

## 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24日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360100

研究課題名（和文） 連続体ロボティクスに基づく動物に匹敵する俊敏性の機械実現

研究課題名（英文） Robotic Realization of Animal Motion Quickness based on Continuum Robotics

研究代表者

望山 洋 (MOCHIYAMA HIROMI)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40303333

研究成果の概要（和文）：本研究では、動物に匹敵する俊敏性を有する、連続体の力学を利用したコンパクトなロボット移動体とロボットマニピュレータ、すなわち、脚式走行ロボット、跳躍移動ロボット、遊泳ロボット、飛行ロボット、そしてカメレオン型のシューティングマニピュレータ（手先効果器投擲型のロボットマニピュレータ）を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed compact robotic mobile machines and manipulators based on mechanics of continuum, i.e., legged running robots, jumping robots, swimming robots, flying robots, and chameleon-like shooting manipulators, which achieved quick motions compared with small animals.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 6,200,000  | 1,860,000 | 8,060,000  |
| 2011年度 | 5,500,000  | 1,650,000 | 7,150,000  |
| 2012年度 | 2,700,000  | 810,000   | 3,510,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 14,400,000 | 4,320,000 | 18,720,000 |

研究分野：ロボティクス

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：知能機械、知能ロボティクス、機械力学・制御

### 1. 研究開始当初の背景

近年、Biologically Inspired Robot と呼ばれている分野の発展は目覚ましく、動物並みの高い運動性能を備え、技術的完成度の高いロボットが数多く開発されている。Case Western Reserve University の Quinn らは、車輪と脚の長所を併せ持つスポークホイールを利用したゴキブリ並みの走破性をもつ小型移動ロボットを開発しているが、近年その完成度をさらに高めている。CMU の Sitti らは、ナノテクノロジーを駆使して、高速で壁や天井を移動するトカゲ型ロボットや、水

上を走行するバシリスク型ロボットなどを開発している。スイス Lausanne 工科大の Kovac らは、精密加工技術を生かして、わずか7[g]で1.4[m]の大跳躍を実現するロボットを開発している。ロボット最大級の国際会議 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009) では、UC Berkeley の Fearing らが、秒速1.5[m/s]で走行する16[g]の小型6脚ロボットを発表している。Boston Dynamics は、本物の人間二人が肩を組んで走っていると見紛うような、極めて運動性能の高い移動ロボット BigDog を開発し、世間を驚かしている。また、ごく最

近, Sandia National Laboratory が, フェンスを軽々と飛び越えることのできる移動・跳躍ロボット Hopper の最新版を開発し, その映像が YouTube にアップロードされ話題となっている. このようにロボット技術の進歩が目覚ましいが, 特に海外の動きは顕著である. 国内では, 東京工業大学・広瀬らの蛇型ロボットをはじめとして, 世界のロボティクスをリードしていることは間違いないが, 海外のロボティクスの猛追を受けている状況である.

## 2. 研究の目的

本研究の目的は, 自然環境で頑健に動作し, 動物に匹敵する俊敏性を有するロボットの実現である. ロボットに俊敏性を付与するために, 閉ループ弾性体の飛び移り座屈と呼ばれる連続体の力学現象に基づく瞬発力発生装置を活用する. 具体的な実現目標は, 鯉の稚魚のように水中を撥ねるようにして動き回る遊泳ロボット, 雀のように空中を飛翔しつつ高い離着陸能力を有する飛翔ロボット, ネズミのように捕獲が困難なほどの俊敏性で陸上を自在に移動する走行ロボット, などである. また同時に, 基本ロボット要素としての閉ループ弾性体の力学的特徴を明らかにし, 連続体ロボティクスの理論的基礎を与える.

## 3. 研究の方法

ロボット開発においてブレークスルーを生み出すために「1月10プロトタイプ」戦略を実施した. 本戦略では, 走行ロボット・遊泳ロボット・羽ばたき飛翔ロボットの各開発において, 1月に10体のプロトタイプを製作しながら, 現象観察を繰り返すことによって, 動物に匹敵する俊敏性を有するロボットの機械実現に対する斬新なアイデアを創出する. また, このロボット製作と現象観察の高速繰返しによって得られた連続体に対する物理的直感を駆使して, 連続体ロボティクスの理論的基礎を築く. 研究代表者と2名の学外研究分担者を中心として研究を推進した.

## 4. 研究成果

本研究では, キーテクノロジーである閉ループ弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生装置を中心として, 動物に匹敵する俊敏性を有する小型ロボットの開発を行った. また, 研究の後半では, 本研究のキーテクノロジーである閉ループ弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構に限定せず, あらゆる連続体の活用にまで視野を広げ, 研究を推

進した.

### (1) 移動メカニズム

#### ① 走行ロボット

掌サイズで 66[g]ほどの小型軽量でありながら, 瞬時的に体長あたりの秒速 13[Body Length/s]に相当する 1.5[m/s]の高い直進性能と 11.5[rad/s]の旋回性能を併せ持つ, トビネズミのような小型2脚繰返し跳躍走行ロボット (Robotic Jerboa) を開発した (図1).

#### ② 跳躍移動ロボット

名刺サイズで 14[g]というコンパクトさでありながら, 自身の高さの7倍にも相当する階段を1段あたり 0.7[s]で機敏に駆け登ることのできるカエルのような小型繰返し跳躍ロボット (Kikker) を開発した (図2).

また, ゴムの力学的機能を活用したロボットの検討も行い, 100[g]程度の質量でありながら, 机の上の高さまで繰返し跳躍することのできるパンタグラフ構造の跳躍ロボット (Jumpanta) を開発した (図3).

#### ③ 遊泳ロボット

V字型の閉ループ弾性体の両端を振ることにより大きな扇ぎ動作を実現する新たな瞬発力発生機構を開発し, この機構に基づいて, 全長およそ 300[mm]に対して厚さわずか 13[mm]という非常に薄型のキック遊泳ロボット (Flaggyo) を開発した (図4). この遊泳ロボットは, 流体抵抗の少ない薄型ボディでありながら水を強く蹴ることができるため, 短時間で最大秒速 2.18 体長 (0.74[m/s]) に達する急推進に加え, 最大角速度 289[rad/s]に達する急旋回の能力も併せ持つ. 停止状態から一蹴りで様々な方向に進むことができる俊敏性を有する遊泳ロボットである.

一方, ウォータポンプによって水をロボット内部に取り込み, フレキシブルな可動ノズルを介して噴射する, 新しいタイプの遊泳ロボット (Dringyo) も開発した (図5). 噴流の射出方向を変化させることで, 直進のみならず高い方向転換の性能も備えた水中移動体が実現された.

#### ④ 飛行ロボット

ボディの中心軸に対して非対称に配置された翼によって, シングルロータでありながら, 垂直方向のみならず, 水平方向にも安定して飛行する現象を見出した. この現象に基づき, 小型で簡素な機構でありながら, 十分な移動能力を有する新しい小型飛行ロボッ

ト (Switchou) を開発した (図6).

## (2) マニピュレータ

俊敏性を有する小型移動体のみならず，ロボットマニピュレータへも研究が進展した．わずか4分の1秒の間に約1[m]離れた場所にある物体を素早く捕獲できる新しいカメレオン型のシューティングマニピュレータ (Shootica) を開発した．

なお，このカメレオン型シューティングマニピュレーションに関しては，遠隔にある狭いループにアームを伸ばして通す，新しいタスク (ルーティング) の実現に成功している．このルーティングを利用すれば，遠隔にある物体に対して，紐を通すことで，大きな引っ張り力を加えることが可能となる．また，軟固体内部へのリーチングへと研究が進展している．

## (3) 連続体ロボティクスの理論

閉ループ弾性体の準静的形状遷移シミュレーション解析により，有益な力学的知見が得られ，その知見に基づき，閉ループ弾性体を利用した瞬発力発生装置の設計法を開発した．また，閉ループ弾性体の新しい形状遷移モデルを考案し，瞬発力を得る際の特徴的な現象である飛び移り座屈を定式化することに成功した．さらに，閉ループ弾性体の準静的形状遷移をシミュレートする計算アルゴリズムを開発した．飛び移り座屈のような不安定現象を含む形状遷移も安定して計算することが可能となった．

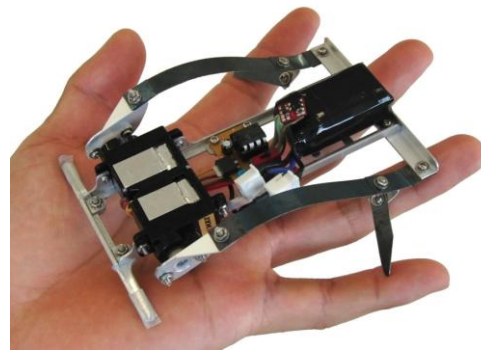


図1：走行ロボット Robotic Jerboa

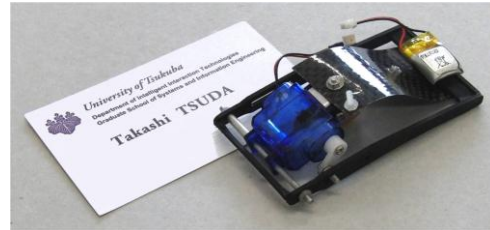


図2：跳躍移動ロボット Kikker

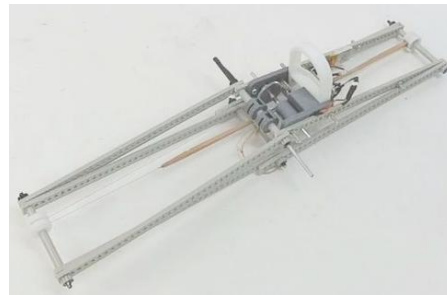


図3：ゴムを利用した跳躍移動ロボット Jumpanta



図4：キック遊泳ロボット Flaggyo

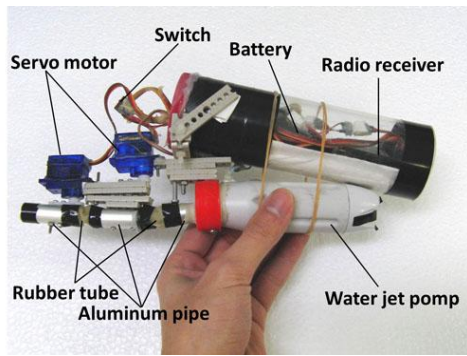


図5：フレキシブル噴射管を有するウォータージェット推進遊泳ロボット Dringyo

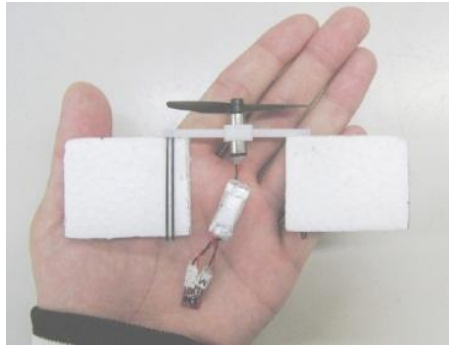


図6：シングルロータ飛行ロボット Switchou

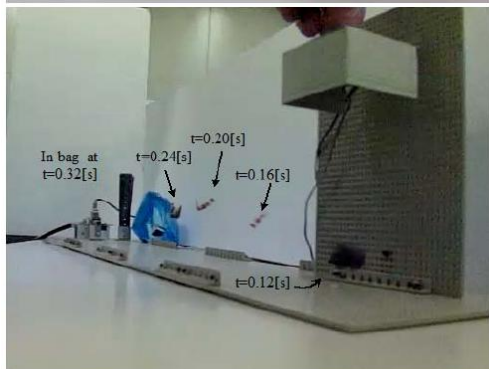
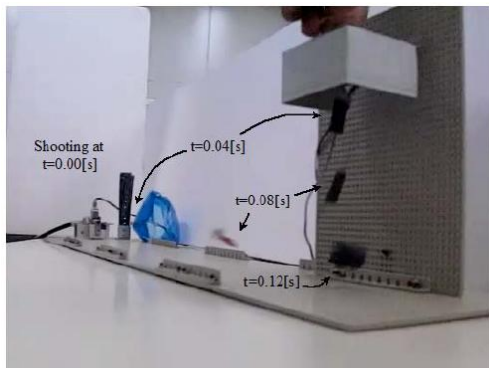


図7：カメレオン型シューティングマニピュレータ Shootica

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① 石田祐太, 望山洋: ゴムを利用したパンタグラフ型繰り返し瞬発力発生機構, 日本ロボット学会誌, 31-5, 2013. (査読有り・掲載決定)
- ② T. Hatakeyama and H. Mochiyama: Shooting Manipulation Inspired by Chameleon, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 18-2, 527/535, 2013. DOI: 10.1109/TMECH.2012.2225110. (査読有り)
- ③ T. Tsuda, H. Mochiyama and H. Fujimoto: Quick stair-climbing using snap-through buckling of closed elastica, Proc. of the 2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2012), 368/373, 2012. (査読有り)
- ④ M. Nagasawa, T. Sekiya, N. Takesue and H. Mochiyama: Propose of V-shaped closed elastica and its application to fish-like robot, The 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2012), 207/214, 2012. (査読有り)
- ⑤ S. Imai and H. Mochiyama: Basic performance of flat kick-swimming robot powered by impulse, The 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2012), 297/304, 2012. (査読有り)
- ⑥ 木下文, 望山洋: 閉ループ弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構の設計, 第17回ロボティクス・シンポジウム, 84/91, 2012. (査読有り)
- ⑦ 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄: 物体投擲のためのねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置, 日本ロボット学会誌, 29-1, 47/54, 2011. (査読有り)
- ⑧ T. Hatakeyama and H. Mochiyama: Shooting Manipulation System with High Reaching Accuracy, Proc. of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), 4652/4657, 2011. (査読有り)
- ⑨ A. Yamada, Y. Sugimoto, H. Mochiyama and H. Fujimoto: An Impulsive Force Generator Based on Closed Elastica with Bending and Distorsion and Its Application to Swimming Tasks, Proc. of the 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics

- and Automation (ICRA2011), 957/962, 2011. (査読有り)
- ⑩ Naoyuki Takesue, Youichi Hata, Tatsuhiko Sekiya: Development of fish-like robot with elastic fin, Industrial Robot: An International Journal, Vol.38 Iss.3, 252/257, 2011. (査読有り)
- ⑪ Takashi Tsuda, Hiromi Mochiyama, Hideo Fujimoto: Robotic Jerboa: A Compact Bipedal Kick-and-Slide Robot Powered by Unidirectional Impulse Force Generators, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), 2523/2524, 2010. (査読有り)
- ⑫ Atsushi Yamada, Hiroshi Mameda, Hiromi Mochiyama, Hideo Fujimoto: A Compact Jumping Robot utilizing Snap-through Buckling with Bend and Twist, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), 389/394, 2010. (査読有り)
- ⑬ A. Yamada, Y. Sugimoto, H. Mameda, H. Fujimoto, H. Mochiyama: An Impulsive Turning Mechanism for Swimming Robots based on Repeated Snap-through Buckling, Proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), 253/260, 2010. (査読有り)
- ⑭ A. Yamada, H. Mameda, H. Fujimoto and H. Mochiyama: A Compact Jumping Robot based on Continuous Snap-through Buckling for Hybrid Environment, Proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), 245/252, 2010. (査読有り)
- ⑮ Takashi Tsuda, Hiromi Mochiyama and Hideo Fujimoto: The Compact Kick-and-Slide Robots Powered by Unidirectional Impulse Force Generators, Proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), 229/236, 2010. (査読有り)
- ⑯ Yoichi Hata, Tatsuhiko Sekiya, and Naoyuki Takesue: Development of fish-like robot with elastic fin, Proceedings of 13th International Conference on Climbing and Walking

Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2010), 340/347, 2010. (査読有り)【Innovation Award 2010 - For practical innovation in the field of robotics (Highly commended)】

[学会発表] (計 32 件)

- ① 高原駿, 望山洋: フレキシブルな噴射管を有するウォーターポンプジェット推進機構を持つ小型遊泳ロボット, 第 24 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-F07, 2013/5/23, つくば国際会議場, 茨城.
- ② 中嶋拓人, 望山洋: 軟固体内部へのロバーストリーチングのためのニードルシューティングシステム, 第 24 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-F06, 2013/5/23, つくば国際会議場, 茨城.
- ③ T. Hatakeyama and H. Mochiyama: Biologically Inspired Artificial Suction Tongue, 第 24 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-A12, 2013/5/23, つくば国際会議場, 茨城.
- ④ 山口裕樹, 望山洋: シングルロータ小型飛行ロボットの非対称胴翼による横方向運動, 第 24 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-G01, 2013/5/23, つくば国際会議場, 茨城.
- ⑤ 望山洋: ゴムの力学的機能を活用したロボット, 第 13 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 (SI2012), 2E2-6, 2012/12/19, 福岡国際会議場, 福岡.
- ⑥ 高須亮輔, 望山洋: 閉ループ弾性体の準静的形状遷移に対する高速シミュレーション手法, 第 13 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 (SI2012), 2E2-5, 2012/12/19, 福岡国際会議場, 福岡.
- ⑦ 望山洋, 武居直行, 石橋良太: 機構知とは何か?, 第 13 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 (SI2012), 2E1-1, 2012/12/19, 福岡国際会議場, 福岡.
- ⑧ 石田祐太, 望山洋: ゴムを利用したパンタグラフ型跳躍ロボット, 第 23 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-D02, 2012/5/29, アクトシティ浜松, 静岡. 【日本機械学会第 91 期ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰ベストプレゼンテーション表彰】
- ⑨ 今井翔大, 望山洋: 急旋回能力を有する瞬発力発生機構を用いた薄型キック遊泳

ロボット, 第 12 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, 2011/12/23, 京都大学, 京都.

- ⑩ 高須亮輔, 望山洋: 閉ループ弾性体を用いた瞬発力発生機構の形状遷移モデリング, 第 12 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, 2011/12/23, 京都大学, 京都.
- ⑪ 今井翔大, 望山洋: 閉ループ弾性体による瞬発力発生機構を用いた薄型キック遊泳ロボット, 第 23 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011/5/28, 岡山コンベンションセンター, 岡山県.
- ⑫ 畠山友史, 望山洋: 高いリーチング精度を有するシューティングマニピュレーションシステム, 第 23 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011/5/28, 岡山コンベンションセンター, 岡山県.
- ⑬ 津田剛志, 望山洋, 藤本英雄: 一方向回転駆動による繰返し片方向瞬発力発生機構, 第 11 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(SI2010), 2010/12/24, 東北大学, 宮城県仙台市. .

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: シューティングマニピュレータ

発明者: 望山洋, 畠山友史

権利者: 筑波大学, 種類: 特許

番号: 2012-162296

出願年月日: 2012. 7. 23

国内外の別: 国内

名称: 瞬発力発生機構および瞬発力発生方法

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: 2010-289887

出願年月日: 2010. 12. 27

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ情報:

・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>

報道関連情報:

・カメレオン型シューティングマニピュレータの研究結果の斬新さが認められ、IEEE Spectrum 電子版に掲載された。

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/japanese-research>

hers-developing-robotic-chameleon-tongue-first

国民との科学技術対話活動:

・国内最大級の科学技術コミュニケーションイベントであるサイエンスアゴラにおいて、2 年連続 (2011, 2012) で研究成果のロボットを使った工作教室プログラム「ジャンプロボットを作ろう」を実施した。2011 年の実施の際には、来場者人気投票第 3 位という高い評価を得た。

招待講演:

・望山洋: 柔軟ロボット学の構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門東北地区特別講演会「VR とロボティクス」, (2011 年 8 月 30 日, 東北大学)

・望山洋: 柔軟ロボット学の構築, システム制御情報学会 UFA 研究分科会第 13 回例会「材料の変形特性を活かしたものづくり」(2010 年 10 月 5 日, 大阪大学中之島センター)

解説記事:

望山洋, 山田篤史, 藤本英雄: 閉ループ弾性体による瞬発力発生機構, 日本ロボット学会誌 (特集「機構の知と技」), 29-6, 492/495, 2011.

産学連携活動:

望山洋: 柔軟ロボット学によるロボットモーション革命, 筑波大学新技術説明会, 2011/7/19, 科学技術振興機構, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

望山 洋 (MOCHIYAMA HIROMI)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 40303333

(2) 研究分担者

武居 直行 (TAKESUE NAUYUKI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号: 70324803

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

※海外の大学へ移籍したため、平成 24 年度のみ研究分担者として参加。所属等は当時の情報。

(3) 連携研究者

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