

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760159

研究課題名 (和文) 柔軟物の力学的機能の活用によるロボットモーション革命

研究課題名 (英文) Robot Motion Innovation by Utilizing Mechanistic Functions of Flexible Objects

研究代表者

望山 洋 (MOCHIYAMA HIROMI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：40303333

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、生物に匹敵する機敏なロボットモーションの実現を目的として、弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構に基づくロボットを開発した。開発したロボットは、繰り返し跳躍ロボット、小型2脚滑走ロボット、カメレオンの舌型高速捕獲ロボットマニピュレータ、軟弱地盤用跳躍移動ロボットの4種類である。これらの俊敏なロボットは、生物の筋肉に相当するロボット要素として、弾性体の飛び移り座屈を利用した4種類の瞬発力発生機構をそれぞれ有している。

研究成果の概要 (英文)：

In this research, in order to achieve robotic realization of creature-like quick motions, we developed novel robots based on impulse force generators utilizing snap-through buckling of elastic objects. Specifically, the developed robots are the repeated jumping robot, the compact bipedal kick-and-slide robot, the chameleon-like quick capturing robotic manipulator, and the jumping mobile robot for fragile grounds. These robots have four types of impulse force generator utilizing snap-through buckling of elastic objects as robotic elements corresponding to muscles of creatures, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：ソフトメカニクス、柔軟ロボット、瞬発力発生機構、弾性論、飛び移り座屈

1. 研究開始当初の背景

21世紀の開始直前に、ホンダの2足歩行ロボットP2が発表され、世界に衝撃を与えた。人間の形をした自立機械が、人間と同じように2足で歩行するその動きは、見る人の目を釘付けにした。このロボットによるインパクトのある動きの実現は、人を感動させただけに止まらず、開発企業の株価を上昇させるという経済効果ももたらした。しかし、今ではロボットによる2足歩行を至る所で目にすることができ、ロボット専門家でない一般人でも驚かない。このような時代に、インパクトのあるロボットモーションを作り出すことは極めて困難である。一方、ロボットが進化してきたとはいえ、依然として、ロボットと人間をはじめとする生物との間には、厳然たるギャップが存在し、それらの動きにも大きなギャップがある。生物の動きの特徴は、なんとと言ってもその躍動するようなキビキビとした動きである。小魚は、ピンピンと跳ねるように水中を泳ぐことができる。のみやバッタは、自身の体長の何倍もの高さ・飛距離を跳躍し、不整地を移動できる。カメレオンは、重力加速度の約40倍もの加速度で舌を投擲し、獲物を素早く捕らえることができる。生物のキビキビとした動きを生み出す源は、軽量で瞬発力のある筋肉である。多くの研究者が、人工筋肉の開発に取り組んでいるが、ロボットモーションを大きく変えるまでには至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、見る人に感動を与える、生物のようにキビキビした動きを実現する斬新なロボットを開発し、ロボットモーションに新たな革命をもたらすことである。

本研究では、以下の2つの目標を掲げた。第1の目標は、生物の俊敏性を支える筋肉に相当する、新たなロボット要素を開発することである。

第2の目標は、開発したロボット要素を様々な形態のロボットに応用し、生物のように躍動するようなキビキビした動きを実現するロボットを開発することである。

本研究を推進することにより、生物に近い動きが実現されるため、人間と親和性のあるロボットの実現に繋がると期待される。人間と親和性のあるロボットは、特に子供を魅了するのに有効であると考えられる。コンピュータ・ゲームに熱中する現代の子供たちを、自然環境の中で遊ぶことを促す、魅力あるロボットコンテンツとして活用することができれば、その社会的意義は極めて大きいと考えられる。

3. 研究の方法

研究代表者らは、生物の筋肉に置き換わる

ロボット要素として、柔軟物から発現する力学的機能、具体的には弾性体の飛び移り座屈を活用した、閉ループ柔軟カタパルトを既に提案している。

弾性体の飛び移り座屈という現象は、呼び方は知られていなくても、一般にも経験的によく知られている力学現象である。プラスチックの下敷きの両端を手で持って撓ませ、両端を手で回転させることにより、プラスチックの下敷きが“パチッ”という音と共に素早く変形する現象は、飛び移り座屈の典型例であり、小学生も経験的に知っている。

閉ループ柔軟カタパルトは、弾性を有する柔軟帯を撓ませて、その両端を2つの回転関節にそれぞれ固定しただけの簡単な機構であるが(図1)、関節の少なくとも1つをモータなどにより駆動するだけで、飛び移り座屈が発生し、瞬発力を繰り返し得ることができる(図2)。この飛び移り座屈を柔軟閉ループ構造から発現される力学的機能として捉え、ロボット要素として活用するという視点は独創的であり、他に例を見ないオリジナリティの極めて高いアイデアである。本研究では、このアイデアを発展させることにより、目標の実現を試みた。

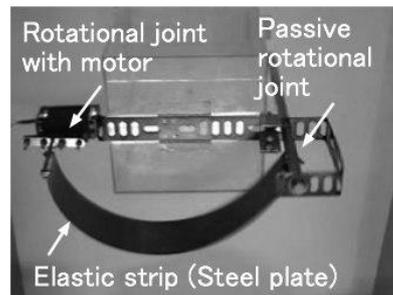


図1：閉ループ柔軟カタパルト

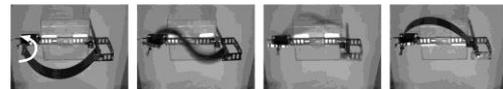


図2：閉ループ柔軟カタパルトによる瞬発力発生の様子を示した連続写真(左から右へ)。

第1の目標である新しい瞬発力発生ロボット要素を発明するためのアイデアを、現象面から得るために、力学的機能の発現に有望と思われる柔軟材料を調査し取り揃えた上で、多種多様の柔軟物から生み出される力学現象を徹底的に観察した。

また、理論面からのアプローチとして、飛び移り座屈を発生させる閉ループ柔軟構造という力学系に対して、曲線の微分幾何学と

ロボティクス理論を巧みに用いて、膨大な数学操作により、力学系の本質的な構造を見出し、新たな知見を得ること試みた。

なお、上記2つのアプローチは、独立に行うのではなく、現象観察から得られた直感的なイメージを数式化したり、また逆に、理論から推論された知見を現象で確認するなど、現象と理論の両方を同時に見ながら、研究を進めていった。また、コンピュータシミュレーションも行い、ここから得られる知見も利用する。このように、研究の停滞を招かぬよう多面的に研究を進めた。

一方、第2の目標である、キビキビした動きを実現する新しいロボットの開発のためには、ロボットタスクに適した環境との力学的相互作用の手段を発見する必要がある。このために、遊泳・跳躍・はばたき飛翔・投擲・捕獲などのあらゆるロボットタスクと、開発した瞬発力を発生するロボット要素との組み合わせを考慮した上で、多くの試作機を短期間に製作し、環境との力学的相互作用の状況を観察することにより、発明に繋がる発見の場を形成した。

4. 研究成果

(1) 瞬発力発生機構の開発

4種類の瞬発力発生機構を開発した。

- ① 異方性弾性点を有する瞬発力発生機構：蝶番を用いて異方性の弾性を付与することにより、片方向のみに高い周波数で繰り返しインパルス力を発生できる。



図3：異方性弾性点型（尖っている部分は蝶番で、異方性弾性点である）

- ② 2リンク1能動関節型瞬発力発生機構：2リンク1能動関節の間に弾性体を挟んだ機構である。これも片方向のみに高い周波数で繰り返しインパルス力を発生できる。



図4：2リンク1能動関節型（連続写真）

- ③ 尖状型瞬発力発生機構：弾性体の途中に尖った部分を有する機構である。弾性体の両端を回転往復運動させることにより、

強力で直線性の良い片方向性インパルス力を生成できる。



図5：尖状型

- ④ 振り型瞬発力発生機構：撓ませた弾性体を振ることにより飛び移り座屈を発生させる機構である。弾性体の両端を一方にのみ回転させるだけで、高い周波数の繰り返しインパルス力を効率良く発生できる。



図6：振れ型（連続写真）

また、装置の大型化に寄与する弾性構造体を開発している。

- ⑤ 振りバネの直列構造に基づく弾性構造体：小型ロボットなどで利用している帯状の弾性体をそのまま大型化すると、撓みにくくなり、高い弾性エネルギーでの飛び移り座屈を発生させることはできない。開発した弾性構造体は、振りバネの直列構造に基づく。21[N]程度の駆動力で、16[Ns]程度の大きな運動量（これは、約3.5[kg]の物体を1[m]の高さから落下させたときに地面に加わる撃力の運動量に相当する）を発生させることに成功した。このロボット要素を利用することにより、今後犬並みの運動能力を有する移動ロボットの開発が期待できる。なお、この弾性構造体の成果は、第19回（平成20年度）（財）立石科学技術振興財団助成金による「柔軟物の力学的機能を活用した瞬発力によるアシストデバイスの研究」によって得られた知見に基づいている。



図7：振れバネの直列構造に基づく弾性構造体による大型カタパルト

(2) ロボットの開発

開発した瞬発力発生装置を用いて、4種類の新しいタイプのロボットを開発した。

- ① 繰り返し跳躍移動ロボット：異方性の弾性点を有するインパルス力発生機構を用いている。バッテリー・制御器未搭載ではあるが、非常にシンプルな構造で0.5[m]を超す跳躍を1[Hz]程度の周波数で繰り返すことに成功した。

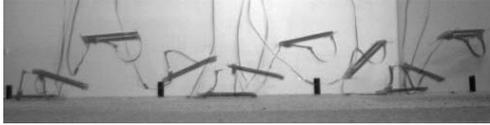


図8：繰り返し跳躍ロボット（連続写真の重ね合せ）

- ② 小型2脚滑走ロボット：2リンク1能動関節型の片方向インパルス力発生機構を2対用いている。このロボットは、地面の蹴りと着地時の胴体による跳ね返りを繰り返すことにより走行する。地面を水平に近い角度で強く蹴ることにより、低い跳躍と滑りを繰り返して高速に移動することができる。掌に載るほどの小型サイズで、70[g]ほどの軽量でありながら、秒速1.5[m]の最高速度を達成した。さらに、2対の瞬発力発生機構の位相を制御することにより、毎秒1.8回転の高速旋回の実現に成功した。直進性能はUC Berkeleyで開発された小型移動ロボットDASHに匹敵し、回転性能はDASHを遥かに凌ぐ。世界トップレベルの俊敏性を実現した。

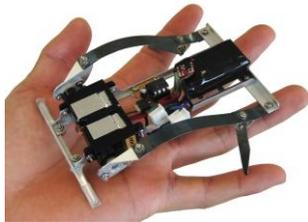


図9：小型2脚滑走ロボット



図10：小型2脚滑走ロボットによる俊敏走行の実現（連続写真の重ね合せ）

- ③ カメレオンの舌型高速捕獲ロボットマニピュレータ：尖状弾性体を有するインパルス力発生機構と、カメレオンの舌部の機能を果たす凸状弾性体と組み合わせる

ことにより、小型でシンプルなシステムでありながら、離れた場所にある物体を極めて高速で捕獲することに成功した。

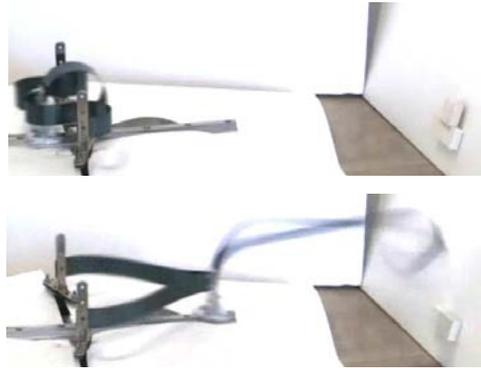


図11：カメレオンの舌型高速捕獲マニピュレータ（連続写真）

- ④ 軟弱地盤用跳躍移動ロボット：弾性体の振りと曲げを伴う飛び移り座屈による瞬発力発生機構を用いた跳躍移動ロボットであり、砂地のような軟弱地盤上でも移動することができる。この機構では、動力源を一方に回転させるだけで連続的に瞬発力を発生させることができるため、効率が良い。水上での跳躍も実現している。



図12：軟弱地盤用跳躍移動ロボット

また、閉ループ弾性体を扱うために便利な数学モデルを、曲線の幾何と変分法を利用して導出することに成功した。副産物的な成果であるが、カテーテルのモデリングなど応用への発展性のある理論面の進展である。

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9件)

- ① 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄 : 高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと遊泳ロボットへの応用, 日本ロボット学会誌, 査読有, 27-10, 2009, 1144/1153.

- ② T. Tsuda, H. Mochiyama, H. Fujimoto: A Compact Kick-and-Bounce Mobile Robot powered by Unidirectional Impulse Force Generators, Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), 査読有, 2009, 3416/3421.
- ③ T. Tsuda, H. Mochiyama, H. Fujimoto: Mechanistic Analysis of the Kick-and-Bounce Strategy for Mobile Robots with Repeated Impulse Forces, Proceedings of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2009), 査読有, 2009, 317/324.
- ④ 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: 跳躍ロボットのための非対称型閉ループ柔軟カタパルト, 日本ロボット学会誌, 査読有, 26-4, 2008, 63/71.
- ⑤ A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama, H. Fujimoto: A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with High Stiffness Endpoint and Its Application to Swimming Tasks, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), 査読有, 1477/1482, 2008.
- ⑥ H. Mochiyama, A. Yamada, H. Fujimoto: Quasi-static Energy Analysis of the Robotic Catapult based on the Closed Elastica, The 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2008), 査読有, 2008, 405/412.
- ⑦ A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama, H. Fujimoto: A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with Anisotropic Stiffness Point and Its Application to Compact Jumping Robots, The 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2008), 査読有, 397/404, 2008.
- ⑧ M. Watari, A. Yamada, H. Mochiyama, H. Fujimoto: A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with High Stiffness Endpoint and Its Application to Impulsive Swimming Robot, The 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2008), 査読有, 389/396, 2008.
- ⑨ A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama, H. Fujimoto: An Asymmetric Robotic Catapult based on the Closed Elastica for Jumping Robot, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008), 査読有, 2008, 232/237.
- [学会発表] (計13件)
- ① 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄: 閉ループ弾性体の飛び移り座屈を利用した物体投擲ツール, 第10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, 2009.12.24, 芝浦工業大学.
- ② 望山洋: 閉ループ弾性体のロボット理論: 変分法からのアプローチ, 第10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, 2009.12.24, 芝浦工業大学.
- ③ 津田剛志, 望山洋, 藤本英雄: 片方向インパルス力発生機構を用いた小型低空滑走ロボット, 第10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, 2009.12.24, 芝浦工業大学.
- ④ 豆田浩志, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: 曲げと振れを伴う飛び移り座屈を利用した小型ロボットの水上跳躍動作, 第10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, 2009.12.24, 芝浦工業大学.
- ⑤ 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄: 振りばねの直列構造に基づく重量物投擲のための瞬発力発生装置の開発, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009.9.17, 横浜国立大学.
- ⑥ 豆田浩志, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: 弾性体の曲げと振れを伴う飛び移り座屈を用いた小型跳躍ロボット, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009.9.17, 横浜国立大学.
- ⑦ 山田篤史, 豆田浩志, 望山洋, 藤本英雄: 閉ループ弾性体の曲げと振れを利用したインパルス力の繰り返し生成機構, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009.5.26, 福岡国際会議場.
- ⑧ 渡正充, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: 尖状部を有する弾性閉ループ構造を用いた高速捕獲動作, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009.5.26, 福岡国際会議場.
- ⑨ 津田剛志, 望山洋, 藤本英雄: 片方向インパルス力発生機構を用いた小型滑走ロボット, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009.5.26, 福岡国際会議場.
- ⑩ 津田剛志, 望山洋, 藤本英雄: 小型2脚走行ロボットのための柔軟物の閉ループ

構造に基づく片方向インパルス力発生機構，第9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，2008.12.5，長良川国際会議場。

- ⑪ 渡正充，山田篤史，望山洋，藤本英雄：尖状弾性柔軟部を有する閉ループ柔軟カタパルト，第9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，2008.12.5，長良川国際会議場。
- ⑫ 山田篤史，渡正充，望山洋，藤本英雄：異方性剛性点を有する閉ループ柔軟カタパルトと小型跳躍ロボットへの応用，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2008，2008.6.6，長野市若里多目的スポーツアリーナ。
- ⑬ 渡正充，山田篤史，望山洋，藤本英雄：高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと遊泳ロボットへの応用，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2008，2008.6.6，長野市若里多目的スポーツアリーナ。

〔産業財産権〕

○出願状況（計6件）

名称：瞬発力発生装置
発明者：藤本英雄，望山洋，山田篤史，渡正充
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：PCT/JP2009/070318
出願年月日：2009.12.3
国内外の別：外国

名称：弾性構造体及び瞬発力発生装置
発明者：望山洋，市川泰久，藤本英雄
権利者：筑波大学，名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願2009-140522
出願年月日：2009.6.11
国内外の別：国内

名称：瞬発力発生装置
発明者：藤本英雄，山田篤史，望山洋
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願2009-50647
出願年月日：2009.3.4
国内外の別：国内

名称：瞬発力発生装置及び瞬発力発生方法
発明者：藤本英雄，望山洋，山田篤史，渡正充
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願2008-309298
出願年月日：2008.12.4

国内外の別：国内

名称：瞬発力発生装置及び瞬発力発生方法
発明者：望山洋，津田剛志，藤本英雄
権利者：筑波大学，名古屋工業大学
種類：特許
番号：特願2008-310283
出願年月日：2008.12.4
国内外の別：国内

名称：瞬発力発生装置及び瞬発力発生方法
発明者：藤本英雄，望山洋，山田篤史，渡正充
権利者：名古屋工業大学
種類：特許
番号：PCT/JP2008/66378
出願年月日：2008.9.11
国内外の別：外国

〔その他〕

ホームページ：
筑波大学大学院システム情報工学研究科
知能機能システム専攻柔軟ロボット学研究室
<http://www.frlab.iit.tsukuba.ac.jp>

教育利用：

（1）本研究で得られた知見は，筑波大学工学システム学類3年生向けの知的・機能工学システム主専攻実験Ⅱ「跳躍機構のデザイン」に利用されている。

（2）本研究で得られた知見は，平成21年度未来の科学者育成プロジェクト高校生科学体験教室において，茨城県立高校の学生を対象に筑波大学で実施された跳躍ロボットの製作体験に活用された。

参考：教育いばらきWEB3号特集：
http://www.edu.pref.ibaraki.jp/board/ko_uho/webkyouiba/h21/3/tokusyuu.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

望山 洋 (MOCHIYAMA HIROMI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号：40303333

(2) 研究協力者

藤本 英雄 (FUJIMOTO HIDEO)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：60024345

山田 篤史 (YAMADA ATSUSHI)
名古屋工業大学・工学研究科・特任助教
研究者番号：40534334