

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360105

研究課題名(和文) 環境適応・環境構造可変機能をもつ超冗長機械システム群のダイナミクスベースト知能

研究課題名(英文) Dynamics Based Intelligence of Redundant Swarm Mechanical Systems with Adaptability

研究代表者

松野 文俊 (MATSUNO, FUMITOSHI)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00190489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ダイナミクスベースト・インテリジェンスの概念を“個から群れへ”と拡張することを目的とし、以下の4項目に関して考察を行った。(1). 生物の蛇のもつサイナスリフティング滑走・サイドワインディング滑走およびヘビ型ロボットのジャンプを実現する制御系設計を行った。(2). 強化学習PI2を適用して3脚モジュラーロボットが移動するための行動獲得を行った。(3). ロボット群の移動タスクについて、近傍のロボットと障害物の識別を必要としない自律分散制御アルゴリズムを構築した。(4). 蟻の利他行動である穴埋め行動モデルを偏微分方程式により導出し、群知能について考察した。

研究成果の概要(英文)：In this study dynamics based intelligence of redundant swarm mechanical systems with adaptability is considered. Dynamics is essential to intelligence of action of living things. The objective of this study is extension of concept of dynamics based control of individual to that of swarm. We consider following 4 main topics. (1). Hybrid system with changeable constraints: Sinus-lifting and side-winding motions of a living snake and a jumping function of a snake-like robot are considered. (2). Modular robot systems with function of changeable structure: Moving strategies of one unit of three-legged modular robot are generated by the learning method PI2. (3). Decentralized control of swarm robots: Decentralized control of multiple mobile robots using only local sensing information is designed. (4). Analysis of altruistic behavior of ants: By using simulators based on a PDE model effectiveness of the plugging behavior as an altruistic behavior is analyzed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：可変拘束機能 可変構造機能 環境構造可変機能 超冗長機械システム群 ダイナミクスベースト制御
群制御 群知能

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は制御対象が非線形で無限次元のような複雑なシステムであってもその物理的本質を突いた制御系設計を行えば、ロバストで簡便な制御則が導出できること示し、その概念をダイナミクスベース制御として提唱してきた。また、ダイナミクスベース制御を前提とした生物の運動知能獲得手法として、冗長性をうまく拘束し、その拘束条件を動的に変化させて、膨大な全探索空間を限定し探索空間を動的に生成する学習アルゴリズムを開発してきた。このような物理法則にかなった生物の運動知能である「ダイナミクスベース・インテリジェンス」について考察を行ってきた。

多くの生物は接地脚と遊脚を変化させ拘束条件を切り替えながら歩行しており、可変拘束システムと考えることができる。生物は多くの冗長自由度を持っており、その冗長性をうまく活かして巧みな技を実現している。さらに、蟻などの社会性昆虫は単体では成し得ないタスクを各個体が協調することにより達成する。例えば、単体の蟻が大きな餌を見つけた場合、フェロモンを環境に敷設し、フェロモントレールを用いて他個体を誘引し、他個体と結合することにより群れとしての構造を変化させながら協調運搬を実現する。また、環境中の穴や溝を一部の蟻が犠牲となって自らの身体で塞ぎあるいは橋を架け、他の蟻が速度を落とさず通過できるようにすることで採餌効率を上げる行動が発見されている。この行動は本研究で扱う、自らが環境を改造して自らの群に適した環境へと変化させる機能（環境構造可変機能）により達成されていると考えている。研究代表者は生物の運動知能の根源は地球環境で学習により培われた行動戦略にあり、環境との相互作用の結果として「生物の運動知能は身体に備わる」と考えている。

冗長性をもつ生物システムのダイナミクスは冗長機械システムの力学系として表現することができ、システムの固有の力学的本質を突いたダイナミクスベース制御を適用することができる。これはシステムのもつ非線形特性を踏まえた上で、その力学的特質を利用して制御系を構成しようとするものであり、イリノイ大学のスポング、立命館大学の有本、大阪大学の須賀、研究代表者(松野)が積極的に研究している。

2. 研究の目的

本研究では、環境に適応する機能（可変拘束・可変構造機能）をもつ個体が群れを成し、自らが環境を改造して群れに適した環境へと変化させる機能（環境構造可変機能）をもつ超冗長機械システム群の運動知能および群知能について考える。本研究では、生物を拘束条件を変えられることができる可変拘束機能と、それらが相互に結合・分離するような可変構造機能をもつ超冗長システムとしてとらえる。まず、個体での物理法則にかなったダイナミクスベース制御を前提とした運動知能について考察する。さらに、群として環境に適応するだけでなく、自らに適応するように環境を改造する群制御・群知能について考察し、「ダイナミクスベース・インテリジェンス」の概念の適用範囲を“個から群れへ”“環境適応から環境改造へ”と拡張することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 可変拘束ハイブリッドシステム

蛇のサイドワインディング滑走・サイナスリフティング滑走、木登り・ジャンプタスクなどの運動を実現するダイナミクスベース制御系の構築を行い、シミュレーションによりその有効性を検証する。

(2) 可変構造群システム

モジュラー脚ロボットの環境に適した最適構造生成アルゴリズム、任意の脚数脚配置

に対応できる歩容生成アルゴリズムの構築を行い、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を検証する。

(3) 可変拘束・可変構造群システム

移動ロボット群の移動に関する、分散制御則を構築し、その有効性をシミュレーションにより検証する。

(4) 環境構造可変群システム

蟻の採餌における利他行動である穴埋め行動の数理モデルの構築とシミュレーションによる行動の解析を行う。

4. 研究成果

(1) 可変拘束ハイブリッドシステム

可変拘束機能をもつ生物として蛇を対象とする。生物の蛇は体幹方向の摩擦は非常に小さく体幹に垂直な方向の摩擦は非常に大きい。この摩擦特性を工学的に実現するために受動車輪をそれぞれのリンクに取り付け、リンクを能動関節で多連結することによってヘビ型ロボットが実現されている。2台のヘビ型ロボットの協調制御のような幾何的な拘束条件をもつ超冗長機械システムに関する研究成果を拡張させ、サイナスリフティング滑走・サイドワインディング滑走のような速度制約条件を適応的に変化させるような運動を実現するダイナミクススペースト制御系を構築した。また、環境との相互作用を巧みに制御しなければ達成できないジャンプタスクに対して、その運動を実現するダイナミクススペースト制御系を構築した。ダイナミクススペースト制御系の有効性をシミュレーションにより検証した。

(2) 可変構造群システム

3脚モジュラーロボットを対象として、モジュールを結合・分離・再結合し、適応的に構造を変化させ、タスクを実現していく運動知能に着目した。まず、1体の3脚モジュラーロボットが移動するための行動獲得を強化学習の一種であるPI2を適用して行った。得られた歩容の有効性をシミュレーションにより検証した。

(3) 可変拘束・可変構造群システム

ロボット群の移動タスクについて考察し、近傍のロボットと障害物の識別を必要としない移動ロボット群の自律分散制御アルゴリズムを構築し、その収束性を数学的に示した。また、提案した分散制御則の有効性をシミュレーションと8台の移動ロボットを用いた実機実験により検証した。

(4) 環境構造可変群システム

蟻の採餌において自らが犠牲になり、群れ全体の採餌効率を向上させる穴埋め行動のマクロモデルを偏微分方程式により構築し、ミクロモデルをマルチエージェントシステムにより構築した。マクロモデルとミクロモデルに基づいたシミュレータのそれぞれのシミュレーション結果がほぼ等しいことを確認し、モデルの妥当性を示した。また、シミュレータの種々のパラメータを変化させることにより、群れが環境の構造を改造する知能について考察した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計11件)

松野文俊, 花本惣平, アリの行動シミュレータ構築と生態の理解, 計測と制御, 査読無, Vol. 52, No. 3, pp. 227-233, 2013

DOI/URL: なし

H. Fukushima, M. Kakue, K. Kon, and F. Matsuno, Transformation Control to an Inverted Pendulum for a Mobile Robot With Wheel-Arms Using Partial Linearization and Polytopic Model Set, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol. 29, No. 3, pp. 774-783, 2013
DOI: 10.1109/TR0.2013.2239555

坂井大斗, 福島宏明, 松野文俊, 近傍のロボットと障害物の識別を必要としない移動ロボット群の制御アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 8, pp. 787-794, 2013
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/sicetr/49/8/_contents/-char/ja/

H. Fukushima, K. Kon, and F. Matsuno, Model Predictive Formation Control Using Branch-and-Bound Compatible With Collision Avoidance Problems, IEEE Transactions on Robotics, 査読

有, Vol. 29, No. 5, pp. 1308-1317, 2013
DOI:10.1109/TRO.2013.2262751
S. Toyoshima, M. Tanaka, and F. Matsuno, A Study on Sinus-Lifting Motion of a Snake Robot With Sequential Optimization of a Hybrid System, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 査読有, Vol. 11, No. 1, pp.139--144, 2013
DOI: 10.1109/TASE.2013.2273356
有泉亮, 福島宏明, 松野文俊, 速度履歴に基づくねじ推進ヘビ型ロボットの先頭追従制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 30, No. 5, pp. 552 - 559, 2012
DOI: 10.7210/jrsj.30.552
H. Fukushima, S. Satomura, T. Kawai, M. Tanaka, T. Kamegawa, and F. Matsuno, Modeling and Control of a Snake-Like Robot Using the Screw-Drive Mechanism, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol. 28, No. 3, pp. 541-554, 2012
DOI: 10.1109/TRO.2012.2183050
田中基康, 塚野洋章, 松野文俊, 円柱曲面上におけるヘビ型ロボットの滑落回避を考慮した軌道追従制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 48, No. 10, pp.664-673, 2012
DOI:10.9746/sicetr.48.664
Tae Hyon Kim, Kiyohiro Goto, Hiroki Igarashi, Kazuyuki Kon, Noritaka Sato and Fumitoshi Matsuno, Path planning for an autonomous mobile robot considering a region with a velocity constraint in a real environment, ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 査読有, Vol.16-4, pp.514-518,2012
DOI:10.1007/s10015.011-0988-x
福島宏明, 新村諭, 松野文俊, 車輪アームをもつ形態可変ロボットの部分線形化による倒立制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.29-6, pp. 554-561,2011
DOI : 10.7210/jrsj.29.554
Tetsushi Kamegawa, Noritaka Sato, Michinori Hatayama, Yojiro Uo, and Fumitoshi Matsuno, Design and Implementation of Grouped Rescue Robot System Using Self-Deploy Networks, J. Field Robotics, 査読有, Vol.28-6, pp. 813-816, 2011
DOI: 10.1002/rob.20413

[学会発表](計25件)

有泉亮, Matthew Tesch, Howie Choset, 松野文俊, 入力依存ノイズを考慮した応答曲面法に基づく移動ロボットの多目的最適化, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 3月4日-7日, 電気通信大学(東京都調布市),

2014
吉本 昌弘, 根 和幸, 松野 文俊, 未知障害物のある環境における複数ロボットによる移動体の協調追込み, 第14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, 12月18日-20日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013
小川 雄一, 土畑 重人, 松野 文俊, 休息を始める探索アリの割合がコロニーの生存性に与える影響の考察, 第14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, 12月18日-20日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013
Yuichi Ogawa, Shigeto Dobata, and Fumitoshi Matsuno, Relationship between survivability of ant colony and rate of state transition to rest, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 12月15日-17日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013
Ryuta Yamasaki, Yuichi Ambe, Shinya Aoi and Fumitoshi Matsuno, Quadrupedal Bounding with Spring-damper Body Joint, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 11月4日-6日, 東京ビッグサイト(東京都江頭区), 2013
Yuichi Ambe, Timo Nachstedt, Poramate Manoonpong, Florentin Wörgötter, Shinya Aoi and Fumitoshi Matsuno, Stability Analysis of a Hexapod Robot Driven by Distributed Nonlinear Oscillators with a Phase Modulation Mechanism, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 11月4日-6日, 東京ビッグサイト(東京都江頭区), 2013
小川雄一, 土畑重人, 松野文俊, アリが巢内のグローバル情報を推測し行動を変化させている可能性に関する考察, 第23回日本数理生物学会年会, 9月11日-13日, 静岡大学浜松キャンパス(静岡県浜松市), 2013
松野文俊, 『守破離』 - ロボットの運動知能 -, 体育会系ロボット学シンポジウム, 5月21日, 株式会社内田洋行 新川本社ユビキタス協創広場 CANVAS (東京都中央区), 2013
Timo Nachstedt, Florentin Worg, Poramate Manoonpong, Ryo Ariizumi, Yuichi Ambe, and Fumitoshi Matsuno, Adaptive Neural Oscillators with Synaptic Plasticity for Locomotion Control of a Snake-Like Robot with Screw-Drive Mechanism, IEEE Int. Conf on Robotics and Automation (ICRA), May7-9, Kongresszentrum Karlsruhe

(Germany), 2013
 Ryo Ariizumi, and Fumitoshi Matsuno,
 Dynamical Analysis of Sidewinding
 Locomotion by a Snake-Like Robot, IEEE
 Int. Conf on Robotics and Automation,
 (ICRA), May7-9, Kongresszentrum
 Karlsruhe (Germany), 2013
 Yuichi Ogawa, Sohei Hanamoto, Kazuki
 Tsuji and Fumitoshi Matsuno,
 Influence of food density on colony
 size of Pogonomyrmex barbatus,
 IEEE/SICE International Symposium on
 System Integration (SII), 12月16日
 -18日, 九州大学医学部 (福岡県福岡
 市), 2012
 花本惣平, 松野文俊, マクロモデルによる
 ゲンタイアリの行動シミュレータ構
 築と利他行動の解析, 第13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, 12月17日-20日, 福岡国
 際会議場 (福岡県), 2012
 小川雄一, 花本惣平, 辻和希, 松野文俊,
 アリの行動モデルの構築と餌の密度が
 コロニーサイズに与える影響の考察,
 第13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, 12月17日
 -20日, 福岡国際会議場 (福岡県),
 2012
 三浦裕介, 花本惣平, 松野文俊, アリの
 行動モデル構築と分業における群の適
 応的振る舞いに関する考察, 第55回自
 動制御連合講演会, 11月17日-11月18
 日, 京都大学(京都府), 2012
 Yuichi Ambe and Fumitoshi Matsuno,
 Leg-Grope-Walk - Walking Strategy on
 Weak and Irregular Slopes for a
 Quadruped Robot by Force Distribution,
 IEEE/RSJ International Conference on
 Intelligent Robots and Systems
 (IROS2012), Oct.7-12, TIVOLI MARINA
 VILAMOURA (Faro, Portuguese), 2012
 Toyoshima Satoshi and Fumitoshi
 Matsuno, A Study on Sinus-lifting
 Motion of a Snake Robot with Energetic
 Efficiency, IEEE Int. Conf on Robotics
 and Automation (ICRA), May15-17,
 River Center(Minneapolis, America),
 2012
 豊島 聡, 松野 文俊, ヘビ型ロボットの
 エネルギー効率に基づく
 Sinus-lifting滑走に関する考察, 第12
 回公益社団法人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, 12
 月23日-25日, 京都大学 (京都市),
 2011
 三浦 裕介, 花本 惣平, 松野 文俊, ア
 リの行動モデルの構築と群における分
 業の有効性の検証, 第12回公益社団法
 人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, 12月23日-25

日, 京都大学 (京都市), 2011
 安部 祐一, 金 テヒョン, 山崎 隆太,
 豊島 聡, 花本 惣平, 松野 文俊, 足場
 が脆弱な傾斜環境における4脚ロボットの
 歩行方法, 第12回公益社団法人計測
 自動制御学会システムインテグレーシ
 ョン部門講演会, 12月23日-25日, 京
 都大学 (京都市), 2011

- ⑲ Ryusuke Fujisawa, Yusuke Shimizu and
Fumitoshi Matsuno, Effectiveness of
 Tuning of Pheromone Trail Lifetime in
 Attraction of Robot Swarm, IEEE/SICE
 International Symposium on System
 Integration (SII), 12月20日-22日,
 京都大学 (京都市), 2011
- ⑳ Sohei Hanamoto and Fumitoshi Matsuno,
 Foraging Effectiveness of the
 Altruistic Plugging Behavior of the
 Army Ants, IEEE/SICE International
 Symposium on System Integration (SII),
 12月20日-22日, 京都大学 (京都市),
 2011
- ㉑ Ryo Ariizumi, Hiroaki Fukushima, and
Fumitoshi Matsuno,
 Front-Unit-Following Control of a
 Snake-like Robot Using Screw Drive
 Mechanism Based on Past Velocity
 Commands, IEEE/RSJ International
 Conference on Intelligent Robots and
 Systems (IROS), Sep.26-29, Hilton San
 Francisco, (San Francisco, America),
 2011
- ㉒ 渡辺雄介, 福島宏明, 松野文俊, 部分線
 形化とポリトープ型モデル集合に基づ
 く形態可変車輪型ロボットの倒立制御,
 第55回システム制御情報学会研究発表
 講演会, 5月19日, 大阪大学コンベンシ
 ョンセンター (大阪府吹田市), 2011
- ㉓ Hiroaki Fukushima, Satoru Shinmura
 and Fumitoshi Matsuno, Transformation
 Control to an Inverted Pendulum Mode
 of a Mobile Robot with Wheel-Arms
 Using Partial Linearization. IEEE Int.
 Conf. on Robotics and Automation
 (ICRA), May9-13, Shanghai
 International Convention center,
 (Shanghai, China), 2011

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
 出願状況(計 0件)
 取得状況(計 0件)

〔その他〕 なし

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 松野 文俊 (MATSUNO FUMITOSHI)
 京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00190489