

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12007

研究課題名（和文）社会性昆虫の経路積算説に対する工学的視点からの検証と応用

研究課題名（英文）Verification and application of a path accumulation theory of social insects from an engineering perspective

研究代表者

大川 一也（Okawa, Kazuya）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50344966

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）： サハラ砂漠で生息するCataglyphisという蟻は、連続した細かい移動の軌跡を足していく経路積算によって位置推定していると考えられている。しかし、移動量と向きとの統合方法についての有力な説はない。本研究では、深層学習の一つで時系列情報が扱えるLSTMを用いて統合させることとした。実験では、移動量を計測するための加速度センサ、向きを計測するための角速度センサを搭載した移動ロボットを製作した。また、高精度なRTK-GNSSから得られる位置や速度を真値とし、それに基づいてLSTMの学習を行った。結果としては数学的な数値積分によって算出した従来手法よりも、高精度に位置推定ができることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サハラ砂漠で生息するCataglyphisという蟻は、連続した細かい移動の軌跡を足していく経路積算によって位置推定していると考えられているが、蟻が餌を探してさまよいつつこれらの計算をしているとは考えにくい。その一方で、近年の深層学習を用いることで動物のような知的さを人工的に機械に持たせられるかもしれない。そこで、生物学者による「経路積算説」を採用するものの、謎とされている「距離」と「向き」の統合部分を深層学習で学習させる手法を提案することとした。結果としては、計測誤差の影響を受けにくい計算ができるようになり、従来手法よりも良い結果が得られた。

研究成果の概要（英文）： Ants called Cataglyphis, which live in the Sahara Desert, are estimated their position by integrating their trajectories of movement. However, there is no convincing theory about how to integrate the displacement and orientation. In this research, LSTM, which is one of deep learning and can handle time series information, is applied for the integration.

In order to verify the effectiveness of the LSTM, a mobile robot was built. The robot is equipped with an acceleration sensor to measure the amount of movement and an angular velocity sensor to measure the orientation. In addition, the position and velocity obtained from highly accurate RTK-GNSS were taken as true values, and LSTM was trained based on them. As a result, it was confirmed that the position can be estimated with higher accuracy than the conventional method calculated by mathematical numerical integration.

研究分野：ロボット工学

キーワード：LSTM 位置推定 IMU

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

社会性昆虫である蟻や蜂は巣を持っており、餌を探してさまようものの、餌を見つけると巣に持ち帰る。つまり、これらの昆虫は巣に戻るためのなんらかの位置推定やナビゲーションを行っていることになる。蟻の場合、一般にフェロモンを道しるべとすることで巣に戻っているといわれている。しかし、サハラ砂漠に生息する *Cataglyphis* という蟻の場合、フェロモンの付いた砂が風で飛ばされるだけでなく、そもそも砂が高温すぎてフェロモンが使えないという。事実、餌を探するときには左右にさまよいながら歩くものの、餌を見つけた後に巣に戻る経路は、行きに通った経路とはまったく異なり、巣まで直線的に帰ることが知られている。つまり、フェロモンに頼らない帰巣能力を持っている。

このような帰巣能力について、生物学者によってさまざまな研究がなされており、いくつかの仮説が出されているが、未だ謎に包まれた部分もある。本研究では、この帰巣能力を工学的な視点から検討し、この謎の解明に挑む。

### 2. 研究の目的

帰巣するために最も重要なことは「位置推定」である。*Cataglyphis* という蟻の位置推定について、生物学者による最も有力な説は、短時間における「距離」と「向き」から経路を算出し、それを積算していく「経路積算説」である。なお、車輪型移動ロボットの位置推定として広く用いられているジャイロオドメトリも、考え方としては基本的には同じ経路積算方式である。しかし、これらのロボットの場合、三角関数を用いた理論的な座標変換を高頻度かつ高精度で行っており、蟻が餌を探してさまよいながらこれらの計算をしているとは考えにくい。

その一方で、近年、さまざまな用途に対して多くの成果を上げている深層学習は、人工知能と呼ばれるように、動物のような知的さを人工的に機械に持たせることができる。そこで本研究では、生物学者による「経路積算説」を採用するものの、謎とされている「距離」と「向き」の統合部分を深層学習で学習させる手法を提案する。また、提案手法の有効性を車輪型の移動ロボットによって検証する。

### 3. 研究の方法

生物学者による研究では、*Cataglyphis* という蟻における「距離」については歩幅説や視覚フロー説などがある。また、「向き」については天空の偏光を利用した偏光コンパス説が有力である。これらを車輪型の移動ロボットに適用するために、「距離」を加速度から算出し、「向き」をジャイロセンサによる角速度の時間積分で算出することとした。ここで、車輪型の移動ロボットの場合、「距離」の算出に加速度ではなくモータの回転量から移動量を計算するのが一般的ではある。しかし、脚型ロボットやドローンのような飛行体への応用も視野に入れ、加速度を採用している。また、「向き」の計測として地磁気センサが考えられるが、環境中にあるマンホールなどの残留磁気によって大きく磁場が乱れ正しい方位を計測できないことが知られており、移動ロボットでは一般的なジャイロセンサを採用している。

移動ロボットにおいて、「距離」と「向き」の統合には三角関数を用いた座標変換であるアフィン変換を用い、それを時々刻々積分していくことにより位置を推定する。一方、本研究では時系列情報を扱える深層学習の一つである Long Short Term Memory (以後、LSTM) を用いることとした。LSTM では、長期の記憶をしておく必要がなく、昆虫のような生物であっても適用できる可能性があるというのも採用した理由である。

上述のようにセンサ類を決めたものの、当初から懸念事項がいくつも存在した。一番の懸念事項はセンサの誤差と積分による誤差の累積である。「距離」を求めるためのセンサは加速度センサであることから、数学的には加速度を速度に、速度を位置(移動距離)に2回の時間積分をする必要がある。同様に、「向き」を求めるためのジャイロセンサも角速度センサであることから、角速度を時間積分して角度(向き)にする必要がある。このため、センサで計測した値に誤差が生じると、それが累積してしまう。特に、加速度センサの場合、ロボットの進行方向の加速度だけでなく、重力加速度や路面の凹凸による予測困難な振動も含めて計測するため、誤差が多く含まれることが一般的に知られている。LSTM は単純な時間積分ではないものの、誤差を含んだデータは問題になることは容易に予想できる。また、走行していたロボットが停止した場合、実際のロボットは速度0、加速度0となるが、速度に誤差  $E_v$  を含んでいると速度  $E_v$ 、加速度0という一定速度で走行していると勘違いする。これらの懸念事項をできるだけ少なくするために、LSTM の学習に工夫を加えることが重要となる。

上述のように、加速度センサとジャイロセンサを用い LSTM で統合する手法ではあるが、LSTM で学習させる際の真値として、誤差の少ない高精度な RTK-GNSS によって得られたデータを用いることとした。なお、RTK-GNSS のデータは学習時において用いるものであり、実際に LSTM を用いる際は RTK-GNSS が不要である。他に、LSTM の学習に工夫を加えた部分の一例としては、LSTM の入力に誤差を含んだ加速度情報を入れるが、その出力に RTK-GNSS から求めた誤差の少ない加速度情報を含めている。LSTM を学習した後では出力にある加速度情報は使うことがないが、これを入れて学習させることによって誤差の影響を少なくするフィ

ルタのような性質を持たせることができると考えた。また、1つの LSTM で位置を推定するのではなく、加速度から速度を算出するための1つ目の LSTM と、速度から位置を算出するための2つ目の LSTM といった2段の構成になるようにした。

#### 4. 研究成果

車輪型の移動ロボットを用いて検証実験を行い、提案手法の有効性を検証した。なお、移動ロボットの研究では一般的な数学的に時間積分する手法を従来手法として、検証する上での比較対象とした。

検証実験の結果、提案手法は従来手法よりも良い結果が得られた。その理由を解析したところ、LSTM を採用することによって、以下の2つが効果的に機能したと結論づけた。1つ目は、誤差を取り除くフィルタとしての役割である。LSTM を学習させる際に、高精度な RTK-GNSS の値を用いたことにより、誤差の少ない速度推定ができていることを確認した。2つ目は、実際のロボットが停止した際に、累積していた速度誤差をゼロにリセットする役割である。当初、なぜそれが実現できるのかさえも分からなかったが、定速で走行している場合の加速度は振動による値の変動があるのに対し、停止している場合の加速度は値の変動がないという特徴を LSTM が学習し、結果として実際のロボットが停止した時に累積していた速度誤差をゼロにリセットできたことと結論づけた。

Cataglyphis という蟻が LSTM のような計算はしていないと思うが、生物学者の有力な説を参考に工学的な視点で発展させた結果、非常に有用な手法を提案することができた。特に、「距離」の算出に加速度センサを用いたため、車輪型の移動ロボットに限らず、幅広く応用させることができる手法となっている。この研究成果の一部は、2022年12月に特許出願をしている。また、出願直後の SI2022 において、本研究の成果を学生が発表し、優秀講演賞をいただいた。今後は、特許出願のため見送っていた論文執筆を行っていききたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山中幸季, 大川一也
2. 発表標題 昆虫の3つの単眼を模倣したシステムの提案と 移動ロボットの方向制御
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第 60 回学生員卒業研究発表講演会論文集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 当該推定装置を備える移動ロボット、推定方法およびコンピュータプログラム	発明者 大川一也, 山中幸季	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-198042	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------