

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686040

研究課題名（和文） 周期行動と内部状態の共振から創発される行動制御

 研究課題名（英文） Behavior control by resonance of
periodic behavior and an internal state.

研究代表者

手老 篤史（TERO ATSUSHI）

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所

研究者番号：60431326

研究成果の概要（和文）：

四脚動物やゾウリムシの行う周期的な行動と内部状態についての数理モデルを作成し、数値計算を行った。その結果、四脚動物の歩容遷移については減衰振動子を仮定することにより、再現可能であることがわかった。この減衰振動子は神経振動子でも再現可能であるが、物理的な相互作用のみでも創発可能である。この結果を基に東北大学石黒章夫研究室にて、物理的な相互作用のみで自発的にウォーク・トロットの歩容遷移を行うロボットの作成を行った。また、ゾウリムシの容器形状記憶実験については数理モデルを構築した。現在は、はこだて未来大学中垣俊之研究室において実験を行ってもらい、実際の生物との相関性を調べている。

研究成果の概要（英文）：

I made mathematical model of periodical behavior and internal state of quadruped leg animal and paramecium. The gait transition of quadruped leg animal is reproduced by assuming damped oscillator. This damped oscillators are made by physical interaction. By this results the robot which can change their gait pattern with only physical interaction is made in Ishiguro Akio's Laboratory (Tohoku Univ.) We made mathematical model for the experiment in which paramecium can remember vessel shape. Now the mathematical model is compared with real paramecium by the experiment in Toshiyuki Nakagaki's Laboratory(Hakodate Future Univ.)

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：応用数学、制御工学、認知科学

1. 研究開始当初の背景

生物は呼吸・脈拍のような短い周期のリズムから概日リズムのような長い周期のリズムまで体内に様々なリズムを持っている。このように自動的に表にあらわれるリズムに対しては多くの研究がなされている。

一方、生物の内部には通常では発現しない隠れたリズムが多数存在する。我々は単細胞生物がこの隠れたリズムを用いて記憶や予想といった高度なタスクを遂行するという事を発見した。例えば真正粘菌変形体は脳機能を持たない単細胞生物であるが粘菌にとって悪い刺激を周期的に与えると次のタイミングを予想して行動を抑制したり、しばらく時間が経った後に刺激を与えると昔のタイミングを思い出して行動を抑制したりするのである。これは外部から周期刺激を与えられると隠れたリズムが発現し、それによって脳を持たない単細胞生物であっても予測や記憶・想起といった知的活動を行う事ができるというものである。それでは、この隠れたリズムとは実際には何なのであろうか。例えば生物内部で安定な平衡点に落ち着く n 個の化学物質に対し、平衡点からのずれを $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^t$ と置く。この時、これらの化学物質は生物の体内で相互に影響を及ぼすため $\mathbf{x}'=\mathbf{f}(\mathbf{x})$ の形で表記できる。単純化のために \mathbf{x} の成分が小さいと仮定すると平衡点のまわりで $\mathbf{x}'=\mathbf{A}\mathbf{x}$ というように線形の微分方程式で書く事ができる。生物内は多数の化学物質が相互作用している為、 n は十分大きい数であり、行列 \mathbf{A} は一般の場合、多くの虚数固有値を持つ。(この時、平衡点に落ち着く事を仮定しているため、実部は負である。) このような虚数固有値に対応する固有空間上の点は振動しながら最終的には平衡点に

落ち着く。いわば、振り子が揺れながら最終的には停止するような振る舞いをする。一方で生物は様々な周期的な動作をする。例えば四足歩行動物はウォーク・トロット・ギャロップというように走行速度によって歩容を変更するが、それらはどれも周期的な動作である。現在の数理モデルは足にのみ着目するものが多く、体の状態に着目するものは稀であった。

2. 研究の目的

本研究は生物の内部状態と周期運動の共振現象に着目したモデルを用い、研究を推進する。下に記すように幾つかの基本的なアイデア・数理モデルは申請の時点である程度できていた。これを用い予備研究として円運動という単一の周期運動を単一な内部リズムと共振させた行動制御の例としてホヤの精子の研究を推進する。次にそれぞれの時間における運動のリズムは単一だが複数ある内部リズムのどれと共振するかで行動が制御される例として四足動物の歩容遷移を題材とする。最終的には運動と内部状態の両方のリズム数が複数であるゾウリムシの形状記憶について研究を行う。

3. 研究の方法

前述のとおり、本研究を推進する上での初歩的なモデル方程式は既にある。ここではまずこの数理モデルについて説明を行う。

・四足動物の歩容

四足動物は歩行・走行の速度によってその歩容をウォーク・トロット・ギャロップというように変化させる。これに対し、共振という観点から数理モデルをたて、シミュレーションを行った。ここでは、重心の左右のぶれ・腰の捻り・背骨の屈折の3つ

の内部状態を仮定した。また、走行速度が変化する為、足の角速度を変数とした。すると、足の運動が重心の左右のぶれと共振した場合はペースに、腰の捻りと共振した場合はトロットに、背骨の屈折と共振した場合はバウンドの歩容が自発的に選択された。

このように足の運動の周期に対し、3つの内部状態の1つが共振する。(ここでは、ペース・トロット・バウンドの歩容を同時に満たすことができないという理由から1つのモードが選ばれる。また、モデルを改善し、2つの内部リズムを同時に共振させる事によりウォークも確認できた。)このようにして共振現象が歩容遷移を引き起こす事が数値計算により確認された。

・ゾウリムシの形状記憶

1935年に **Fritz Bramstedt** によってゾウリムシが自身が入れている容器の形状を記憶するという興味深い実験が行われた。この実験の手順は以下のとおりである。まず、ゾウリムシをそれぞれ円形・三角形・四角形のどれか1つの容器に入れて約2時間程度飼育する。次に別な容器に移し、その移動軌跡をトレースすると元の容器の形状を覚えている動きをするというものである。しかし脳を持たない単細胞生物であるゾウリムシが何故このような振る舞いをするのか、そしてできるのか、これまで全く予想すらされてこなかった。これに対し、私はこの多重リズムという観点からアプローチをする。ゾウリムシの動きは一見ランダムウォークに見えるが、武者利光氏らを代表する多くの研究者によって「 $1/f$ ゆらぎ」を持っている事がこれまでの研究からわかっている。すなわち、ゾウリムシはさまざまなリズムを内包しているのである。これまで説明したとおり運動から引き起こ

される周期刺激の1つの振動数に対して、近い振動数を持つ内部状態の振動子が共振する。加えて、2つ以上の周期刺激が混ざっていた場合でも、三角関数の一次独立性からそれぞれ独立に共振がおこる。この事からわかるように与えられた刺激は共振によりフーリエ級数として線形空間に記憶する事ができる。すなわちゾウリムシが容器の壁からの刺激を記憶し、容器の形状のとおりに動くのである。

4. 研究成果

この結果を基に一般的な固有モードに対しての数理モデルに改良することにより、より複雑な構造に対しても理解が可能となった。これらの理論を基に東北大学石黒章夫研究室との共同研究で脚間の神経相互作用の無いロボットの製作を開始し、安定したウォーク歩行、荷重による **Lateral-sequence walk** と **Diagonal-sequence walk** の切り替え、ウォーク・トロット間の歩容遷移が実機にて確認できた。また、ゾウリムシの容器形状記憶についての数値計算を行った。本研究は1935年に **Fritz Bramstedt** が行った、ゾウリムシが容器の形状を記憶するという実験に基づいている。だが、本論文では詳しいデータが少ないため、はこだて未来大学中垣俊之教授の研究室にてテトラヒメラによる追実験を開始し、それと共に数理モデルの改善を行っているところである。

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3件)

①An Oscillator Model That Enables Motion Stabilization and Motion Exploration by Exploiting Multi-Rhythmicity, Dai Owaki, Satoshi Ishida, Atsushi Tero, Kentaro Ito, Koh Nagasawa, Akio Ishiguro, Advanced

Robotics, Volume 25, Numbers 9-10
"Advanced Robotics,
DOI:10.1163/016918611X574650"

② Simple robot suggests physical interlimb communication is essential for quadruped walking Dai Owaki, Takeshi Kano, Ko Nagasawa, Atsushi Tero, and Akio Ishiguro Interface J. R. Soc. 2012/10/24 doi:10.1098/rsif.2012.0669

③ Current-reinforced random walks for constructing transport networks Qi Ma, Anders Johansson, Atsushi Tero, Toshiyuki Nakagaki and David J. T. Sumpter Interface 2013/3/6 doi: 10.1098/rsif.2012.0864, Interface 6 March 2013 vol. 10 no. 80 20120864

〔学会発表〕(計1件)

共振現象から創発する行動制御 手老篤史
研究会・シンポジウム・ワークショップ 日本機械学会ロボメカ部門東北支部特別講演会 2010/11/19 口頭発表
東北大学工学研究科(青葉山キャンパス)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

手老 篤史 (TERO ATSUSHI)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研
究所・准教授

研究者番号: 60431326

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: