

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6月10日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560248

研究課題名（和文） 機能性微細構造を表面に集積化した小型移動ロボットの研究

研究課題名（英文） Study on miniature mobile robots with functional microstructures integrated on their surfaces

研究代表者

鈴木 健司 (SUZUKI KENJI)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：50251351

研究成果の概要（和文）：

本研究では、昆虫の表面の構造や機能を規範とし、MEMS技術を利用して撥水性表面、付着性表面、気流センサなどを製作し、これらの機能をロボットの表面に集積化することにより、壁面移動ロボット、水面移動ロボット、反射により行動するロボットなどを開発した。また、小型昆虫に特有な羽ばたき飛翔を規範として、トンボ型羽ばたき飛翔ロボットを開発した。これらのロボットは、狭所や被災地での情報収集等への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：

In this study, functional microstructured surfaces, such as hydrophobic surfaces, adhesive surfaces and air flow sensors, were developed using MEMS techniques, inspired by structures and functions of insects. These functional devices were then integrated on the materials for robots, and a variety of mobile robots were assembled, such as wall-climbing robots, water-walking robots, flapping-wing robots, and robots acting on reflex. These robots would have potential applications for gathering information in narrow spaces or stricken area.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：MEMS, ロボティクス, バイオミメティクス, 機能表面, 表面張力

1. 研究開始当初の背景

近年、昆虫の構造や機能を工学的に解明し、ロボットなどの人工物の設計に応用する「昆虫ミメティクス」の分野が注目されている。昆虫は、サイズが小さく、単純な構造と制御系により多様な環境に適応しており、従来の機械とは異なる設計原理で行動していると

考えられる。昆虫の表面は硬い外骨格と柔軟なヒンジで構成されており、高速で効率のよい運動を実現している。また、脚や翅などの表面は様々な形状の細毛や突起で覆われており、吸着性、濡れ性、摩擦などの機械的特性を制御し、様々な機能を発現している。また昆虫の感覚毛は、気流センサ、ジャイロセ

ンサなどの役割を果たしている。さらには、タマムシやモルフォ蝶の翅のように表面構造によって光の反射や干渉を制御して鮮やかな発色を行うものもある。サイズの小さい昆虫では体積に対する表面積の割合が増加するため、表面の構造や機能が昆虫の運動に大きな影響を与えている。

このような昆虫の表面構造を模倣した機能性表面、センサ等は、これまでも多数開発されてきた。しかし、従来の小型ロボットの研究では、個々の機能表面やセンサ等の部品を組み合わせてロボットを製作してきた。この方法では、手作業による組み立てが必要であり、小型化には限界がある。より小型で高機能なロボットを実現するためには、ロボットの表面部材の中に複数の機能部品を集積化することが有効である。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3点である。

- (1) 昆虫などの小型生物の表面構造を規範とし、MEMS技術を応用して、ロボットの表面部材の中に可動機構、センサ、機能性マイクロ表面などを一体化して組み込む技術を開発する。
- (2) 表面部材の折り曲げなどを利用して、立体的なロボットの機構を構成する技術を構築する。
- (3) ロボットの表面機能を利用して、壁面歩行、水面移動などを行う小型移動ロボットを開発する。

3. 研究の方法

- (1) ロボットの表面を構成する部材として十分な強度を持ち、MEMS加工との相性がよく、折り曲げなどの塑性加工が可能な材料の選定を行う。金属やポリイミドなどを検討する。
- (2) 表面部材の折り曲げ加工の容易さ、精度、強度などの評価を行う。
- (3) 選定した部材に機能性表面、センサ、ヒンジ機構などを作り込み、各要素の特性評価を行う。複数の要素を集積化する際に相互にダメージを与えないように、製作プロセスを検討する。
- (4) 表面部材に様々な要素を集積化した水面移動ロボット、壁面歩行ロボット、羽ばたき飛翔ロボットなどを製作し、性能評価を行う。水面移動ロボットでは、脚の表面構造と、接触角、支持力、引き離し力、水の抗力等の関係を調べ、ロボットの性能向上を目指す。壁面歩行ロボットでは、壁面に垂直方向の付着力、および接線方向の摩擦力の評価を行う。

4. 研究成果

本研究では、昆虫を規範として、付着性表面、撥水性表面、気流センサ等を表面に集積化した各種ロボットを製作し、ロボットの小型化、

高機能化を実現した。

(1) 壁面歩行ロボットの開発

昆虫が平滑な壁面を歩行する際には、脚先から *arolium* と呼ばれる柔軟な付着パッドを出して壁面に密着させ、さらに付着パッドから粘性の高い液体を分泌し、液体の表面張力、粘性力、パッドの摩擦力などを利用して付着していることが知られている。本研究ではアリの付着パッドを参考にして、ロボットの足底に装着する付着パッドを MEMS 技術を用いて製作した。付着面の材料としては、濡れ性の高いガラスと、柔軟で壁面との密着性が高い PDMS の2種類を用いた。製作したパッドを平滑なガラス面に押し付け、垂直方向、接線方向の付着力を評価した結果、ガラスパッドでは純水を供給することにより垂直方向に大きな付着力(メニスカス力)が得られ、PDMS パッドでは接線方向に大きな摩擦力が得られることを確認した。次に2種類のパッドの特性を生かして、6脚の壁面歩行ロボットの製作を行った。接線方向の付着のために各脚の足底に PDMS パッドを配置し、垂直方向の付着のために腹部にガラスパッドを1枚搭載し、0.3 μ lの純水を供給した。脚の機構にはリンク機構を用いて、対角の3本の脚を同時に上げる交互三脚歩行を行わせるようにした。ロボットの質量は、モータを含めて9.5 gとした。ロボットをガラスの垂直面及び天井面に付着させ歩行実験を行った結果、どちらの面においても歩行に成功した。歩行の様子を図1に示す。

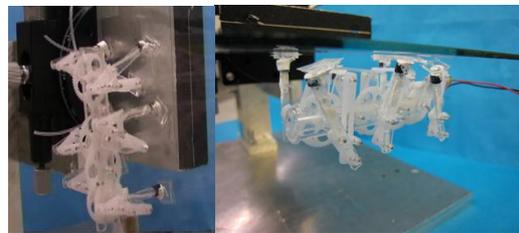


図1 壁面歩行ロボット

(2) 水面移動ロボットの開発

アメンボの脚には無数の細かい毛が存在しており、さらに脚表面にロウのように水をはじく物質を分泌することにより撥水性を高めており、支持脚が水面を破ることなく表面張力を利用して水面に浮かぶことができる。本研究では、アメンボの支持脚を参考にして、真鍮ワイヤの表面にフェムト秒レーザー加工機を用いて微細な溝加工を施し、撥水剤を塗布することによって、撥水性の高い支持脚の開発を行った。溝の間隔を25 μ mとしたとき、接触角が約155°、転落角は約20°の撥水面が得られた。製作した撥水脚を用いて、水面に脚を押し付けたときの支持力と、水面から引き上げる際の引き離し力の測定を行った。その結果、長さ25mmの脚で、

6mN の支持力、0.5mN の引き離し力が得られた。製作した支持脚を用いて、水面移動ロボットを開発した。ロボットは 6 脚を持ち、アメンボと同様に前・後脚は水面上での支持に用い、中脚を推進用として、リンク機構により駆動した。ロボットの外寸法は 20×40×10 mm であり、機体のフレームは、厚さ 0.5mm のカーボン板をフェムト秒レーザで加工することにより軽量化を行った。DC モーターとバッテリーを搭載し、自立移動が可能であり、全体の質量は 4.39 g である。図 2 に製作した水面移動ロボットの写真を示す。水面での移動実験を行った結果、ロボットは表面張力で水面に浮き、平均の 59.2 mm/s の速度で移動することができた。

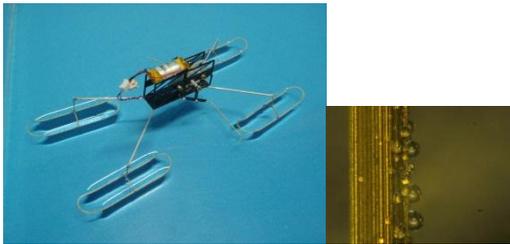


図 2 水面移動ロボットと撥水脚

(3) 気流センサを用いたロボットの開発

昆虫の表面に存在する感覚毛は、気流の速度や加速度を検知するセンサの役割を果たし、昆虫の行動の制御に用いられている。例えばコオロギの腹部末端には尾葉と呼ばれる 1 対の突起が存在し、その表面に太さ数 μm の感覚毛が数百本生えている。感覚毛は、気流によって一方向のみに倒れるようになっており、長さや方向の異なる多数の感覚毛が存在することにより風向や風速を検知し、適切な逃避行動を行っている。本研究では、コオロギの感覚毛を参考にして、タッチセンサ式の気流センサを開発した。ロボット胴体の材料となる真鍮の基板に、絶縁膜をはさんで銅薄膜によるカンチレバー構造を MEMS 技術により製作した。梁に気流が加わると、基板と梁が接触して通電し、気流を認識する。1 つ 1 つのセンサは気流の有無を検知するだけであるが、長さや向き異なる多数のセンサを集積化することにより気流の強さや方向の検知が可能である。風洞実験により気流センサを評価した結果、長さ 1mm, 1.25mm, 1.5mm の梁を用いて、それぞれ 1.1m/s, 0.7m/s, 0.1m/s の気流を認識することができた。

次に、梁長さ 1mm, 1.5mm の 2 種類の気流センサをロボット表面に実装し、気流の強さに応じて 2 種類の歩行動作を行うロボットを製作した。ロボットの移動方式は、昆虫と同様な交互 3 脚歩行を採用した。ロボットの小型化を実現するために、真鍮板をロボット

胴体部を展開した形状にエッチング加工し、センサと制御回路の配線を一体成型し、折り曲げることによってロボットを組み立てた。ロボットの写真を図 3 に示す。ロボットの動作実験を行った結果、プログラムにより、弱い風に対して 2 秒間の歩行、強い風に対して 5 秒間の歩行を行わせることができた。

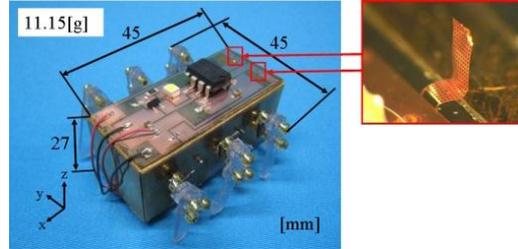


図 3 気流センサを搭載したロボット

(4) 羽ばたき飛翔ロボットの開発

昆虫は羽ばたきを利用して空中を自由に飛翔し、ホバリングや急旋回など大型の鳥とは異なる高度な飛翔を行っている。本研究では、昆虫の中でも 4 枚の翅を独立に動かして高度な飛翔を実現しているトンボを規範とし、共振を利用して効率良く羽ばたく 4 枚翼の飛翔ロボットを開発した。翅の付け根に薄板を挟むことにより翅の固有振動数を下げ、ロボットに搭載可能な小型モータにより約 11Hz で共振が発生するように調整した。製作したロボットの全体図を図 4 に示す。共振翅を用いると薄板が大きく変形し、羽ばたき振幅が非共振翅と比べて 10deg ほど大きくなることを確認した。

次に、このロボットの前後の翅の位相差を 90 度ずつ変化させて自由飛翔実験を行い、位相差が飛翔性能に及ぼす影響を調べた。高速度カメラを用いて飛翔軌跡を撮影した結果、位相差 0 度のときは上昇飛翔、位相差 90 度のときは水平飛翔が可能であるが、位相差 180 度では安定した飛翔が行えず、落下することが確認された。風洞を用いてロボットの流体力を測定した結果、位相差が 0 度のときに発生する流体力が最も大きく、180 度の場合が最も小さくなった。また、スモークワイヤにより翼回りの流れを可視化したところ、位相差 180 度の場合、前翅と後翅の流れが干渉している様子が確認された。

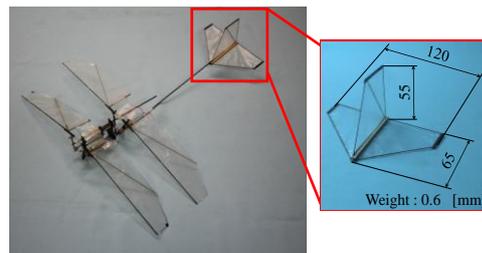


図 4 羽ばたき飛翔ロボット

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6件)

- (1) 柏原稔樹, 野中昂平, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文: MEMS 技術を利用した気流センサの研究 —昆虫型ロボットへの搭載—, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 4, 2013, pp.411-416.
- (2) Kensaku Kudo, Kenji Suzuki, Akihiro Nakamura, Shinichiro Ito, Hideaki Takanobu, Hirofumi Miura, “Study on Resonant-Driven Flapping-Wing Robot,” Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 査読有, Vol.3, No.1, 2013, pp.45-50.
- (3) 工藤憲作, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文: 共振を利用したはばたき飛翔ロボットの研究, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, Vol.78, No.792, 2012, pp.2914-2923.
- (4) 鈴木健司: 表面張力を利用した機能性表面の創成と機械設計, トライボロジスト, 査読無, Vol. 57, No. 2012, pp.540-546.
- (5) 山下瑛礼, 島田裕司, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文: トンボを規範としたはばたき機構の研究 (MEMS 技術を用いた機体の製作), 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, Vol. 76, No.768, 2010, pp.1949-1951.
- (6) 坂井恵盛, 小池裕之, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文: 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究 (脚への作用力の検討と水陸両用ロボットの試作・実験), 日本機械学会論文集(C編), 査読有, Vol. 76, No.768, 2010, pp.1952-1954.

[学会発表] (計21件)

- (1) 鈴木健司: 生物に学ぶ表面構造と機能,, 日本機械学会 IIP2013 情報・知能・精密機器部門講演会, 基調講演, 2013/3/22.
- (2) 小林憲司, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文: 昆虫を規範とした壁面移動ロボットの研究 —液体の粘性を利用した壁面付着—, 日本機械学会 IIP2013 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 2013/3/22, 東京, pp.259-263.
- (3) 工藤憲作, 鈴木健司, 中村晃洋, 伊藤慎一郎, 高信英明, 三浦宏文: 昆虫を規範としたはばたきロボットの研究 —翅のはばたき位相差が飛翔性能と流体力に及ぼす影響—, 日本機械学会 IIP2013 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 2013/3/21-22, 東京, pp.264-269.
- (4) 工藤憲作, 鈴木健司, 中村晃洋, 伊藤慎一郎, 高信英明, 三浦宏文, 昆虫規範型ロボットのはばたき位相差が飛翔特性に及ぼす影響, 第1回 生物の優れた機能か

ら着想を得た新しいものづくりシンポジウム, 京都市, 2012/12/21, S4.

- (5) Kenji Suzuki, Biomimetic Water Strider Robots with Microstructured Hydrophobic Legs, The 11th International Symposium on Advanced Technology (ISAT2012), October 30, 2012, Hachioji, pp.3-4.
- (6) K. Kudo, K. Suzuki, H. Takanobu, and H. Miura: Study on Resonant-Driven Flapping-Wing Robot, The Fifth International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2012), August 25 – 28, 2012, Taipei, Taiwan, pp.83-87.
- (7) A. Nakamura, S. Ito, K. Kudo and K. Suzuki, Aerodynamic characteristics of the wings of a robot dragonfly in flight conditions, The Fifth International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2012), August 25 – 28, 2012, Taipei, Taiwan, p.88.
- (8) M. Tsukakoshi, K. Suzuki, H. Seki, H. Takanobu and H. Miura: Water Strider Robot with Microfabricated Hydrophobic Legs, 2012 ASME-ISPS/JSME-IIP Joint International Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), June 18-20, 2012, Santa Clara, USA, pp.306-308.
- (9) 八木翔吾, 尾上知廣, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 壁面歩行ロボットの研究 —液体供給機構を持つ付着パッドの開発—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 浜松, 2012/5/28, 1A1-S11 (1)-(4).
- (10) 工藤憲作, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 共振を利用した小型はばたき飛翔ロボットの研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 岡山, 2011/5/27, 1A2-O05 (1)-(4).
- (11) 工藤憲作, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 共振を利用したはばたき飛翔ロボットの研究 —共振する翅の飛翔特性評価—, 第26回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会講演会資料集, 東京, 2011/3/26, pp.21-22.
- (12) 野中昂平, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 気流センサを表面実装した昆虫規範型ロボットの研究, 日本機械学会 IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2011/3/23, pp.165-170.
- (13) 山下瑛礼, 島田裕司, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, トンボを規範としたはばたき機構の研究, 日本機械学会 IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2011/3/23, pp.175-180.
- (14) 丸山雄也, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 超撥水表面を用いた水面移動ロボットの研究 —表面微細構造と撥水性につ

- いて一, 日本機械学会 IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2011/3/23, pp.199-204.
- (15) 野中昂平, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, MEMS 技術を利用した気流センサの研究—昆虫型ロボットへの搭載—, 第 16 回ロボティクスシンポジウム, 鹿児島県指宿市, 2011/3/14, pp.329-334.
- (16) 野中昂平, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, MEMS 技術を利用した気流センサの研究—昆虫型ロボットへの搭載—, 第 2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2010/10/15, 松江市, MNM-4B-6.
- (17) 柏原稔樹, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, MEMS を用いた静電容量式力覚センサの研究, 第 2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2010/10/14, 松江市, MNM-P5-1.
- (18) 關宏隆, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, アリを規範とした壁面歩行ロボットの研究—付着パッドの特性評価—, 第 2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2010/10/14, 松江市, MNM-P5-5
- (19) 山下瑛礼, 島田裕司, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, トンボを規範としたはばたき機構の研究 (MEMS 技術を用いた機体の製作), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集, 京田辺市, 2010/9/17.
- (20) 坂井恵盛, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究 (微細構造を持つ脚の製作), 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集(8), 2010/9/8 名古屋市, pp.223-224.
- (21) 佐々木聡, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 昆虫の反射を規範とした六脚歩行制御の研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 旭川, 2010/6/15, 1A1-F21.

[図書] (計 1 件)

- (1) Kenji Suzuki: Bio-Inspired Water Strider Robots with Microfabricated Functional Surfaces, Biomimetics, Learning from Nature, Chapter 18, Edited by Amitava Mukherjee, ISBN 978-953-307-025-4, INTECH, 2010, pp.363-384.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

- (1) 工学院大学工学部機械システム工学科マイクロシステム研究室ホームページ, <http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1041/>

- (2) ぶらーりキャンパス, 研究編 工学院大, 昆虫型マイクロロボット, 無駄ない動きに注目, 東京新聞, 2013/4/22, p.22.
- (3) つるの剛士の地球はどこでも遊園地, セミロボット・プロジェクト始動!, 小学館 Be-Pal, 2013 年 2 月号 pp.68-69, 2013 年 3 月号, pp.56-57.
- (4) 特別展「びっくり! 昆虫ワンダーランド」2012/7/27-9/2, 岐阜市科学館.
- (5) 2011 ネクスト・ネイチャー・プロダクツ—生物に学ぶ、次世代ものづくり技術展—, 東京ビッグサイト, 2011/11/16~18.
- (6) 特別展「ふしぎ! 昆虫パワー」, 2011/7/16~9/4, 宮崎県総合博物館.
- (7) ロボット 昆虫から生まれたヒント, 小学館こども大百科, 2011/11/30, p.383.
- (8) アインシュタインの眼 『夏の自由研究スペシャル!』, NHK BS-hi, 2010 年 8 月 7 日 12:00~13:29.
- (9) 「昆虫ロボット」, 読売テレビ ニュース ten!, 2010 年 9 月 29 日.
- (10) 江戸東京博物館, 大昆虫博, 2010/6/22-9/5
- (11) 名古屋市科学館, ふしぎ! 昆虫パワー, 2010/7/17-8/31
- (12) 科学技術館, いきものから学ぶロボット展, 2010/8/7-8/22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健司 (SUZUKI KENJI)
工学院大学・工学部・教授
研究者番号: 50251351

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし