

令和 3 年 5 月 19 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04011

研究課題名(和文) 屈曲と伸縮が可能な索状機械システムの複雑環境における超冗長制御

研究課題名(英文) Hyper-redundant control of cord-like mechanical systems with flexion and extension degrees of freedom in complicated terrain

研究代表者

田中 基康 (Tanaka, Motoyasu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50633442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：屈曲だけでなく伸縮も可能な超冗長索状機械システムの超冗長制御方法を提案した。この手法は、屈曲および伸縮に起因する冗長性を同時に活用する制御手法となっているほか、環境との拘束条件の変化についても表現可能となっている。手法の有効性はシミュレーションや実機実験で検証を行った。生物の運動知能の考察については、ヘビ型ロボットのうねり運動を利用した、円柱表面にしがみついた状態での昇降運動について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は生物模倣や発見的手法がほとんどであった伸縮屈曲索状機械システムの制御について、全く新しい理論的枠組みを創出した。本手法を応用することで、拘束変化を積極的に用いながら伸縮と屈曲をうまく協調させるような“生物に捉われない動作”が実現できる。索状機械システムは細長い胴体をもつため、本制御手法を活用することで狭隘空間での点検等での活躍が見込まれる。また、この理論的枠組みによって屈曲と伸縮の両方が可能な生物の運動知能解明への道が拓けた。

研究成果の概要(英文)：We proposed a hyper-redundant control method for the cord-like mechanical system which can bend and stretch. In the method, the change of the constrained condition with the surrounding terrain is represented as the change of the system matrices, and we can use a redundancy caused by bending and stretching of the robot. The effectiveness of the method was verified by simulations and experiments. As for the consideration of the locomotion intelligence of a living snake, we discussed the ascending and descending motions of a snake-like robot while clinging to the surface of a cylinder, using its undulating motion.

研究分野：ロボティクス

キーワード：索状ロボット 冗長性 伸縮 可変拘束 ヘビ型ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

索状ロボットは自由度が大きく操作が難しいため、動作制御に関する研究が多く行われてきた。索状ロボット研究は大きく2つに分けられる。1つは胴体が屈曲のみで伸縮しないヘビ型ロボット、もう1つは伸縮もできるミミズ型ロボットである。ヘビ型では広瀬らの生物規範の研究[A]に端を発し、体形曲線の事前設計、自律分散、制御理論的手法、等が提案されてきたが、ほとんどが環境として2次元平面と仮定している。これは、複雑環境を想定すると、胴体と環境との接触位置の変化、すなわち拘束条件の切り換えが生じ、力学系が離散量と連続量の混在したハイブリッドシステム[B]となって定式化が困難となるためである。これに対し、研究代表者は拘束条件の切り換えを陽に考慮した可変拘束冗長システムとしての定式化と冗長制御方法を提案し、不連続な3次元環境の踏破や生物に捉われない特徴的な動作を実現してきた。冗長性は制御目標を達成してもなお自由度が余っている性質であり、冗長性を利用することで様々な副次的な制御目標を達成できる。一方、ミミズ型の動作制御に関する従来研究は生物規範の蠕動や進行波、発見的な体形曲線に基づく移動[C]があるが、制御理論的手法に基づく複雑環境での軌道追従制御や力学モデルを用いた入力やエネルギーの最適性の議論は行われていない。

2. 研究の目的

屈曲だけでなく伸縮も可能な超冗長索状機械システムを対象に、複雑な環境であっても簡単に、効率的に、適応的に動作するための超冗長制御方法を確立する。その制御方法を実ロボットに適用し、生物を超える巧みな動作の創出を目指すとともに、ヘビやミミズのような索状生物の運動知能について考察を行う。

3. 研究の方法

(1) 伸縮・屈曲索状ロボットのモデリングと冗長制御方法

環境との拘束条件が変化しない場合の制御対象について、数式モデルを導出する。この際、多リンクモデルに基づく方法と対象の連続体への近似に基づく方法の2つのアプローチにてモデル化を行う。次に、伸縮および屈曲に起因する冗長性を同時に活用する制御方法を提案する。これにより、伸縮と屈曲を利用した多様な動作が可能となる。

(2) 可変拘束機能をもつ伸縮・屈曲索状ロボットのモデリングと超冗長制御方法

環境との拘束条件の変化を考慮した場合の制御対象について、拘束変化を陽に考慮した可変拘束冗長システムとして数式モデル化を行う。制御入力においては、従来の可変拘束冗長システムの制御入力に新たに伸縮の冗長性が加わる。さらに、それを3次元複雑環境下で応用展開する。

(3) 実機検証と生物の運動知能の考察

前述の(1)(2)の検証実験を行うため、伸縮関節および屈曲関節をもつ索状ロボットの開発し、提案した制御則の実装を行う。そして2次元平面や3次元環境にて提案制御方法の実機検証実験を行う。さらに、生物との比較を通じて生物の運動知能について考察する。

4. 研究成果

(1) 伸縮・屈曲索状ロボットのモデリングと冗長制御方法

環境との拘束条件が変化しない場合の制御対象について、多リンクモデルに基づき対象の運動を表す2つの数式モデルを導出した。1つは伸縮に起因する冗長性を空間のまま扱うモデルで、もう1つは伸縮量を直接被制御量に導入するモデルである。導出した2つのモデルに基づき、伸縮に起因する冗長性を利用できる制御方法を提案し、シミュレーションによりその有効性を検証した。成果は国内学会にて発表を行い、若手優秀講演フェロー賞を受賞した。さらに検討を重ねた結果、特異姿勢回避については従来同様の手法では回避が難しく、注意が必要であることが明らかになった。そして特異姿勢回避について検討を進め、車輪前方のリンク伸縮を無効化することで特異姿勢回避が可能であることを明らかにした。さらに、シグモイド関数を用いて伸縮量を制限する方法を提案し、シミュレーションにて有効性を確認した。この成果は国際論文誌に採録が決定している。

前述のモデルはすべて車輪が横滑りしないと仮定したモデルを用いていた。これに対し、新たに横滑りを考慮した動力学モデルを導出し、先頭を制御するための制御入力を設計した。その有効性はシミュレーションで確認し、横滑りしないと仮定した場合のような特異姿勢への収束がないことと、適切な直動関節の利用が創発されることが確認された。成果は国内会議にて一部を発表したほか、国際会議での発表が決定している。

連続体に基づく方法として、連続曲線へのフィッティングを用いて3次元操舵を行う制御方法を改良し、実機の各種制約条件を考慮できるようにした。提案手法は後述する実機を用いて実

機検証を行った。成果は学術雑誌（国際）に採録された。また、伸縮を用いた制御の応用として、管内移動ロボットやプラント点検用の多連結移動ロボットの一部を伸縮リンクとみなした制御を提案し、成果を学術雑誌（国際）に発表した。管内移動では胴体を押し付けて滑落を防ぐ部分を収縮部、曲管等に合わせて屈曲を行う部分を伸長部として連続体で表現した。これにより、直管と曲管で構成された管内の移動を実現した。

(2) 可変拘束機能をもつ伸縮・屈曲索状ロボットのモデリングと超冗長制御方法

環境との拘束条件が変化する場合については、3次元環境として段差昇降を対象とし、モデル化と制御設計を行った。伸縮自由度を活用することで特異姿勢回避と段差昇降を両立させる制御手法を提案し、シミュレーションを行うことで提案制御手法によってリンクの伸縮を利用しながら段差を昇降できることを確認した(図1)。成果は国内学会にて発表し、優秀講演賞を受賞した。

(3) 実機検証と生物の運動知能の考察

検証実験のための実機については、基礎検討として大きな伸縮量を実現する索状ロボット用の伸縮ユニットの試作を行い、国内学会にて発表した。次にその伸縮ユニットを多数連結し、3次元動作とリンク伸縮が可能な多連結移動ロボット(図2)を開発し、前述の3次元操舵の実験に用いた。実機はヨー回転関節、ピッチ回転関節、伸縮関節、能動車輪で構成されており、伸縮関節はヨー回転関節とピッチ回転関節の間に配置され、ピッチ回転関節の同軸上に能動車輪が配置されている。しかしながら、本ロボットは収縮時にヨー回転関節が回転できない問題があったため、連続体モデルに基づく3次元操舵制御の検証はできたが、多リンクモデルに基づく制御の実験には用いることができなかった。

多リンクモデルに基づく(1)の特異姿勢回避、(2)の段差昇降の両方の実験に利用可能な実機として、屈曲と伸縮が可能な索状機械システムの開発を行った。環境は既知としたため、接触センサの実装は不要と結論づけた。実機は回転関節と伸縮関節で構成されている。伸縮についてはボールネジ構造を用い、屈曲については回転関節を用いた。屈曲関節はピッチ回転関節とヨー回転関節が交互に接続されており、その間に伸縮関節が取り付けられている。ピッチ回転関節と同軸上に受動車輪が取り付けられている。ピッチ回転関節を用いて胴体を持ち上げることができ、回転関節と伸縮関節を適切に用いて段差のような3次元環境を移動できる。実機検証については、新型コロナウイルス感染症の流行による影響により、実機開発に大きな影響が生じた。最終的に実機の開発は完了したが、実機を用いた実験は残項目となった。

生物の運動知能の考察については、ヘビ型ロボットのうねり運動を利用した、円柱表面にしがみついた状態での昇降運動について考察した。これは、伸縮可能なヘビ型ロボットでは体軸方向の張力を制御できることから実行可能と予想される運動である。まず、昇降運動を実現するため、滑らかな曲面上での経路計画法を考案し、次に力学的な考察を行った。力学的考察から、運動が実現可能であるための必要条件のいくつかを導き出した。ヘビ型ロボットで円柱を昇降する場合、従来はらせん捻転運動と呼ばれる運動を利用していたが、らせん捻転は生物のヘビが用いる運動と全く異なる。一方で、本研究で考察した運動はより生物のヘビに近い運動である。力学的考察から得られた必要条件是生物ヘビの運動の観測結果とも合致しており、学術的に興味深い。またこの運動が完成すれば、ヘビ型ロボットの腹部のみを円柱に接触させて円柱を昇降する運動となるため背面に様々なセンサを搭載可能となり、実用的にも有益である。以上のように、生物の運動知能の考察についても成果があった。

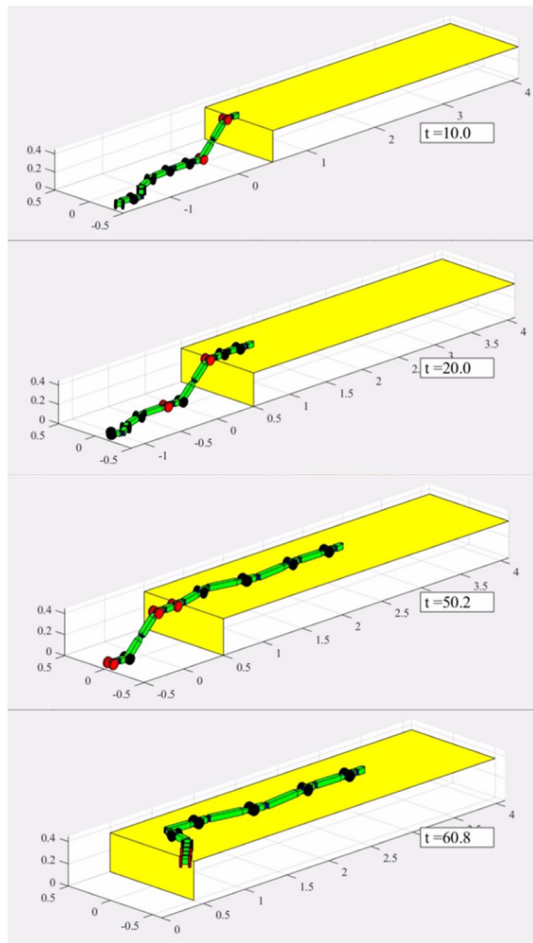


図1 段差昇降シミュレーション

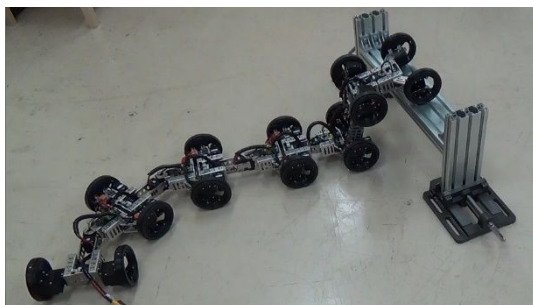


図2 検証用実機を用いた実験の様子

<引用文献>

- [A] 広瀬：へび型ロボットの移動機構，日本ロボット学会誌，vol.28, no.2, 2010.
- [B] 井村ら：ハイブリッドシステムの制御，コロナ社，2014.
- [C] H. Ohno et al.: Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2001.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Sawabe Hidemasa, Nakajima Mizuki, Tanaka Motoyasu, Tanaka Kazuo, Matsuno Fumitoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Control of an articulated wheeled mobile robot in pipes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1072 ~ 1086
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1666737	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 Tanaka Motoyasu, Kon Kazuyuki, Nakajima Mizuki, Matsumoto Nobutaka, Fukumura Shinnosuke, Fukui Kosuke, Sawabe Hidemasa, Fujita Masahiro, Tadakuma Kenjiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Development and field test of the articulated mobile robot T2 Snake-4 for plant disaster prevention	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 70 ~ 88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1680316	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 Nakajima Mizuki, Tanaka Motoyasu, Tanaka Kazuo	4. 巻 5
2. 論文標題 Simultaneous Control of Two Points for Snake Robot and Its Application to Transportation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 111 ~ 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2019.2947003	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 Matsumoto Nobutaka, Tanaka Motoyasu, Nakajima Mizuki, Fujita Masahiro, Tadakuma Kenjiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Development of a folding arm on an articulated mobile robot for plant disaster prevention	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 89 ~ 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1689167	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 Motoyasu Tanaka, Kenjiro Tadakuma, Mizuki Nakajima, and Masahiro Fujita	4. 巻 35-1
2. 論文標題 Task-space Control of Articulated Mobile Robots with a Soft Gripper for Operations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	6. 最初と最後の頁 135-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TR0.2018.2878361	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 Motoyasu Tanaka, Hidemasa Sawabe, Mizuki Nakajima, and Ryo Ariizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Redundant Control of a Planar Snake Robot With Prismatic Joints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Control, Automation, and Systems	6. 最初と最後の頁 -
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 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 原田航季, 有泉亮, 田中基康, 浅井徹, 東俊一
2. 発表標題 直動関節をもつヘビ型ロボットの頭部軌道追従制御
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤部英壮, 田中基康, 田中一男
2. 発表標題 伸縮機構を持つヘビ型ロボットのモデリングと制御
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島瑞, 田中基康, 田中一男
2. 発表標題 伸縮関節をもつ車輪型索状ロボットの開発 能動車輪つき関節ユニットの開発
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 澤部英壮, 田中基康, 田中一男
2. 発表標題 伸縮機構を持つヘビ型ロボットのモデリングと制御
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koki Harada, Ryo, Ariizumi, Motoyasu Tanaka, Toru Asai, and Shun-ichi Azuma
2. 発表標題 Head trajectory tracking control of a snake-like robot with prismatic joints
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics (SWARM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中基康, 中島瑞, 有泉亮
2. 発表標題 伸縮と屈曲が可能なヘビ型ロボットの段差昇降制御
3. 学会等名 第21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 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究概要 https://sites.google.com/site/motoyasutanakalab/research/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%A6%82%E8%A6%81 発表文献リスト https://sites.google.com/site/motoyasutanakalab/paper

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
研究分担者	有泉 亮 (Ariizumi Ryo) (30775143)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

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
---------	---------