

現在の日本では独居高齢者が増え、その見守りが課題となっている。また、介護施設においても人員の問題から、常に十分な見守りができるとは限らない。そこで、本研究では環境センサと移動ロボットを連携させ、例えば熱中症や脳梗塞などによって人物が倒れるなどの異常を検知して通報を行うための見守りシステムを開発する。

既存の見守りシステムでは、人物の移動経路や機器操作などの日常行動パターンから異常を検知するものや、人物の動きが無くなったことを異常な状態として認識するものなどが提案されている。また、ユーザにセンサを身に付けさせ、呼吸数や血圧などを直接計測したり、それらをもとに人物の行動を認識する研究なども存在するが、これらの手法では人物の詳細な情報を取得するためにユーザにセンサを身に付けさせなければならない。

非装着型の計測方法として、Kinect の距離画像を用いて呼吸数などを計測する方法が提案されている[1, 2]。また、その応用として、ベッドに寝ている人物[3, 4]やエアロバイクで運動している人物[5]の呼吸測定を行うシステムなども提案されている。しかし、これらの研究ではカメラと人物の位置関係が予め決められており、近距離での観測を前提としているため、監視カメラのような使い方をすることはできない。

通常、心拍数などのバイタルサインを計測する場合、パルスオキシメータなどの機器を用いてユーザが自分で計測したり、リストバンド型の心拍計などをユーザに装着させておく必要がある。また、救護時などに人が直接計測を行う場合でも、相手の体に触れて脈拍を取るなどの方法が一般的であり、監視カメラ映像のみで実現することは難しい。

これに対し、本研究では移動ロボットを用いて人物のバイタルサインを計測する方法について研究する。移動ロボットを制御して人物に近づかせ、適切な位置や角度から観測を行うことで人物の詳細な状態確認を行う方法の開発を行う。そして、環境センサと連携させ、ユーザの異常を検知して自動的に計測や通報などを行う見守りシステムを構築する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、環境センサと移動ロボットが連携して人物の状態確認を行う見守りシステムの開発である。まず、部屋の上部に設置したカメラから得られる画像を用いて人物を発見・追跡し、姿勢情報をもとに人物の行動や状態を推定する。そして、人物が倒れるなどの異常が発生し、より詳しい状態確認が必要であると判断された場合には、移動ロボットが自動的に人物に近づき、意識の有無や呼吸状態、心拍数などのバイタルサインを確認し、状況に応じて通報などを行う。最近では画像認識や車の自動運転などの分野で機械学習や深層学習(ディープラーニング)の技術が目覚ましい成果を上げており、本研究でもその技術を取り入れて認識性能を向上させる。そして、実際にオンラインで自動的に動作する見守りシステムを開発し、介護や福祉などの分野で役立つ技術を実現させる。

3. 研究の方法

過去の研究において、見守りシステムの試作を行い、理想的な状況であれば一連の動作を自動的に実行できることを確認した。しかし、現実の状況下で実際に動作させるためにはいくつかの課題を解決する必要がある。本提案では以下の内容について研究した。

(1) 呼吸推定の安定化

赤外線カメラから取得した距離画像を用い、胸部の距離変動をもとに呼吸を推定する(図1)。画像を格子状に分割し、それぞれの領域における距離変動をもとに胸部領域を抽出する。黄色の矩形が呼吸による動きと判定された領域であり、緑色の波形がその動きを表している。しかし、呼吸による距離変動は数 mm 程度と小さく、取得される距離のノイズや、体の動き、観測時の角度や個人差などにも影響されるため、胸部領域を正確に抽出することは難しい。また、仰向けや横向きだけでなく、うつ伏せの状態でも背中側から呼吸による動きを観測できることを確認しているが、正面側から観測した場合は動き方や領域の分布が異なる。さらに、正常な呼吸だけでなく、頻呼吸などの異常な動きも検知したい。そこで、これらに対応し、安定に呼吸を推定する方法について研究する。

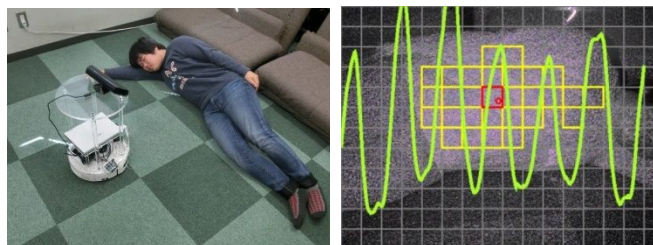


図1 距離変動を用いた呼吸推定

具体的には、それらの距離変動のデータを収集し、深層学習の技術を用いて判別器を作成する。色々な姿勢において、胸部領域を安定に抽出し、正常な呼吸と異常な呼吸を区別する方法を開発する。

(2) 転倒人物の姿勢推定と移動ロボットの目標位置計算

天井カメラで人物の転倒などの異常を検知すると、移動ロボット(図2)を人物の近くへ移動させる。その際、転倒した人物の姿勢を推定し(図3)、人物の正面側に移動ロボットの目標座標を設定する必要がある。人物の頭部や両肩などの3次元座標を用いて計算していたが、転倒時には隠れなども多く発生するため、姿勢をうまく認識できないことも多い。特に、人物の前後を正しく認識したり、うづくまるなどの複雑な姿勢を認識することは難しい。



図2 移動ロボット

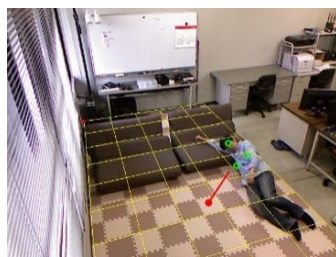


図3 転倒人物の姿勢推定

複雑な転倒姿勢を正しく認識するため、天井に設置した赤外線カメラから得られる画像情報だけでなく、距離情報なども併用し、転倒時の詳細な姿勢情報と距離情報を紐づけて機械学習(深層学習)を行い、転倒人物のモデルデータを作成する。また、天井カメラも複数台設置し、人物を複数の方向から観測することで安定な姿勢推定を実現する。そして、移動ロボットが近づき、状態観測を行うために適した目標位置を計算する。

複雑な転倒姿勢を正しく認識するため、天井に設置した赤外線カメラから得られる画像情報だけでなく、距離情報なども併用し、転倒時の詳細な姿勢情報と距離情報を紐づけて機械学習(深層学習)を行い、転倒人物のモデルデータを作成する。また、天井カメラも複数台設置し、人物を複数の方向から観測することで安定な姿勢推定を実現する。そして、移動ロボットが近づき、状態観測を行うために適した目標位置を計算する。

(3) 移動ロボットの経路計画と移動制御

図4はロボットが目標位置までの移動経路を求め、実際に移動している様子である。しかし、室内のような障害物の多い環境で安全に移動させることは難しい。



図4 経路計画と移動制御の様子

移動ロボットを既知の環境で制御する場合、SLAMを用いて事前に地図を作成し、それを用いて自己位置推定や経路計画を行うのが一般的である。また、周囲状況を観測するためのLRFには、水平面のみ観測可能なものが広く使用されている。本システムでも同様の方法を用いるが、本研究で想定している状況では転倒人物が事前に学習した地図には存在せず、未知の障害物となる。そのため、人物の体を壁と間違え、自己位置推定に誤差が生じることがある。また、腕などの低い部位はロボットから障害物として観測できず、衝突してしまう危険性もある。そこで、距離情報を取得可能なKinectを天井カメラに用い、障害物の高さを推定する。そして、ロボットから観測可能な障害物と観測できない障害物を考慮してロボットの制御を行う。

4. 研究成果

(1) 転倒人物の姿勢推定の安定化

CNNを用いた転倒人物の姿勢推定

呼吸推定を行うためにはロボットを人物の前側から近づかせる必要がある。天井カメラから撮影した画像を機械学習させて転倒人物の姿勢推定を行った。識別する姿勢は図5のような右仰臥位、左仰臥位、仰臥位、立位の4クラスとし、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional neural network, CNN)を用いてその分類を行った。



図5 学習に用いた画像データ例

まず、Kinectで取得できる距離画像とカラー画像から背景差分を用いて人物領域を抽出した画像を取得した。次に、背景領域に学習を左右されないように人物領域を正方形で切り抜いた。また、認識精度を高めるため、取得した画像に対してデータ拡張を行い、識別器を作成した。そして、CNNの畳み込み層やフィルターサイズを変更して認識性能の検証を行った。また、学習データを増やし、GPUを用いた高速化処理を実装した。さらに、学習したパラメータを可視化(図6)し、学習の傾向を把握した。そして、実際に転倒人物の画像の判別実験を行い、その有効性を確認した。

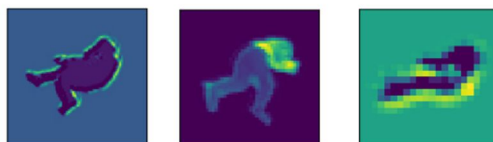


図6 機械学習の可視化

骨格情報を描画した人物画像を用いた動作認識

人物領域の画像データを CNN で学習させて姿勢推定を行う場合、一般的に未学習の人物に対しては認識精度が低くなる傾向がある。そこで、Kinect を用いて人物の骨格情報を取得し、人物領域にスケルトンを描画した画像(図7)を CNN に学習させて判別を行う方法を提案した。人物領域にスケルトンを描画することで服装の変化や未学習の人物に対する汎用性を高め、スケルトンに色を付けることで身体の部位の意味的情報を追加する。そして、この3種類の画像データを用いて実際に認識精度の比較実験を行い、スケルトンを描画することで認識精度が向上することを確認した。



図7 骨格情報を描画した人物画像

(2) 呼吸推定の安定化

CNN を用いた呼吸推定

Kinect の距離画像を用いて人物の胸の動きを取得し、その距離変動をもとに呼吸推定を行う。しかし、腕や体などの動きを誤検知してしまうため、まず呼吸による動きかどうかを判別する必要がある。そこで、図8のような呼吸やノイズの波形を1次元畳み込みを用いた CNN で学習させ、それらを判別する手法を提案した。

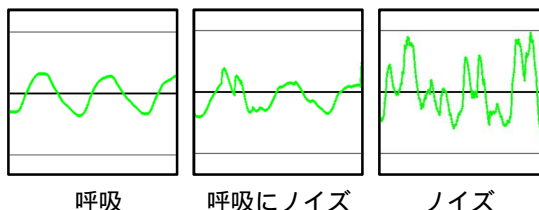
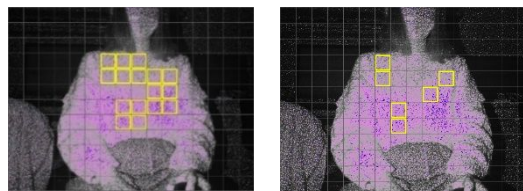


図8 判別する波形データの例

まず、学習に用いる呼吸データを取得するため、Kinect を用いて距離変動を CSV 形式で保存した。そして、機械学習を用いて呼吸推定を行うため、取得した距離データが呼吸による動きかノイズかを分類した。振幅が 4~20 mm のものを呼吸の候補とし、明らかに呼吸でないものは学習から除外した。そして、短時間でリアルタイムに判定を行うため、CSV データから 8 秒ずつの波形を切り出し、1次元畳み込みを用いて呼吸による動きかノイズかを判定する識別器を作成した。また、評価実験として、縮小率や切り出し間隔の変更を行い、認識結果の比較検証を行った。図9は呼吸の認識結果を表示した例である。黄色の枠で囲まれた部分が呼吸として判定された領域を示している。データを 1/8 まで縮小しても認識率に大きな低下が見られなかった。切り出し間隔を大きくすると学習時間は短くなったが、図9右の失敗例のように学習データの不足により認識率が下がることを確認し、提案手法により呼吸による胸の動きの識別が可能であることを示した。



成功例

失敗例

図9 呼吸判定の実験結果

LSTM による時系列呼吸データの自動異常検知

頻呼吸や徐呼吸などの異常な呼吸の判別を行うため、LSTM (long short-term memory) を用いて時系列呼吸データの自動異常検知を行う方法を開発した。

まず、Kinect を用いて距離変動の波形データを取得する。そして LSTM で正常呼吸のデータのみを学習させ、入力した呼吸データの少し先の予測値を出力する。その予測値と実際の呼吸データの差を計算し、その差を異常値として算出する。マハラノビス距離を用いた異常度の計算により、無呼吸や正常呼吸に類似する頻呼吸、徐呼吸の異常検知を可能にした。また、異常値の閾値を設定しておくことで、呼吸の異常を自動的に検知できるようにした。

実際に被験者 8 名の呼吸データを用いた評価実験を行い、提案手法の有効性を確認した。図10, 11は実験結果の一例であり、赤い波形がマハラノビス距離を用いて計算した異常度、青い横線が自動的に設定された閾値を示している。正常呼吸の間では異常度が閾値を超えず、無呼吸の間で閾値を超えており、異常を正しく検知できていることが確認できた。

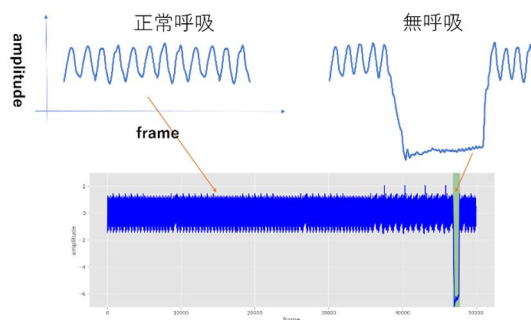


図10 Kinect から取得した呼吸波形

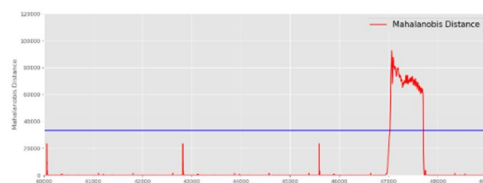


図11 無呼吸の異常検知結果

ウェーブレット変換とオートエンコーダを用いた呼吸推定

CNN を用いて呼吸推定を行う場合、未学習者に対して認識精度が低いことや、大量の呼吸データとノイズデータが必要なことなどが課題となる。そこで、少ないデータ数かつ呼吸データのみを用いて、未学習者に対しても認識可能な呼吸推定方法を開発した。

Kinect で距離変動を取得し、切り出した波形データに対してウェーブレット変換を用い、周波数解析を行った(図12)。さらに、呼吸時の周波数解析の結果のみをオートエンコーダに学習させ、分類のための閾値を設定した。最後に、呼吸データのみ学習させたオートエンコーダと設定した閾値を用いて、呼吸と呼吸以外の分類を行った。評価実験では人物ごとにデータを分割して交差検証を行い、提案手法の汎化性能を確認した。

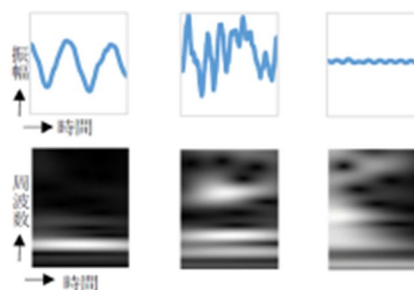


図12 波形データとウェーブレット変換後の画像の例

(3) 障害物の高さを考慮したロボット制御

転倒した人物を考慮し、正確な自己位置推定と安全な経路計画を行うため、天井に設置した Kinect から取得した距離画像を用いて障害物の高さを推定した(図13)。ロボットに設置した LRF の観測面の高さを基準とし、ロボットから観測可能な障害物と観測できない障害物を区別している。

経路計画の結果を図14に示す。桃色の障害物はロボットから観測可能であり、自己位置推定の際に考慮する必要がある。また、黄色や青色の障害物はロボットから観測できないが、移動経路を求める際に回避する必要がある。

求めた経路に沿って動作させた結果を図15に示す。図15上段は実際の風景、下段は処理の様子であり、緑色が推定されたロボットの位置と向きを表している。特に車輪の片方が絨毯に乗り上げた際、オドメトリ情報に誤差が発生してしまったが、障害物を考慮した自己位置推定を行うことでその誤差を修正できていることが確認できた。

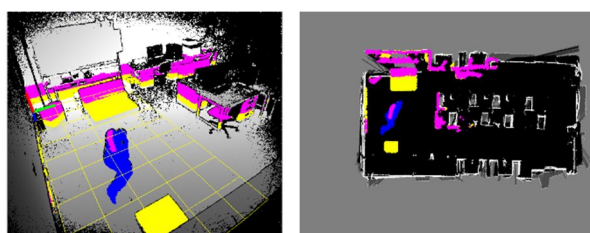


図13 高さを考慮した障害物検出

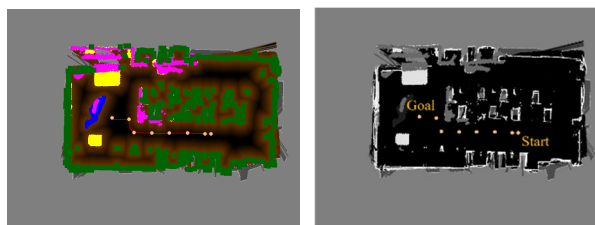


図14 経路計画の結果

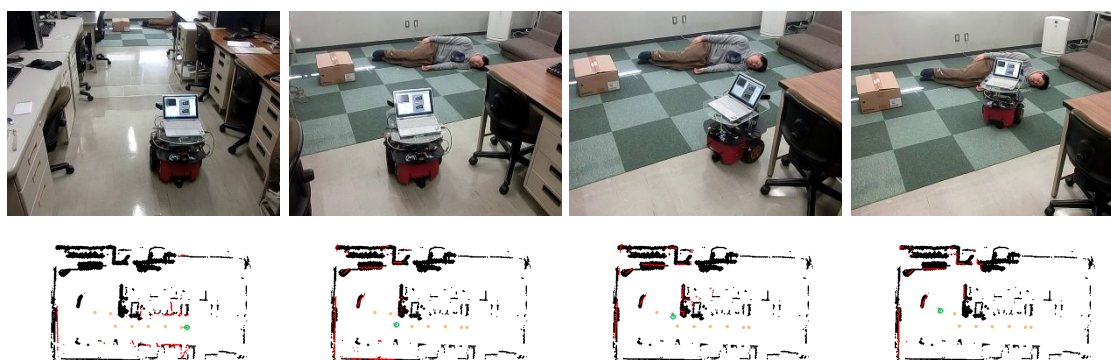


図15 移動ロボットの制御実験の結果

< 引用文献 >

- [1] H. Aoki, et al., "Non-contact respiration measurement using structured light 3-D Sensor", Proc. of SICE Annual Conf., pp. 614-618, 2012.
- [2] Q Li, et al., "How do you breathe -- a non-contact monitoring method using depth data", Proc. of IEEE 19th Int. Conf. on e-Health Networking, Applications and Services, 2017.
- [3] N. Bernacchia, et al., "Non contact measurement of heart and respiration rates based on Kinect", Proc. of IEEE Int. Symp. on Medical Measurements and Applications, 2014.
- [4] Y. Matsuura, et al., "Screening sleep disordered breathing with noncontact measurement in a clinical site", J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 29, No. 2, pp. 327-337, 2017.
- [5] H. Aoki, et al., "Basic study on non-contact respiration measurement during exercise tolerance test by using Kinect sensor", Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, pp. 217-222, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Junji Satake, Futoshi Jogo, Kurumi Hiraki, Kohei Iwasaki, and Taisei Shirouzu	4. 巻 35
2. 論文標題 Monitoring System Using Ceiling Camera and Mobile Robot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 206-211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2023.p0206	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山北捺未, 佐竹純二
2. 発表標題 見守りシステムのための1次元量み込みを用いた呼吸推定
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三輪香奈恵, 佐竹純二
2. 発表標題 骨格情報を描画した人物領域を用いたCNNによる不審動作認識の提案
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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