

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14703

研究課題名（和文）自律的な環境適応能力実現のためのセンサ情報に基づく階層化による行動決定機構の構築

研究課題名（英文）Construction of a hierarchical behavioral decision mechanism based on sensor information to achieve autonomous environmental adaptability

研究代表者

金田 さやか (KANATA, Sayaka)

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・講師

研究者番号：60605567

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は未知環境において作業目的を達成するロボットの実現を目的として遂行した。生物が脳と身体構造、受容器の3つを同時に発達させてきたことに着目し、センサ情報に応じて行動選択機構を階層化することにより、上位の目的達成のために、下位の目的達成は無視した行動選択を実現する仕組みを構築することを目指した。具体的には、車輪型ロボットによる不整地走行、および、マルチロータヘリコプタの自律飛行を対象とした。複数の層により独立に行動決定するアルゴリズムは、センサベース階層化制御として提案し、数値実験および実証実験によりその有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は未知環境におけるロボットの環境適応性の実現に向けて、ロボットの感覚器（センサ）- 身体（構造）- 脳（行動決定）の3つをセットとして構築する点が特色である。生物の環境適応的能力に着眼した本手法は、環境の認知能力と行動の精密さが分離不可能であり、検出能力から行動決定までを同時に設計する必要性を追求したものである。本研究成果は、ロボットに本来求められてきた災害現場などの危険な環境で「ヒトに代わって作業する」という能力実現に必要な基礎的知見である。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this research is to realize a robot that can accomplish a task in an unknown environment. Focusing on the fact that living organisms have simultaneously developed a brain, a body structure, and receptors, we aimed to construct a mechanism to realize action selection that ignores the achievement of lower objectives in order to achieve higher objectives by hierarchizing the action selection mechanism according to sensor information. Specifically, we targeted uneven terrain running by a wheeled robot and autonomous flight by a multi-rotor helicopter. We proposed a sensor-based hierarchical control algorithm for independent action decisions by multiple layers, and confirmed its effectiveness through numerical and empirical experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：環境適応 自律ロボット

1. 研究開始当初の背景

Google 社や TESLA 社により車の自動運転が実現され、一般利用に向けて研究開発が進んでいる。国内でも千葉市で自動運転バスが運行された。マルチコプタを使った宅配サービスもテスト飛行が実施された。このように、自律機能を搭載した無人ロボットは、1つの産業として成長しつつある。しかし、2011年に発生したフクシマの原子力発電所の事故は、5年経った現在でも復旧活動を行っているのは人間である。なぜ現状のロボットは「使えない」のか？

自動運転するロボット車は、道路地図を有し、走行可能な領域を予め知っている。道路地図上で現在地と目的地までを連続的に結び、目標経路とする。走行中、経路上の障害物を距離センサで検出して回避する。一方、火星探査ローバは撮像画像を地球へ送り、人間にウェイポイントを与えられて移動を実現した。すなわち、目的地への誘導は人間が行い、人間がロボットに任せられると判断した局所的な距離を自律走行した[1]。このように、既存のロボットは埋め込み型の制御で実現されているため、事前に環境情報を取得不可能な**未知環境での動作が困難であり、実用化の上で問題**である。

事前情報を入手することが困難な未知環境において、自律的に地図生成を行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) の研究が盛んである[2]。SLAM は例えば、カメラと距離センサによる環境情報を取得し、高精度な 3次元地図を生成する。しかし、地図生成が目的であるため、環境を網羅的に移動すれば十分である。一方、経路計画問題は、環境地図が用意されていることを前提としており[3]、未知環境では利用できない。このように、既存技術では**環境に含まれる不確かさとロボットの作業目的とが独立して議論されてきたため、複雑な環境下で本来の作業目的を達成する適切な行動を能動的に選択するような、高次の目的達成と結びつける構造が存在しない**。未知環境における作業実現のためには、ロボットの行動は**環境の不確かさと作業目的の相互関係から決定されねばならない**。すなわち、作業目的達成を阻害するような、環境の不確かさを推定する行動を能動的に選択する能力こそ、将来のロボットに必要な不可欠な適応能力である。

2. 研究の目的

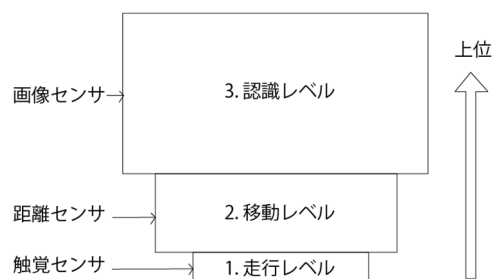
ベルンシュタインは、生物の受容器(感覚器)と身体構造、そして脳が相互的に発達したことの重要性を指摘した[4]。原始的な生物は直接受容器をもち、身体を部分的に動かして危険を回避した。少し発達した昆虫などの生物は先に挙げた原始的な生物に比べて動作は速く、遠距離受容器をもつ。このことにより、**体全体を動かし、移動を実現した**。遠隔受容器によって知覚し、遠く離れて知覚する = 事前に知覚できる、そして一連の動作を計画する時間がある。このために、脳が発達したと述べている。本研究では、ベルンシュタインの指摘に着眼し、ロボットにおける受容器(センサ情報)、身体構造(移動機構)、そして脳(学習と制御器)の3つを同時に設計する。センサ情報を基準として、行動決定機構を階層的に構築する。このことで、未知環境で自律的に目標達成する行動の実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、車輪型ロボットによる不整地走行を題材とし、ゴール地点への到達課題に取り組む。地図はなく、対象環境における移動アルゴリズムの準備は困難であることを前提とする。

このような状況で移動を実現するには、環境に含まれる不確かさを推定し、ロボットの行動結果を予測する必要がある。予測するには、各行動による環境への影響を観測し、記憶する必要がある。これは機械学習で実現できる。ただし、学習のためには定量化された目的関数を定義する必要がある。このため、単なる行動とその結果の学習では、単純な行動機構にとどまる。

そこで本研究では、図1に示すように、行動機構をセンサ情報に応じて3つの階層に分割する。図において、長さは情報量の大きさを表す。1つ目は、安全な移動実現を保障するレベルで



[図1: 本研究で構築する行動選択機構]

ある．触覚・力覚など直接の知覚情報を元に障害物を回避する行動を決定する．ロボットが転倒することなく走行状態を保つことが求められるため，走行レベルと呼ぶことにする．2 つ目は，間接知覚情報を追加する．ただし，比較的情報量の少ないもの，嗅覚や聴覚に該当する知覚情報を追加する．間接知覚により，初めてゴール地点への距離が検出できるようになる．目的をもった移動が実現されるため，移動レベルと呼ぶ．3 つ目は，膨大な間接知覚情報を追加する．具体的には，視覚情報を追加する．このレベルにおいて経路設計が定義される．経路設計のために，絶対座標を定義し，環境地図を生成する必要性が生じる．走行が容易か，障害物とみなせるかといった認識が行われるレベルであるため，認識レベルと呼ぶ．以上の3つの階層化により，複数の上下関係が定義された目的を設定することで，上位の目的達成のために，下位の目的達成は無視した行動選択を実現する．

4．研究成果

本研究は未知環境において作業目的を達成するロボットの実現を目的として遂行した．生物が脳と身体構造，受容器の3つを同時に発達させてきたことに着目し，センサ情報に応じて行動選択機構を階層化することにより，上位の目的達成のために，下位の目的達成は無視した行動選択を実現する仕組みを構築することを目指した．具体的には，車輪型ロボットによる不整地走行，および，マルチロータヘリコプタの自律飛行を対象とした．

まず，車輪型ロボットによる不整地走行を対象として，3つの層による制御系を構築し，数値実験および独立2輪型ロボットによる実証を行った．第1層は直接知覚情報としてバンパ，第2層は間接知覚情報として距離センサ，第3層はカメラ画像を元に行動決定するアルゴリズムとした．このことにより，地図なしでの自律的な移動の実現が確認できた．

次に，マルチロータヘリコプタによる自律飛行を対象として，同様の独立な複数層による制御アルゴリズムを提案した．第1層は慣性センサと高度センサを用いてホバリングを実現し，第2層は距離センサにより障害物を回避，第3層は動的目標物を捕捉，追従を実現する層として確立した．屋内用の quadrotor helicopter を使って提案手法の有効性を検証した．

申請者はこれまで，不確かさの推定と作業目的は独立に議論できないことに着目し，未知環境の不確かさを減少させる行動を能動的に選択する行動の発現を目指してきた[5]．過去の研究では，目的は評価関数として定量化できると仮定していた．このため，単純な作業目的の設定にとどまっていた．本研究では，センサ情報，移動機構と学習・制御器を同時に考慮することで，不確かさと作業目的に応じた行動選択の実現を図り，地図なしで移動可能なロボットを実現することができた．一方，行動決定機構を階層化することで，低次の目的は達成されないが，最終的な目的は達成できるような複雑な行動選択の実現を目指す点については，車輪型ロボットでは平面移動を前提としていたため，階層間で競合が生じた場合は低次の層を優先すれば解決できた．今後は，移動ロボットが転倒することを考慮し，低次の層を無視して高次層の行動選択を優先するようなアウトーループを追加したアルゴリズムの構築，その実証が必要である．

参考文献：

- [1] L. P. Chris et al. "Mars exploration rover surface operations: Driving spirit at gusev crater," Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conf. on. Vol. 2, 2005.
- [2] J.J. Leonard et al. "A computational efficient method for large-scale concurrent mapping and localisation," Robotics Research, 9th International Symposium, pp. 169-176, Springer Verlag, 2000.
- [3] S. M. LaValle, "PLANNING ALGORITHMS," Cambridge University Press, 2006.
- [4] N. A. Bernstein, "Dexterity and Its Development (Resources for Ecological Psychology)," Psychology Press, 1996.
- [5] 金田さやか：若手(B)「自律的な環境適応能力実現のための行動原理の解明とその実現」, 2013-2016.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 金田 さやか, 下村 卓, 山瀬 達也	4. 巻 第67巻 5号
2. 論文標題 冗長なRWを搭載した宇宙機の時変の角速度目標に対する姿勢制御とアンローディング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 pp. 143-151
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 -

1. 著者名 Takashi Shimomura, Hayate Ogura, and Sayaka Kanata	4. 巻 18(6)
2. 論文標題 Attitude Control of a Spacecraft as an LPV Model Using the ILQ Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Trans. of JSASS, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 6 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.18.344	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 金田 さやか, 中西 大樹, 下村 卓	4. 巻 68(4)
2. 論文標題 柔軟構造をもつ宇宙機のInput Shapingを用いた 1次モード振動抑制と姿勢制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 148-155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.68.148	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22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 大林 宏次郎, 金田 さやか, 下村 卓
2. 発表標題 Quadrotor Helicopterのための階層化制御システムの提案
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'19)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayate Ogura, Takashi Shimomura, Sayaka Kanata
2. 発表標題 Attitude Control of a Spacecraft as an LPV Model Using the ILQ Method
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayate Ogura, Sayaka Kanata, and Takashi Shimomura
2. 発表標題 PD Gain Setting on Spacecraft Attitude Control Not to Cause Oscillatory Responses
3. 学会等名 Proc. of SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田 湧也, 下村 卓, 金田 さやか
2. 発表標題 LPV制御理論による宇宙往還機の軌道設計と誘導制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 駿介, 阿戸 太志, 金田 さやか, 中西 弘明, 下村 卓
2. 発表標題 quadrotorヘリコプタのための地面付近の推力モデルの構築
3. 学会等名 第56回日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿戸 太志, 伊藤 駿介, 金田 さやか, 中西 弘明, 下村 卓
2. 発表標題 quadrotorヘリコプタのための天井付近の推力モデルの構築
3. 学会等名 第56回日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西 弘明, 金田 さやか
2. 発表標題 ロータ空力特性における天井壁効果
3. 学会等名 第20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 2019年

1. 発表者名 Shinsuke Sakamoto, T. Shimomura, and Sayaka Kanata
2. 発表標題 Feedback Loop Reduction on an LMI-Based Controller for a Large Antenna Servo System
3. 学会等名 SICE 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊澤良哉, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 センサ情報に基づく階層化制御システムの提案
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 2018年

1. 発表者名 小倉 颯, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 宇宙機のPD制御系におけるゲイン決定法: 振動現象の解明とその対策
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須谷和也, 下村卓, 金田さやか
2. 発表標題 LPV制御理論による電気飛行機の世界速度制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西 大樹, 金田さやか, 下村 卓
2. 発表標題 柔軟構造をもつ宇宙機のInput Shaping を用いた姿勢制御
3. 学会等名 日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下 英暉, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 自律型無人ヘリコプタのためのQuaternionによる姿勢推定の精度検証
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊澤良哉, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 センサ情報に基づく階層化制御システムの提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Ito, T. Ado, S. Kanata, H. Nakanishi, and T. Shimomura
2. 発表標題 Analysis of Aerodynamic Characteristics near the Ground for a Quadrotor Helicopter
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ogura, S. Kanata, and T. Shimomura
2. 発表標題 Attitude Control of a Spacecraft with Control Moment Gyros Using the Inverse Linear Quadratic Method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Hayashida, S. Kanata, and T. Shimomura
2. 発表標題 Experimental Verification of Attitude Control of a Spacecraft with Double-Gimbal Variable-Speed Control Moment Gyro
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林田風汰, 金田さやか, 下村 卓
2. 発表標題 DGVSCMG搭載宇宙機の垂直軸まわりの姿勢制御を想定した実験的検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大林宏次郎, 金田さやか, 下村 卓
2. 発表標題 センサベースト階層化制御のQuadrotor Helicopter への適用
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山綾菜, 阿部光輝, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 柔軟構造をもつ宇宙機の1次, 2次モードの制振を考慮した姿勢制御
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田真伸, 金田さやか, 下村 卓
2. 発表標題 LPV制御理論を用いた電気飛行機の世界速度制御 - 2種類のアプローチによるLPVモデル化 -
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤峻弘, 金田さやか, 下村卓
2. 発表標題 パラメータ依存基底変換を用いた宇宙機姿勢制御系の安定解析
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪府立大学工学研究科航空宇宙工学分野制御グループHP
<http://www.aero.osakafu-u.ac.jp/as/shimomura/>

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