

機関番号	研究種目番号	審査区分番号	細目番号	分割番号	整理番号
34315	11	-	5507		0003

平成25年度 (2013年度) 挑戦的萌芽研究 研究計画調書

平成 24 年 11 月 8 日
2 版

新規

研究種目	挑戦的萌芽研究						
分野	工学						
分科	機械工学						
細目	知能機械学・機械システム						
細目表 キーワード	ロボティクス						
細目表以外の キーワード	テンセグリティ						
研究代表者 氏名	(フリガナ)	ヒライ シンイチ					
	(漢字等)	平井 慎一					
所属研究機関	立命館大学						
部局	理工学部						
職	教授						
研究課題名	テンセグリティ構造の動的移動におけるダイナミクス						
研究経費 〔千円未満の 端数は切り 捨てる〕	年度	研究経費 (千円)	使用内訳(千円)				
			設備備品費	消耗品費	旅費	人件費・謝金	その他
	平成25年度	2,430	0	1,240	290	500	400
	平成26年度	2,460	0	1,120	290	500	550
	平成27年度	0	0	0	0	0	0
	総計	4,890	0	2,360	580	1,000	950
開示希望の有無	審査結果の開示を希望する						

研究目的

本欄には、研究の全体構想及びその中で本研究の具体的な目的について、冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述した上で、適宜文献を引用しつつ記述し、特に次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。(記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」(公募要領 66 頁参照)を参考にしてください。)

研究の学術的背景 (本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

当該分野における本研究の学術的な特色及び予想される結果と意義

研究目的 (概要) 当該研究計画の目的について、簡潔にまとめて記述してください。

本研究の目的は、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍におけるダイナミクスを、ハイブリッドシステムの観点から解析することである。テンセグリティ構造は、硬いストラットと柔らかい張力材から構成される構造であり、ストラットあるいは張力材の長さを能動的に制御することにより、転がり移動や跳躍を実現することができる。そこで、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍をエネルギーの観点から解析し、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍におけるダイナミクスを明らかにする。また、テンセグリティロボットの転がり移動や跳躍は、接触状態の離散的な遷移と各々の接触状態における連続的な運動方程式で表される。そこで、ハイブリッドシステムの観点からテンセグリティロボットのダイナミクスを明らかにする。

研究の学術的背景

現在、国内外で柔らかいロボットに関する研究が進められている。米国の Chemical Robots (ChemBots) プロジェクトでは、ボディの変形により隘路や障害物を通り抜けることができる機構が多数提案されている。国内では、弾性カタパルトや繊毛機構を用いて、柔らかいロボットを駆動させる研究が進められている。

応募者はこれまでに、弾性殻を有するソフトロボットによる転がり移動と跳躍[1]に関する研究を進め、その発展としてテンセグリティロボットを提案した[2]。前者は、弾性体のみから構成されており、その力学的解析が成されている。一方、後者は、複数の剛体とそれらを結合する弾性体から構成されており、離散的な状態遷移を含むそのダイナミクスには不明の点が多い。本研究の目的は、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍におけるダイナミクスを、ハイブリッドシステムの観点から明らかにすることである。

[1] Yuuta Sugiyama and Shinichi Hirai, Crawling and Jumping by a Deformable Robot, International Journal of Robotics Research, Vol.25, No.5-6, pp.603-620, May-June, 2006.

[2] Mizuho Shibata, Fumio Saijyo, and Shinichi Hirai, Crawling by Body Deformation of Tensegrity Structure Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4375-4380, Kobe, May 12-17, 2009.

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

本研究の目的は、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍におけるダイナミクスの解明である。テンセグリティ構造は、硬いストラットと柔らかい張力材から構成される構造であり、外力に対してしなやかに変形することができる。さらに、ストラットあるいは張力材の長さを能動的に制御することにより、転がり移動や跳躍を実現することができる。テンセグリティ構造を用いたこのような移動機構に関して研究を進めてきた結果、テンセグリティ構造が持つ弾性ポテンシャルエネルギーと重力ポテンシャルエネルギーが転がり移動と跳躍の双方に関して重要であるとの認識に至った。そこで本研究では、転がり移動と跳躍をエネルギーの観点から解析し、テンセグリティロボットのダイナミクスをハイブリッドシステムを用いて定式化する。

当該分野における本研究の学術的な特色及び予想される結果と意義

テンセグリティ構造は、建築学で提唱された概念であり、その静力学は確立している。また、境界条件が一定である建築構造物としてのダイナミクスも確立の域にある。本研究では、転がりや跳躍という、境界条件が動的に変化するダイナミクスを対象としており、本研究はロボティクスにおけるテンセグリティ構造の基盤を確立する意義を持つ。

研究機関名

立命館大学

研究代表者氏名

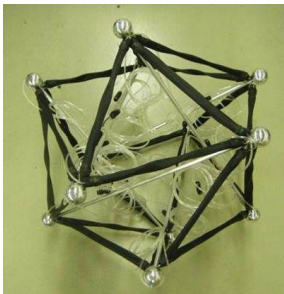
平井 慎一

研究の斬新性・チャレンジ性

本欄には、次の点について、焦点を絞り具体的かつ明確に記述してください。
 本研究が、どのような点で斬新なアイデアやチャレンジ性を有しているか
 本研究が、新しい原理の発展や斬新な着想や方法論の提案を行うものである点、または成功した場合に卓越した成果が期待できるものである点等

本研究が、どのような点で斬新なアイデアやチャレンジ性を有しているか

本研究の斬新な点は、ハイブリッドシステム概念を、転がり移動と跳躍が可能な移動ロボットのダイナミクスに導入し、制御系を構築する点にある。テンセグリティロボットの転がり移動では、接触面で規定される接触状態が離散的に遷移する。したがって、テンセグリティロボットの転がり移動は、接触状態の離散的な遷移と各々の接触状態における連続的な運動方程式で表される。また、テンセグリティロボットの跳躍は、跳躍前の状態から跳躍状態を経て、着地後に複数の接触状態を経由する過程とみなすことができる。複数の連続系が離散的な状態の遷移に応じてスイッチングするシステムは、ハイブリッドシステムとよばれ、様々な研究が成されている。ただし、システム理論的なアプローチでは、システムが与えられた後の解析が主であり、実際の物理システムに対してハイブリッドシステムをどのように構築するかが明確でない。本研究では、テンセグリティロボットという物理システムの転がり移動と跳躍を対象として、ハイブリッドシステムを構築し、それを基にテンセグリティロボットのダイナミクスを定式化する。



テンセグリティロボット



テンセグリティロボットの転がり移動

ハイブリッドシステム概念を実際の機械システムに適用するときの課題は、どのような状態遷移が生じるか、状態遷移が生じるための条件は何かを明らかにすることである。ソフトロボットの転がり移動と跳躍は、弾性ポテンシャルエネルギーと重力ポテンシャルエネルギーどうしのエネルギーフロー、ならびにロボットから環境に対する力積の観点から解析できることが判明している。ただし、テンセグリティロボットでは、従来のソフトロボットに比べると質量が大きく、運動エネルギーを無視できない。そこで本研究では、弾性ならびに重力ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーどうしのエネルギーフロー、ロボットから環境に対する力積の観点から、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍を解析し、ハイブリッドシステムにおける状態遷移を定式化する。

本研究が、新しい原理の発展や斬新な着想や方法論の提案を行うものである点、または成功した場合に卓越した成果が期待できるものである点等

本研究では、ダイナミクスが離散的に遷移する系のモデリングと遷移条件の同定を扱う。このようなハイブリッドシステムとしての定式化は、二足あるいは多足の歩行、物体の把持と持ち替えなどで議論されてきたが、対象とする歩行ロボットやハンドは剛体系として扱われてきた。本研究は、剛体とみなすことができるストラットと柔らかい張力材から構成されるテンセグリティ構造を対象としており、柔軟な要素を含む機械システム系をハイブリッドシステムとしてモデリングする新しい試みである。

本研究が成功した場合には、柔らかい皮膚を持つロボットによる歩行や把持、柔らかい構造を有する機械システムによるハンドリングなど、様々な応用が期待できる。

研究計画・方法

本欄には、研究目的を達成するための具体的な研究計画・方法について、冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述した上で、平成25年度の計画と平成26年度以降の計画に分けて、適宜文献を引用しつつ、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。また、研究計画を遂行するための研究体制について、研究分担者とともに行う研究計画である場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割（図表を用いる等）、学術的観点からの研究組織の必要性・妥当性及び研究目的との関連性についても述べてください。さらに、研究体制の全体像を明らかにするため、連携研究者及び研究協力者（海外共同研究者、科研費への応募資格を有しない企業の研究者、大学院生等（氏名、員数を記入することも可））の役割についても必要に応じて記述してください。なお、研究期間の途中で研究環境が大きく変わる場合は、研究実施場所の確保や研究実施方法等についても記述してください。

研究計画・方法（概要） 研究目的を達成するための研究計画・方法について、簡潔にまとめて記述してください。

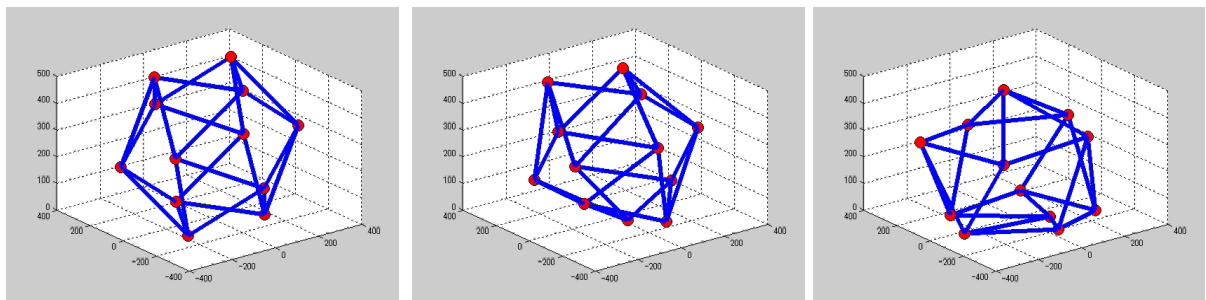
テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍における状態遷移を、制約安定化法を用いて定式化する。ストラットの先端は地面と点接触しホロノミック制約が作用する場合と、ストラットの両端が球面で非ホロノミック制約が作用する場合に関して状態遷移を定式化する。それぞれの場合において転がり移動や跳躍における状態遷移が生じる条件を明らかにする。これらの成果を基に、駆動方法が転がり移動や跳躍に与える影響を解析し、効率的な駆動方法を見出す。さらに、ハイブリッドシステムの観点から、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍を制御する。テンセグリティロボットの接触状態の識別を試みるとともに、状態遷移を実現するための条件を基に、張力材あるいはストラットを駆動する手法を提案する。シミュレーション結果と実験結果を比較し、モデリングや制御手法の妥当性を検証する。

平成25年度の計画

A. 制約安定化法を用いた転がり移動のモデリング

6本のストラットから構成される6ストラットテンセグリティロボットに関して、転がり移動を定式化する。簡単化のため、ストラットの先端は地面と点接触すると仮定し、地面の接線方向の摩擦係数は十分に大きいとする。このとき、接触点は地面上を滑らないので、ストラットの端点は、地面から離れているか、地面に接触し固定されているかのどちらかの状態を取る。このような状況を、制約安定化法[3]を用いて定式化する。

ストラットの運動を、重心に関する並進の運動方程式と、重心まわりの回転を表す四元数に関する運動方程式で表す。個々の接触状態における運動方程式を導き、状態遷移が生じる条件を、制約安定化法で得られる垂直抗力に関する式として得る。ダイナミックシミュレーションの結果と実験結果を比較し、モデリングの妥当性を検証する。



6ストラットテンセグリティロボットのダイナミックシミュレーションの例

摩擦係数が有限の場合は、テンセグリティロボットが地面上を滑るという状態が生じる。どのような状態が生じるかを理論的ならびに実験的に調べ、ハイブリッドシステム記述を導く。

B. 非ホロノミック制約を用いた転がり移動のモデリング

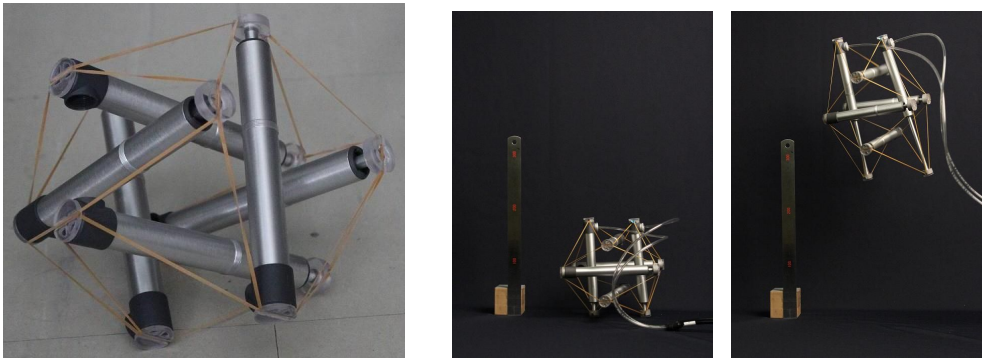
ストラットの両端が球面である場合、ストラット的一端と地面との接触は非ホロノミック制約となる。球面転がりのモデリングに関しては、Murrayらの手法[4]を用いる。特に、複数点における球面接触によって、全体の運動がどのように制約されるかを解析的あるいは数値的に明らかにする。また、ダイナミックシミュレーションの結果と実験結果を比較し、モデリングの妥当性を検証する。

研究機関名	立命館大学	研究代表者氏名	平井 慎一
-------	-------	---------	-------

研究計画・方法(つづき)

C. 跳躍のモデリング

6本のストラットから構成される6ストラットテンセグリティロボットの跳躍を定式化する。跳躍のダイナミックシミュレーションを通して、テンセグリティロボットが地面に与える力積を計算する。ダイナミックシミュレーションの結果と実験結果を比較し、モデリングの妥当性を検証する。



ストラット駆動型テンセグリティロボットとその跳躍

平成26年度以降の計画

D. 駆動方法が転がり移動と跳躍へ与える影響の解析

テンセグリティロボットの転がり移動や跳躍を実現する手法として、1) 張力材にアクチュエータを配置し、張力材の能動的な伸縮により駆動する、2) ストラットにアクチュエータを配置し、ストラットの能動的な伸縮により駆動する、3) 圧縮材とストラットの双方を駆動する、の3通りが考えられる。この駆動方法が、転がり移動や跳躍に大きく影響する。たとえば、ある面対称な接触状態からそれに隣接する面対称な接触状態への遷移は、ストラットの駆動では実現できるが、張力材の駆動では実現できない[5]。このような影響がなぜ生じるかを、テンセグリティロボットのダイナミックモデルを用いて解析し、効率的な駆動方法を見出す。

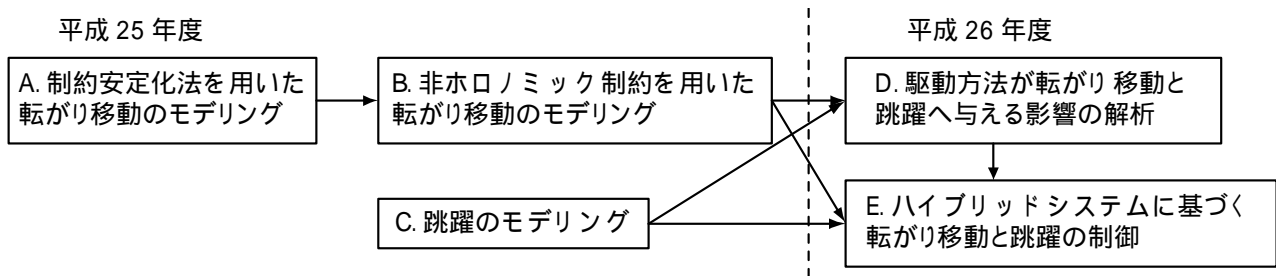
E. ハイブリッドシステムに基づく転がり移動と跳躍の制御

ハイブリッドシステムの制御の観点から、テンセグリティロボットの転がり移動と跳躍を制御する。ハイブリッドシステムを制御するためには、現在の状態を識別することが必要である。そこで、ジャイロセンサや加速度センサを用いてテンセグリティロボットの接触状態を識別することを試みるとともに、状態遷移を実現するための条件を基に、張力材あるいはストラットを駆動する。

[3] J. Baumgarte, Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamical Systems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.1, pp.1-16, 1972.

[4] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1993.

[5] 網干 雄城, 平井 慎一, ストラット駆動型テンセグリティロボットの転がり移動, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 札幌, 2012.



人権の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領5頁参照）

本欄には、研究計画を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続きが必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。

例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、組換えDNA実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続きが必要となる調査・研究・実験などが対象となります。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

該当なし

研究経費の妥当性・必要性

本欄には、「研究計画・方法」欄で述べた研究規模、研究体制等を踏まえ、次頁以降に記入する研究経費の妥当性・必要性・積算根拠について記述してください。また、研究計画のいずれかの年度において、各費目（設備備品費、旅費、人件費・謝金）が全体の研究経費の90%を超える場合及びその他の費目で、特に大きな割合を占める経費がある場合には、当該経費の必要性（内訳等）を記述してください。

本提案は、研究代表者が単独で進める研究である。謝金は提案における実験的な研究の補助に用いる。成果発表に向けて、国外旅費、外国語論文の校閲や研究成果の投稿料の費用を確保してある。

神田通信工業(株)エアーマッスルは、張力材により駆動されるテンセグリティロボットのアクチュエータとして用いる。6本のストラットから構成される6ストラットテンセグリティロボットにおいては、12本のエアーマッスルが必要である。実験に伴いエアーマッスルに経年変化が生じるため、予備として12本のエアーマッスルを平成25年度と26年度に用意している。また、6ストラットテンセグリティロボット以外の構造を有するテンセグリティロボットの試作に用いる。エアーマッスルを駆動するために、既存のコンプレッサや空気圧制御弁等から構成される空気圧システムを用いる。機械部品費はストラットや接続部の部材に、電子部品類は空気圧の制御系やセンサに用いる。

ストラット駆動型のテンセグリティロボットでは、空気圧シリンダをアクチュエータとして用いる。どのような空気圧シリンダを用いるのか検討を要するため、空気圧シリンダの費用は機械部品費から支出する。

研究機関名

立命館大学

研究代表者氏名

平井 慎一

研究費の応募・受入等の状況・エフォート

本欄は、第2段審査（合議審査）において、「研究資金の不合理な重複や過度の集中にならず、研究課題が十分に遂行し得るかどうか」を判断する際に参照するところですので、本人が受け入れ自ら使用する研究費を正しく記載していただく必要があります。本応募課題の研究代表者の応募時点における、(1) 応募中の研究費、(2) 受入予定の研究費、(3) その他の活動、について、次の点に留意し記入してください。なお、複数の研究費を記入する場合は、線を引いて区別して記入してください。具体的な記載方法等については、研究計画調書作成・記入要領を確認してください。

「エフォート」欄には、年間の全仕事時間を100%とした場合、そのうち当該研究の実施等に必要となる時間の配分率(%)を記入してください。

「応募中の研究費」欄の先頭には、本応募研究課題を記入してください。

科研費の「新学術領域研究（研究領域提案型）」にあつては、「計画研究」、「公募研究」の別を記入してください。

所属研究機関内で競争的に配分される研究費についても記入してください。

(1) 応募中の研究費

資金制度・研究費名（研究期間・配分機関等名）	研究課題名（研究代表者氏名）	役割（代表・分担の別）	平成25年度の研究経費（期間全体の額） (千円)	エフォート(%)	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由 (科研費の研究代表者(又は拠点リーダー等のようにプログラム全体の研究費の受入研究者)の場合は、研究期間全体(又はプログラム全体)の受入額を記入すること)
【本応募研究課題】 挑戦的萌芽研究 (H25～H26)	テンセグリティ構造の動的移動におけるダイナミクス (平井 慎一)	代表	2,430 (4,890)	15	(総額 4,890 千円)

研究機関名	立命館大学	研究代表者氏名	平井 慎一
-------	-------	---------	-------

研究代表者のみ作成・添付

挑戦的萌芽 - 8

研究費の応募・受入等の状況・エフォート(つづき)

(2) 受入予定の研究費

資金制度・研究費名(研究期間・配分機関等名)	研究課題名(研究代表者氏名)	役割(代表・分担の別)	平成25年度の研究経費(期間全体の額)(千円)	エフォート(%)	研究内容の相違点及び他の研究費に加えて本応募研究課題に応募する理由(科研費の研究代表者(又は拠点リーダー等のようにプログラム全体の研究費の受入研究者)の場合は、研究期間全体(又はプログラム全体)の受入額を記入すること)
基盤研究(A)(一般)(H23~H25)	軟組織のトライボロジー(平井 慎一)	代表	5,750 (17,240)	20	本研究は、軟組織が他物体と接触しながら相対的に運動するとき接触界面に生じる現象を解明し、軟組織のトライボロジーを確立することであり、テンセグリティ構造は研究の対象外である。 研究期間全体の直接経費の総額: 34,800 千円
基盤研究(A)(一般)(H24~H26)	触力覚に基づく技能伝承のための仮想実地訓練環境の構築(田中 弘美)	分担	1,000 (7,500)	10	本研究は、触覚と視覚による手技の計測を通して、技能のモデリングを行う試みであり、テンセグリティ構造は研究の対象外である。 研究期間全体の直接経費の総額: ????? 千円
(3) その他の活動 〔上記の応募中及び受入予定の研究費による研究活動以外の職務として行う研究活動や教育活動等のエフォートを記入してください。〕					55
合計 (上記(1)、(2)、(3)のエフォートの合計)				100 (%)	