

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04394

研究課題名（和文）警備ロボットのための自律移動・異常検知・タスクの手分けに関する研究

研究課題名（英文）Autonomous Navigation, Change Detection, and Task Assignment for Patrolling Robots

研究代表者

星野 智史（HOSHINO, SATOSHI）

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：80431980

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自律移動に関する技術のうち、動作計画に焦点をあて、深層学習の一種であるCNNを用いることで、複数の物体各々に対する回避動作を生成することに成功した。続いて、警備ロボットにとって、環境で起きている異常を検知できることは重要な能力となる。そこで、背景差分による物体検出技術として、変動量に応じて局所的なテンプレートマッチングと大域的なテンプレートマッチングを使い分けた色差エッジ画像に基づく背景差分法を提案した。さらに、警備タスクを複数台のロボットで手分けする技術開発にも取り組んだ。3年間の成果は、今後、警備ロボットの実用化に応用できる技術である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として、ロボットは、動く・動かない障害物の種類に応じた回避動作を計画しながら自律的に移動することが可能となる。また、基準画像とは異なる位置で撮影された入力画像に対しても、テンプレートマッチングの枠組みで異常を検出することが可能となる。社会的意義としては、本学のロボット技術実証施設を通じて、開発した技術を実用化の観点から評価する。技術開発と実証実験を繰り返すことで、警備ロボットシステムが実現レベルに達する。また、本研究における各課題は、案内・搬送・清掃等にも該当するため、研究成果は、これらサービスロボットへ波及するものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on motion planning for patrolling robots. By applying CNN to the motion planner, a robot was enabled avoid obstacles. For the patrolling robots, it is also important to detect changes in an environment. Therefore, we proposed a background subtraction method based on color-difference edge images that uses both local and global template matching depending on the amount of variation. We further proposed a territorial approach for assigning multiple tasks to multiple patrolling robots. These results can be applicable to actual patrolling robots in the future.

研究分野：ロボティクス

キーワード：警備 動作計画 異常検出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

身の回りの環境をロボットが警備するためには、自ら考え・動き・見る能力を備えていなくてはならない。申請者は、バイズ推定と価値反復法に基づく知的思考モデルを構築した。これにより、ロボットは警備すべき場所を特定できるようになった。そこで本研究では、ロボットがしかるべき場所に動きその様子をカメラで見る、(1) 自律移動と(2) 異常検知に関する技術開発に取り組む。また、公共施設等広範囲の警備を想定し、複数台のロボットによる警備システムに拡張する。そのために、警備タスクを(3) 複数台のロボットで手分けする技術開発にも取り組む。

(1) 自律移動

警備のために移動するロボットは、同時に目の前の物体との衝突を回避できることが求められる。これは、動作計画と呼ばれる。申請者は従来研究にて、歩行者に対してや人混みでのロボットの動作計画を実現した。さらに、深層学習の一種である CNN(Convolutional Neural Network) に基づいた動作計画器を構築し、ロボットに搭載されたカメラより得られた画像を入力に、物体の種類に応じて離散的な回避動作(直進・右旋回・左旋回)を出力することに成功した。しかしながら、画像中に複数の物体が存在した場合、個々に対する回避動作およびそれらの合成は、深層学習に基づく動作計画では試されていない学術的な「問い(1)」である。

(2) 異常検知

申請者は従来研究にて、ロボットに搭載されたカメラ画像をオプティカルフローで表現し、これを CNN へ入力することで、人物検出および動作の認識に成功した。本研究では、ロボットに落とし物や盗難・破損といった環境中の異常を検知させる。これらの異常はオプティカルフローで表現することができないため、時系列画像間での差分検出が有効な手段となる。固定の監視カメラであれば、定点観測により得られた時系列画像の差分から異常を検知することができる。しかしながら、警備ロボットでは観測点の位置・姿勢がずれてしまう。そのため、異なる観測点で得られた時系列画像から異常検知が行えるかが学術的な「問い(2)」となる。

(3) 複数台のロボットで手分け

警備タスクの手分けには、環境全体をロボットごとに分割する方法が有効である。申請者は従来研究にて、警備負荷を均等化するための領域分割手法を提案した。これにより、ロボットの台数分だけ警備性能が向上、すなわち異常検知数が増加した。しかしながら、ロボットを無線通信で介する集中管理型のシステムであったため、通信状況に応じて警備を続行できないことがあった。そこで本研究では、通信を必要としない分散型の警備システムを構築する。分散型では、各ロボットが主体となって領域分割を行うため、警備領域が重複する。それでも、集中型に劣らない性能で異常を検知できるかが学術的な「問い(3)」となる。

2. 研究の目的

警備業務を代替するロボットシステムの実現に向けては、自ら考え・動き・見ることのできる複数台のロボットが、通信せず主体的にタスクの手分けをできることが求められる。すなわち、「考える」、「動く」、「見る」、「そして手分け」する技術を統合することこそが、本研究の目的達成に向けたソリューションとなる。以下に、背景で挙げた学術的問い(1)~(3)について、それらの目的を詳述する。

学術的「問い(1)」に対しては、カメラ画像中全ての物体を、人かそれ以外の障害物に識別し検出する。そして、検出物体のみを写した画像を CNN 動作計画器へ入力することで、各物体に対する離散的な回避動作の生成を試みる。また、各回避動作を対象物体との位置関係を重みに合成することで、全ての物体を考慮した回避動作を生成することも可能となる。

学術的「問い(2)」に対しては、RGB-D カメラを用いて、各観測点における基準画像の RGB 値に加え 3 次元の点群データを記録する。警備の際、ロボットの自己位置と姿勢を基に、得られた画像と基準画像で点群のマッチングを行い、画像間で一致する視野範囲を特定する。異なる観測点で得られた画像でも、この視野範囲での RGB 値から、正確な差分検出および異常検知が可能となる。

学術的「問い(3)」に対しては、各ロボットが知的思考モデルに基づき領域の拡大と縮小を繰り返す自己組織化的な領域分割アプローチを提案する。ロボットは、警備すべき場所を覆うように領域分割を行う。その際、他のロボットとの領域の重複を許容する。その結果、警備領域を限定、かつ、他のロボットと共有することで、集中型より多くの異常を検知することが可能となる。

3. 研究の方法

(1) 自律移動

この課題では、深層学習に基づくロボットの動作計画に焦点をあて、複数の物体各々に対する回避動作の生成を目指す。そのため、深層学習の一種である CNN を用いることで、画像中に写る人間やその他の障害物に対して、「person」と「obstacle」の識別を可能とする。さらに、これらの画像を入力、人とそれ以外の障害物に対する回避動作を教示し、これを出力の正解ラベルとして学習のデータセットとする。なお、CNN は人以外の物体を全て障害物 (obstacle) と識別する。そのため、回避動作は、例えば段ボール箱のみに対して教示するだけで十分である。そして、CNN 動作計画器の模倣学習を行うことにより、ロボットは自律移動の際、人とそれ以外の障害物に対して、それぞれ異なる回避動作が可能となる。

学習後の動作計画器は、直進・右旋回・左旋回といった速度や角速度の離散値を出力する。一方で、自動運転で用いられる動作計画器は、速度や角速度の連続値を出力する。前者は識別問題、後者は回帰問題に対して CNN 動作計画器が用いられることとなる。識別問題に比べ、回帰問題では動作計画器の学習に膨大なデータセットと時間を要する。そこで、本研究で提案する離散的 CNN 動作計画器は、より少ない学習コストで回避動作が生成できることを明らかにする。また、離散的な動作であっても、各回避動作を対象物体との位置関係を重みに合成することで、速度・角速度の連続値を出力し、連続的 CNN 動作計画器と同じ回避動作が生成できることを明らかにする。

(2) 異常検知

申請者は、基準画像と完全に同じ視野範囲の画像であれば、Sauvola 法による二値化処理および ZNCC (Zero means Normalized Cross Correlation) によるテンプレートマッチングを行うことで、廊下に落ちた iPhone と ID カードの検知に成功している。しかしながら、位置・姿勢が異なると、落とし物以外にも多くの差分が検出され、異常検知に失敗してしまった。

そこでこの課題では、観測点とは異なる位置・姿勢で得られた画像に対しても、基準画像と一致する視野範囲の特定を目指す。そのため、RGB-D カメラを用いて、各観測点における基準画像の RGB 値に加え 3 次元の点群データを記録する。そして、警備の際に各観測点付近で得られた時系列画像の 3 次元点群とマッチングを行う。点群のマッチングには、ICP (Iterative Closest Point) や NDT (Normal Distributions Transform) を用いる。ここでは、3 次元空間での点群の位置・姿勢が探索パラメータとなる。そこで、ロボットの自己位置と姿勢 (x, y, θ) から点群の探索範囲を限定し、マッチングの処理時間を削減する。

これにより、基準画像との間で一致する視野範囲を特定することができる。そして、この視野範囲の画像にのみ、Sauvola 法と ZNCC を適用する。その結果、異なる観測位置・姿勢で得られた時系列画像であっても、基準画像との差分から正確に異常が検知できることを明らかにする。

(3) 複数台のロボットで手分け

分散型の警備ロボットシステムでは、サーバの代わりに各ロボットが自身の警備領域を分割する。そこで、他のロボットの情報が未知でありながらも、集中型と同等以上の性能で異常が検知できる領域分割を目指す。そのために、各ロボットによる自己組織化的領域分割アプローチを提案する。アルゴリズムの概要は以下の通りである。

ロボットは、環境全体を警備領域とし、知的思考モデルに基づき警備を行う。異常を検知したらその場所に向けて領域を縮小させる。領域が検知場所に縮小したら再び拡大させる。その際、知的思考モデルに基づき最も重点的に警備すべき場所を拡大先とする。～ の繰り返し。

複数個所で異常を検知したらそれらを覆うような領域を形成する。

集中型では、3 台の警備領域にそれぞれ $2 \cdot 2 \cdot 1$ つの白丸が含まれた。一方分散型では、1 台の警備領域に全ての白丸が含まれている。また、異常の起こらない場所は、警備領域に含まれていない。すなわち、ロボットは警備領域を限定する分割を行った。そこで、本分割アルゴリズムを複数台のロボットへ実装する。そして、他のロボットと領域の重複を許容し、全てのロボットで同様の領域分割を試みる。警備領域を異常発生場所に限定しロボット間で共有することにより、多くの異常が検知できることを明らかにする。

4. 研究成果

本研究によって、従来、人の操作によって警備をしてきたロボットが、警備員と同じように自ら考え、怪しい場所を重点的に見守ることが可能となる。また、動作計画技術により、自律して衝突を避けながら怪しい場所へ移動することも可能となる。さらに、複数台ロボットによる手分けにより、広範囲にわたる警備も可能となる。以上の成果は、今後、少子高齢化が進み警備員不足の問題に直面するであろう我が国にとって、貴重なブレークスルーをもたらすものと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kobayashi Ryo, Hoshino Satoshi	4. 巻 41
2. 論文標題 Observation Model for Robust Localization of Mobile Robots based on Particle Filter in Changing Environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 92 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.41.92	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 Saito Haruto, Hoshino Satoshi	4. 巻 41
2. 論文標題 Background Subtraction using Template Matching with Color Difference-based Edge Images for Spatial Change Detection by Patrolling Robots	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 72 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.41.72	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 Hoshino Satoshi, Yoshida Yusuke	4. 巻 40
2. 論文標題 Motion Planning for Obstacle Avoidance through Mediated Perception and LSTM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 162 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.40.162	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 八木 秀明, 星野 智史	4. 巻 39
2. 論文標題 測量地図情報に基づく移動ロボットの自己位置推定法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 275-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.275	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 吉田 遊友, 星野 智史	4. 巻 39
2. 論文標題 物体検出画像と深度画像を用いたCNNによる移動ロボットのEnd-to-End動作計画	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 479-482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.479	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 齋藤 陽都, 星野 智史	4. 巻 39
2. 論文標題 警備ロボットによる全方位カメラを用いた差分画像からの空間変化検出	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 475-478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.475	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 Gloria Beraldo, Kenji Koide, Amedeo Cesta, Satoshi Hoshino, Jun Miura, Matteo Salva; & Emanuele Menegatti	4. 巻 16
2. 論文標題 Shared Autonomy for Telepresence Robots Based on People-Aware Navigation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ntelligent Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 109-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-95892-3_9	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 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 鵜沼恭平, 星野智史
2. 発表標題 移動ロボットによる障害物回避のためのLiDAR俯瞰画像を用いた動作計画
3. 学会等名 第23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 2022年

1. 発表者名 鶴沼恭平, 星野智史
2. 発表標題 移動ロボットによる障害物回避のためのLiDAR俯瞰画像を用いた動作計画
3. 学会等名 日本ロボット学会第40回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若狭直哉, 星野智史
2. 発表標題 複数台警備ロボットによる訪問者の向きを考慮した領域分割法
3. 学会等名 日本ロボット学会第40回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保田有羽, 鶴沼恭平, 星野智史
2. 発表標題 移動ロボットの動作計画のための深度差分画像を用いたCNNによる障害物状態推定
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 Satoshi Hoshino and Yusuke Yoshida
2. 発表標題 Motion Planner based on CNN with LSTM through Mediated Perception
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴沼恭平, 吉田遊友, 星野智史
2. 発表標題 マルチタスク学習による移動ロボットのEnd-to-End 動作計画
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星野智史, 吉田遊友
2. 発表標題 中間知覚とLSTMによるロボットの動的障害物回避動作計画
3. 学会等名 日本ロボット学会第39回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林亮, 星野智史
2. 発表標題 移動ロボットのための環境変化にロバストな自己位置推定法
3. 学会等名 日本ロボット学会第39回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤陽都, 星野智史
2. 発表標題 警備ロボットによる空間変化検出に向けたルールベースのアルゴリズムと深層学習に基づく背景差分法の比較
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 小林亮, 星野智史
2. 発表標題 移動ロボットのための環境変化にロバストな自己位置推定の観測モデル
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 Satoshi Hoshino; Tomoki Hisada; Ryota Oikawa
2. 発表標題 Discrete Motion Planner based on Deep Recurrent Neural Network for Mobile Robot Obstacle Avoidance in Dead-End Environments
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Hoshino and Joichiro Sumiyoshi
2. 発表標題 Comparison of End-to-End Continuous and Discrete Motion Planners for Autonomous Mobile Robots
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤澤郁也, 星野智史
2. 発表標題 複数台の警備ロボットによる訪問者を対象とした環境の領域分割
3. 学会等名 日本ロボット学会第38回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤陽都, 星野智史
2. 発表標題 警備ロボットによる全方位カメラを用いた差分画像からの空間変化検出
3. 学会等名 日本ロボット学会第38回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田遊友, 星野智史
2. 発表標題 物体検出画像と深度画像を用いたCNNによる移動ロボットのEnd-to-End動作計画
3. 学会等名 日本ロボット学会第38回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤陽都, 伊藤雅基, 藤澤郁也, 星野智史
2. 発表標題 警備ロボットのためのRGBカメラによる差分画像からの空間変化検出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020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
---------	---------