

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 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21760210

研究課題名（和文） 柔軟体の変形を積極的に利用する移動機構の巧みさの解明

研究課題名（英文） Locomotion Mechanism Driven by the Body Deformation

研究代表者

柴田 瑞穂 (SHIBATA MIZUHO)

近畿大学・工学部・講師

研究者番号：70454519

研究成果の概要（和文）：

柔軟体の変形を積極的に利用する移動機構の巧みさを解明するために、ロボット本体にテンセグリティ構造体を、アクチュエータとして形状記憶合金および空気圧人工筋を使用した構造体を提案した。正二十面体型テンセグリティの本体を変形させることで、転がり移動が実現されることが分かった。また、結晶学の知見を応用し、正二十面体型テンセグリティの接地面を分類する手法を確立した。これは、移動形態を記述する際に利用される。

研究成果の概要（英文）：

I proposed a tensegrity locomotion robot driven by shape memory alloy or pneumatic actuators in order to investigate how locomotion robots apply the body deformation. I realized a successive rolling motion of a regular icosahedral tensegrity structure utilizing the body deformation. I also described the movement strategies using a notation method based on knowledge of crystallography.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

外殻変形を利用した移動ロボットに関する研究は、従来、ヘビ型ロボット、魚型ロボットに代表される外殻と環境の力学的相互作用を利用するものが主流であった。その中、

柔軟体のポテンシャルエネルギーを使用した新たな外殻変形移動機構の開発および解析が、日本人研究者によって目覚ましい発展を遂げた。平井らおよび望山らは、外殻にばね鋼を使用した外殻変形移動ロボットの提案

および解析を行った。これらのロボットでは、柔軟体の持つ重力ポテンシャルや曲げポテンシャルエネルギーを利用することで、転がり移動、跳躍移動を実現している。彼らの研究から、柔軟体の持つ特性を積極的に利用する移動機構の巧みさが明らかになりつつあった。一方、テンセグリティと呼ばれる張力構造体を利用する移動機構に関する研究がなされている。テンセグリティ構造とは、不連続な圧縮材と連続する張力材で構成され、各部材が有効に機能して剛形態をつくるような骨格構造のことをいう。Paulらは、この構造の持つ、単位空間あたりの自重を小さく構成できるという特徴に着目し、歩行型の移動ロボットを実現している。彼らの研究成果は移動機構に新たな地平を築くものと評され、世界的に高い評価を得ている。本研究では、これら2つの研究領域を融合した。すなわち、テンセグリティ構造体によってポテンシャルエネルギーを利用した外殻変形移動を実現することで、柔軟体の変形を積極的に利用する移動機構の巧みさが明らかになると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、柔軟体の変形を積極的に利用する移動機構の巧みさを明らかにすることである。近年、柔軟体のポテンシャルエネルギーを使用した新たな外殻変形移動機構の研究がはじまり、柔軟体の持つ特性を積極的に利用する移動機構の巧みさが明らかになりつつある。物質の持つポテンシャルエネルギーを利用することで、効率のよい移動が実現できると考えられるが、従来のポテンシャルエネルギーを利用した移動ロボットでは、本体の剛性とサイズを独立に選定することができなかった。本研究では、テンセグリティ構造を利用してこれを解決する。テンセグリティ構造は、複数の圧縮材と張力材から構成されており、全体の剛性が張力材によって決定されるため、同じ剛性を維持しながら軽量化することが可能となる。本研究では、テンセグリティ構造体によってポテンシャルエネルギーを利用した外殻変形移動ロボットを実現し、移動過程におけるポテンシャルエネルギーの推移および運動解析を通して、柔軟体の変形を積極的に利用する移動機構の巧みさを明らかにする。

3. 研究の方法

テンセグリティ構造体による外殻変形を利用した転がりの実現および静力学的な解析手法を確立するために、以下の課題を実施した。

- ・テンセグリティ構造体の外殻変形による転がりの実験的検討

- ・テンセグリティ構造体の外殻変形による移動形態の分類
- ・テンセグリティ構造体の転がりに対する静力学的解析

実験・解析結果から、外殻変形を利用する移動機構の移動戦略についての知見を得る。次に、テンセグリティ構造体による外殻変形を利用した移動機構に対する動力学的な解析手法を確立するために、以下の課題を遂行した。

- ・テンセグリティ構造体のモデル化
- ・連続転がり移動の実現

実験・解析結果から、外殻変形を利用する移動機構の変形方法についての知見を得る。

4. 研究成果

圧縮材を6本有するテンセグリティ構造体は、圧縮材と接地面の関係から、2種類の接地状態に分類可能である。テンセグリティ構造体を多面体構造に見立てて、接地面を分類することを試みた。結晶学の知見に基づき、テンセグリティ構造体の接地状態をミラー指数で表現した。図1にその表現例を示す。これらの数字は、多面体の幾何的な配置によって決定される。

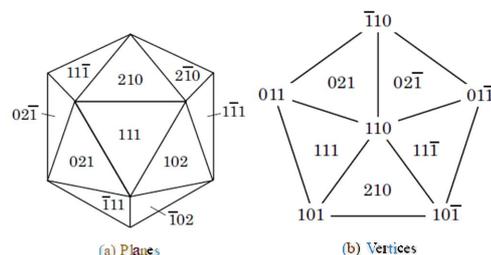


図1 ミラー指数による接地面の表現

この分類は多面体移動ロボットの移動遷移の表現に使用できることが示唆された。図2に正二十面体での分類を示す。圧縮材と接地面の関係から、2パターンに分類できることが分かった。

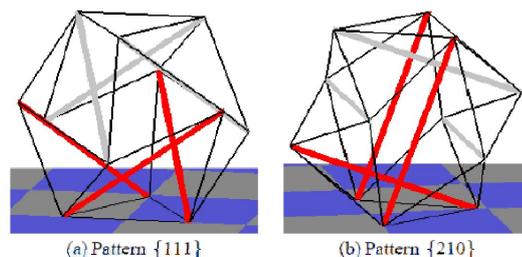


図2 正二十面体型テンセグリティの接地面

分類した移動形態に基づいて、それぞれの移動遷移のしやすさをロボット全体の重力ポテンシャルエネルギーの推移から評価した。準正多面体構造などある種のテンセグリティ構造体では、他の接地面に比べて重力ポテンシャルの低い接地面が存在することが明らかになった。この事実は、転がり移動の際に、ポテンシャルの低い面で静止しやすいことを示唆している。したがって、移動ロボットの外殻の構造自体が移動戦略の決定に寄与すると考えられる。実機製作では、圧縮材6本を有する正二十面体型テンセグリティ移動ロボットおよび圧縮材を12本有する準正多面体型テンセグリティ移動ロボットを製作し、それぞれの構造体にて転がり移動が可能であることを実証している。図3に正二十面体テンセグリティの回転時における重力ポテンシャルの推移を示す。正二十面体構造の場合は、すべての接地面から同様の重力ポテンシャルの推移を示す。図4にねじれ立方体（ねじれ立方体は、準正多面体構造の一種である）の回転時における重力ポテンシャルの推移を示す。ねじれ立方体の接地面は3パターンに分類される。テンセグリティ構造の運動方程式をエネルギーの観点から検討した。テンセグリティロボットと平らな床との接触は、テンセグリティ

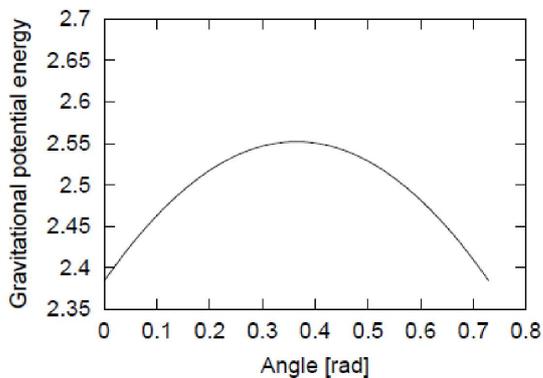


図3 正二十面体テンセグリティの回転時における重力ポテンシャルの推移

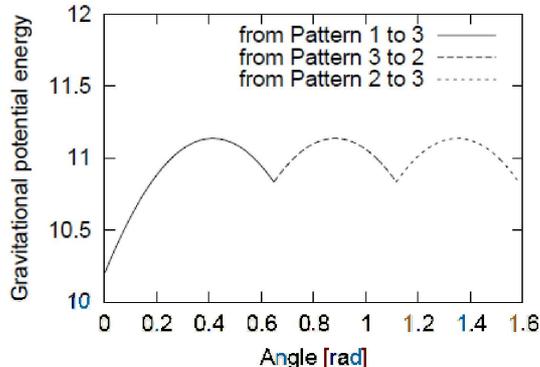


図4 ねじれ立方体の回転時における重力ポテンシャルの推移

ロボットに幾何学的制約を課すことを意味する。テンセグリティロボットの安定状態では、幾何学的制約を満たしテンセグリティの内部エネルギーが極小となる。すなわち、内部エネルギーに未定乗数と幾何学的制約との積を加えた関数の最小化により、安定状態を計算することができる。床面の法線に沿う幾何学的制約は単方向制約であり、垂直抗力に対応する未定乗数の値は非負でなくてはならない。ここで、テンセグリティ構造に何らかのアクチュエータで力を加えると、内部エネルギーに影響し、結果として未定乗数の値が変わる。垂直抗力に対応する未定乗数の値が負となると、その単方向制約は失われ、結果として接触が失われる。これにより安定状態から不安定な状態に遷移し、さらに別の安定状態に遷移する可能性が生じる。すなわち、安定状態から別の安定状態への遷移は、途中で不安定な状態と運動方程式に課せられる幾何学的制約の位相的な変化を含む。本年度では、完全な運動方程式の導出には至らなかった。しかしながら、導出への道筋は明らかになった。また、ロボット自体の大きさを拡大させるために、空気圧アクチュエータを利用した実機を製作した。この実機を利用して、転がりを実現するためにどれくらいの空気圧が必要であるかを実験的に調べ、一度の試行で面対称接触→軸対称接触→面対称接触が実現させる遷移が連続的な転がりに適切であることを示した。図5に空気圧アクチュエータにより駆動される正二十面体型テンセグリティ構造による連続的な転がりの様子を示す。

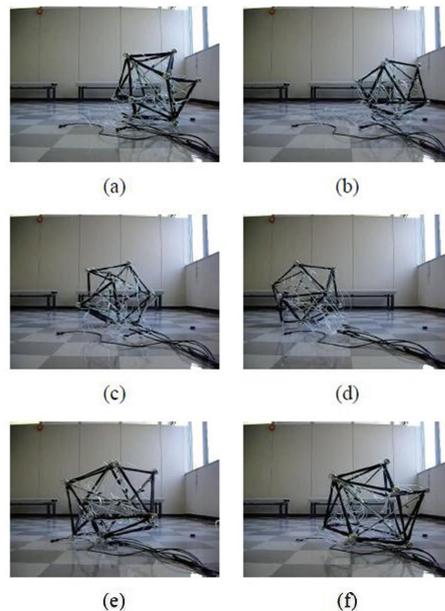


図5 空気圧アクチュエータにより駆動される正二十面体型テンセグリティ構造による連続的な転がり

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)

[学会発表] (計 8 件)

- 1) Yuusuke Koizumi, Mizuho Shibata, and Shinichi Hirai, “Rolling Tensegrity Driven by Pneumatic Soft Actuators”, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2012, accepted.
- 2) 小泉 佑介, 柴田瑞穂, 平井慎一, “マッペンアクチュエータにより駆動されるテンセグリティロボットの実験的評価”, 第 17 回ロボティクス・シンポジウム, 2012 年 3 月 15 日, 山口県 萩本陣
- 3) 小泉 佑介, 柴田瑞穂, 平井慎一, “テンセグリティロボットの連続転がりの評価”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011 年 9 月 8 日, 東京都 芝浦工業大学
- 4) Mizuho Shibata and Shinichi Hirai, “Moving Strategy of Tensegrity Robots with Semiregular Polyhedral Body”, International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines 2010, 2010 年 8 月 31 日, JAPAN, Nagoya Institute of Technology
- 5) 柴田瑞穂, 寺師和真, 仲瀬洗男, 平井慎一, “多面体移動ロボットの接地状態判定”, 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 2009, 2009 年 12 月 26 日, 東京都, 芝浦工業大学
- 6) 柴田瑞穂, 寺師和真, 仲瀬洗男, 平井慎一, “テンセグリティ型多面体ロボットの転がり移動”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 16 日, 神奈川県, 横浜国立大学
- 7) Mizuho Shibata and Shinichi Hirai, “Rolling Locomotion of Deformable Tensegrity Structure”, International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines 2009, 2009 年 9 月 10 日, トルコ, イスタンブール
- 8) Mizuho Shibata, Fumio Saijyo, Shinichi Hirai, “Crawling by Body Deformation of Tensegrity Structure Robots”, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009, 2009 年 5 月 16 日, 兵庫県, 神戸国際会議場

[その他]

ホームページ等

<http://greenapple.world.coocan.jp/school/work/tense/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 瑞穂 (SHIBATA MIZUHO)

近畿大学・工学部・講師

研究者番号：70454519

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：