

平成 22 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～ 2009

課題番号：19360121

研究課題名 (和文) マイクロ機能表面を有する昆虫規範型ロボットの研究

研究課題名 (英文) Study on insect-inspired robots with micro functional surfaces

研究代表者

三浦 宏文 (MIURA HIROFUMI)

工学院大学 顧問

研究者番号：50010682

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、アリの壁面歩行、アメンボの水面移動と脚の表面構造の関係を調査し、MEMS 技術により昆虫と同様な機能を持つ表面構造を製作し、性能評価を行った、また、これらの表面構造をロボットの脚に用いることにより、壁面移動ロボット、水面移動ロボットの開発を行った。

壁面歩行ロボットに関して以下の成果が得られた。

- (1) アリの付着パッドを規範としてガラス及びPDMSの付着パッドをMEMS技術により製作し、付着力の測定を行った。その結果、ガラスパッドはメニスカス力による垂直方向の付着力が大きく、PDMSは接線方向の摩擦力が大きいことを確認した。
- (2) 2種類のパッドの特性を生かしたロボットを製作し、壁面、天井面での歩行に成功した。

水面移動ロボットに関して以下の成果が得られた。

- (3) MEMS技術を用いて表面に様々なマイクロ構造を持つ撥水性支持脚を開発し、脚の水面における支持力と引き離し力、推進力の測定を行った結果、理論予測とよく一致した。
- (4) 開発した支持脚を用いて2種類の水面移動ロボットを製作した。脚の共振を利用したロボットでは、一つのモータにより直進、左右の旋回動作を実現した。折り紙構造を用いたロボットでは、本体の機構を一体化し、水陸両用の移動を実現した。

研究成果の概要 (英文)：

Two kinds of insect-inspired miniature robots with micro- and nano- functional surfaces have been studied. One is a wall-climbing robot based on adhesive mechanism of ants. Adhesive pads made of glass and PDMS were fabricated using MEMS processes and adhesive properties were investigated. Then, a hexapod robot with glass and PDMS pads was developed. The robot successfully walked on vertical and inverted glass surfaces. The other robot is water strider robot that is able to stay and move on the surface of water using surface tension force. Various kinds of supporting legs with hydrophobic microstructures were developed utilizing MEMS techniques. Lift, pull-off and thrust forces of these legs on the surface of water were investigated experimentally. Then, two kinds of autonomous water strider robots with hydrophobic legs were developed. Actuation utilizing resonant vibration and “origami structure” that is assembled by folding a flat plate were proposed. The robots successfully moved forward and also made left/right turns on the surface of water.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

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：ロボティクス，昆虫，マイクロマシン，表面張力，マイクロ・ナノデバイス，  
表面・界面物性，撥水性，メニスカス力

1. 研究開始当初の背景

昆虫は、表面の微細構造により様々な機能を実現している。例えば昆虫が垂直な壁を歩行する際には、足の表面の細かい毛や付着パッドと呼ばれる柔軟な構造と、足の先端から分泌する液体の表面張力と粘性の効果により付着力を得ていることが知られており、詳細なメカニズムの解明が進められている。また、アメンボの脚先端は、表面の濡れにくい性質と毛に覆われた複雑な形状の相乗効果により撥水性を高めおり、表面張力によって水面に立ち、移動することができる。このような表面の微細構造によって発現される機能は、昆虫の行動や生命維持のために重要な役割を果たしていると考えられる。これらの機能を手のひらサイズの小型ロボットに組み込むことによって、シンプルな機構により優れた機能を発現するロボットが実現できると考えられる。特に小型ロボットでは、体積に対する表面積の割合が増加するため、表面の性質を利用することが有効である。昆虫が表面の性質を利用して壁面や水面の移動能力を獲得し、行動範囲を格段に広げていることを考えれば、小型ロボットにも同様な機能を持たせることによって移動範囲が広がり、環境のモニタリングなど応用分野の拡大が期待できる。

このような表面の機能を実現する手段として、MEMS 技術は強力なツールとなり得る。ミクロンオーダーの微細構造を比較的広い面

積に一括して精度よく製作することが可能であり、層構造を積み重ねることにより、複雑な構造を作り込むことができる。近年、昆虫型ロボットが注目されるようになり、六本足のロボットや水面移動ロボットなどが盛んに研究されるようになってきているが、MEMS 技術とロボット技術を融合し、表面の微細構造を MEMS 技術により作り込んだロボットはほとんど見られない本研究は、MEMS 技術を用いて表面に微細構造を作りこむことにより、ロボットに新たな機能を付加することを特徴としている。

2. 研究の目的

本研究は、昆虫の構造と機能を規範として、手のひらサイズの小型移動機構と、MEMS 技術で製作されるマイクロ・ナノスケールの表面構造を併せ持ち、両者の機能を有機的に結合させた自立型移動ロボットを開発することを目的とする。

具体的には、脚先端に付着性の微細構造を有し、昆虫と同様の原理で垂直な壁面や天井面を移動する壁面歩行ロボット、および脚先端に撥水性の微細構造を持つアメンボ型の水面移動ロボットの開発を行う。さらに開発したロボットを利用して、壁面付着、水面移動のメカニズムの解明を行う。

3. 研究の方法

平成19年度は、壁面歩行ロボット、水面移動ロボットを実現するための要素技術

の研究を行った。壁面歩行ロボットに関しては、昆虫の典型的な歩容である「交互三脚歩行」（三本ずつ交互に脚を上げる歩行）を実現する機構を、シミュレーションなどを用いて開発した。また、足底から液体を分泌して付着力を制御するために、MEMS技術により流路と液体を出す穴を加工した「付着パッド」を開発した。製作した付着パッドを用いて、付着力、引き離し力、推力の測定を行った。

水面移動ロボットに関しては、アメンボと同様に表面張力で水面に浮遊するロボットの機構設計と、新しい駆動原理の提案を行った。また、MEMS技術を利用して金属ワイヤの表面に微細な凹凸や細毛構造を加工し撥水性を高める技術を開発した。また、撥水性支持脚の水面での支持力および引き離し力の理論を導き、その検証を行うための実験を行った。

平成20年度および21年度には、前年度までに開発した要素技術を組み合わせ、壁面歩行ロボット、水面移動ロボットの開発と評価を行った。

壁面歩行ロボットについては、MEMS技術を利用して、シリコンゴムの一種であるPDMSとガラスの2種類の付着パッドを製作し、付着性能の評価を行った。また、2種類の付着パッドを用い、それぞれの特性を生かした壁面歩行ロボットを設計、製作を行い、歩行性能を評価した。

水面移動ロボットについては、MEMS技術により開発した撥水性支持脚を用いて2種類の水面移動ロボットを設計、製作した。ロボットの開発を通して、新規なロボットの製作手法、および駆動方法を提案し、ロボットの駆動実験により、これらの手法の有効性を検証した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 壁面歩行ロボットに関する成果

###### ① 2種類の付着パッドの開発。

MEMS技術を用いて、親水性材料でメニスカス力による大きな付着力が期待できるガラスパッドと、柔軟で壁面との密着性が高く、大きな摩擦力が期待できるPDMS (Polydimethylsiloxane) パッドの2種類を製作した。付着パッドは二層に分けて製作した。1層目の付着面にはガラスまたはPDMSを用い、

液体を吐出するための直径0.15mmの穴を6個形成した。2層目にはPDMSを用いて液体を流すための流路を形成した。2つの層を接着し、流路にチューブを接続することにより、チューブから供給した液体を表面の穴から出せるようにした。図1に製作したパッドの写真を示す。

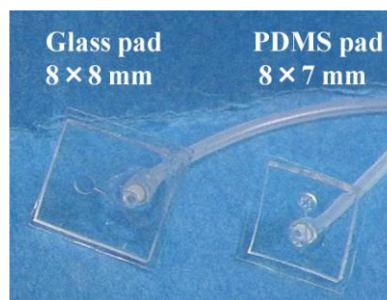


図1 ガラスパッドとPDMSパッド

###### ②付着力、摩擦力、引き離し力の測定

2種類の付着パッドを用いて、ガラス表面における垂直方向、接線方向の付着力を測定した。各付着面にはマイクロピペットにより水を供給した。図2は、PDMSパッドの接線方向の静止摩擦力を示したものである。水の供給量によらず、ほぼ一定の摩擦力を示し、垂直方向の付着力に比べて非常に大きな値を示した。この結果よりPDMSの付着の主原因は固体間の直接接触による凝着力と考えられる。

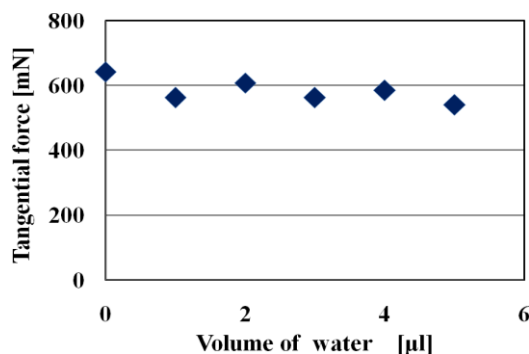


図2 PDMSの接線方向の付着力

図3はガラスパッドの垂直方向の付着力を示している。ガラスパッドでは、水を供給しない場合ほとんど付着力は働かないが、水を0.3μl程度与えると大きな付着力が発生し、水の量を増加させると付着力は減少した。また、接線方向の付着力は非常に小さな値とな

った。以上の結果より、ガラスパッドは付着力の主原因はメニスカス力であると考えられる。

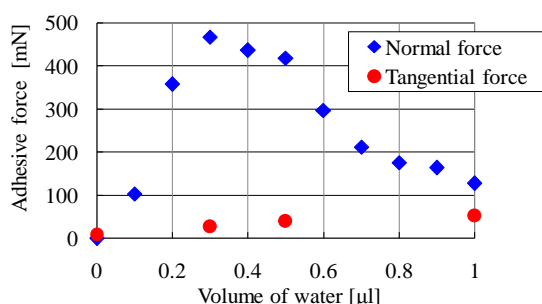


図3 ガラスパッドの付着力

### ③壁面歩行ロボットの開発

製作した2種類の付着パッドの特性を活かして、壁面および天井面を歩行する6脚歩行ロボットを製作した。各脚の先端にはPDMSパッドを配置し、壁に平行な摩擦力により推進力を得られるようにした。また、垂直方向の付着力を得るために、腹部にガラスパッドを1枚搭載し、0.3μlの水を供給した。脚にはレバークランク機構を用い、1つのDCモータでクランク軸を回転させることにより対角の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。本ロボットにより、ガラスの垂直面および天井面における歩行に成功した。



図4 壁面歩行ロボット

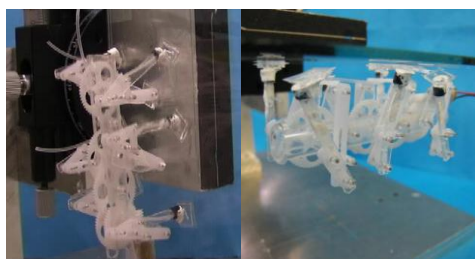


図5 壁面歩行および天井歩行

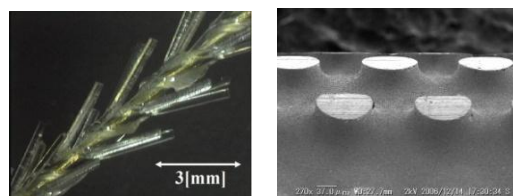
### (2) 水面ロボットに関する成果

#### ①細構造を有する撥水性支持脚の開発

撥水性の物質は、表面に凹凸構造を設けることにより撥水性が強められる。そこで、MEMS技術を用いて、表面に微細な凹凸構造を持つ撥水性支持脚を開発した。図6(a)はPDMSによる楕円形の構造を金属ワイヤにまきつけたものである。図6(b)は直径1mmの真鍮線の円筒面に、フォトリソグラフィにより5回に分けて円形パターンを転写し、ウェットエッチングにより凹凸構造を作製したものである。これらの凹凸加工により、接触角120度~135度の撥水性の脚が得られた。

#### ②支持力、引き離し力、推進力の測定

図7は図6(b)の支持脚(長さ30mm)を水面に押しつけるときの支持力と、水から引き上げるときの引き離し力を測定した結果である。支持力の測定値は理論値とよく一致しており、水面から約5mmの深さまで押しつけたときに最大6mNが得られた。これより、1m当たり約0.2Nの支持力が得られることが確認された。また引き離し力は約2mNとなり、理論値よりも小さい値が得られた。これは理論が水の変形を2次元で近似しているのに対し、実際には3次元の変形が生じるためと考えられる。



(a) 楕円形構造の巻きつけ (b) エッチング

図6 表面に凹凸構造を持つ支持脚

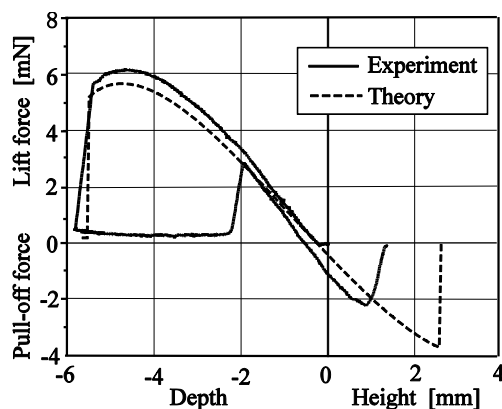


図7 支持力と引き離し力の測定

また、支持脚を水面で水平に移動したときの推進力(=水の抵抗力)を測定した。その結果脚を深くまで押しつけ、高速で移動させるほど推進力が大きくなり、条件によって水中よりも水面の方が大きな推進力が得られることが確認された。

### ③水面移動ロボットの開発

表面に微細な凹凸構造を加工した撥水性支持脚を用いて、表面張力で水面に浮き、自立的に移動する2種類のロボットを製作した。一つは、12本の放射状の脚を持ち、脚の振動を利用して移動するものである。ロボットの外観を図8に示す。アクチュエータには偏心質量を持つ振動モータを用い、PWM(Pulse Width Modulation)制御により振動数を制御した。本ロボットの駆動法として「共振を利用した駆動法」を提案した、振動モータの回転により支持脚に共振が発生し、円軌道を描いて振動し、水面を蹴ることでロボットが移動する。また、表1に示すように各脚の長さが異なっており、振動数によって共振する脚が変化し、109Hzで直進、115Hzで右旋回、132Hzで左旋回が可能であった。屋外で水面移動実験を行った結果、プログラムに従って自立的に振動数を変化させ、水面上で直進、右旋回、左旋回を順次行わせることに成功した。

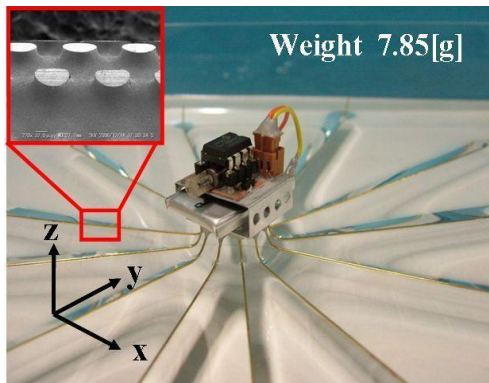


図8 共振を利用した水面移動ロボット

表1 各脚の役割と固有振動数

Leg No.	Role	Length	Resonant frequency
L-1,6, R-1,6	Support	85mm	—
L-3,4, R-3,4	Forward	90mm	109Hz
R-2,5	Left turn	80mm	115Hz
L-2,5	Right turn	70mm	132Hz

もう一種類のロボットとして、6本の脚にそれぞれ2自由度のアクチュエータを配置し、表面張力による水面移動と陸上歩行が可能なロボットを製作した。ロボットの写真を図9に示す。胴体と支持脚の間の関節は2自由度のジンバル機構を採用し、2本のBMF(トキ・コーポレーション社製: Bio Metal Fiber)により楕円駆動を行った。水面に接する脚の全長は1060mm、最大支持力16gfとした。ロボットの質量は10.28gである。脚の先端部にはパッシブな回転自由度を設け、揺れる水面に追従させるようにした。また、軽量化のため、一枚の真鍮の薄板を用いて、ロボット本体を展開した形状をMEMS技術により加工し、これを折り曲げることにより立体的な機構を製作した(図10)。この「折り紙構造」を用いることによって、一つの平面部材から立体機構が得られ、可動部は材料の弾性変形を利用することにより摩擦のない運動が実現できる。この構造により、ねじや軸受を使用せず機構の一体化を図り、加工精度の向上と軽量化を実現することができた。

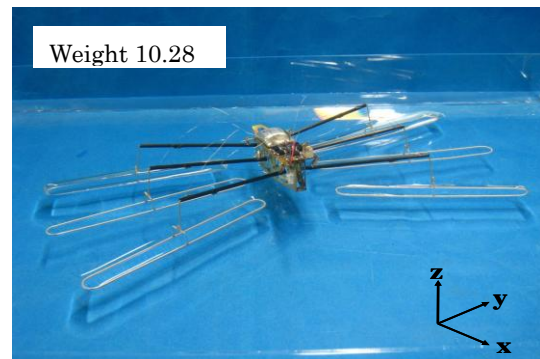


図9 水陸両用ロボット

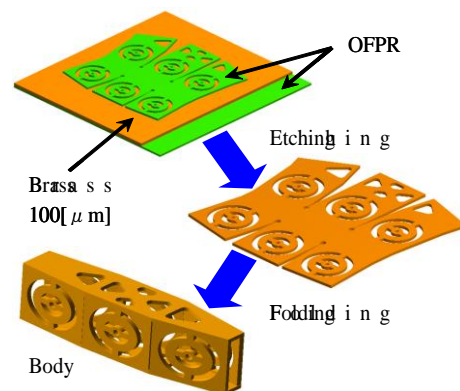


図10 折り紙構造

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① Kenji Suzuki, Hiroaki Homma, Tatsuya Murayama, Satoshi Fukuda, Hideaki Takanobu and Hirofumi Miura, Electrowetting-Based Actuation of Liquid Droplets for Micro Transportation Systems, JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 4巻1号, 2010年, pp.365-372.
  - ② Kenji Suzuki, Shusuke Nemoto, Takahiro Fukuda, Hideaki Takanobu, and Hirofumi Miura, Insect-Inspired Wall-Climbing Robots Utilizing Surface Tension Forces, JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 4巻1号, 2010年, pp.383-390.
  - ③ 鈴木健司, 小池裕之, 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, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 75巻, 2009年, pp.656-665.
  - ④ K. Suzuki, H. Yamada, H. Miura and H. Takanobu, Self-assembly of three di-mensional micro mechanisms using thermal shrinkage of polyimide, Microsystem Technologies, 査読有, 13巻8-10号, 2007年, pp.1047-1053.
  - ⑤ H. Yamada, K. Suzuki, H. Miura and H. Takanobu, Self-Assembly and Magnetic Actuation of Three Dimensional Micro Hinged Mechanisms, 電気学会論文誌センサ・マイクロマシン準部門誌, 査読有, 127巻4号, 2007年, pp.207-213.  
(他2件)
- [学会発表] (計19件)
- ① 鈴木健司, 表面張力を利用した昆虫規範型マイクロロボット, 第24回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会 招待講演, 2010年3月22日, 東京.
  - ② Kenji Suzuki, Biologically Inspired Water Strider Robot with Microstructured Supporting Legs, 1st Joint Symposium of Kogakuin University and Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science (KU-ICCAS; JS1-2009), 2009年12月9日, 東京.
  - ③ Kenji Suzuki, Shusuke Nemoto, Takahiro Fukuda, Hideaki Takanobu and Hirofumi Miura, Insect-Inspired Wall-Climbing Robots Utilizing Surface Tension Forces, 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2009), 2009年6月18日, 筑波.
  - ④ 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(折り紙構造による機構の一体化), 第14回ロボティクスシンポジア, 2009年3月16日, 北海道・登別.

- ⑤ 根元秀輔, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, メニスカス力を利用した壁面歩行ロボットの研究, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2008), 2008年3月18日, 東京.
- ⑥ K. Suzuki, H. Takanobu, K.Noya, H.Koike and H.Miura, Water Strider Robots with Microfabricated Hydrophobic Legs, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS07), 査読有, 2007年10月30日, San Diego, USA.
- ⑦ 鈴木健司, 小池裕之, 野谷耕太, 高信英明, 三浦宏文, マイクロ加工表面を有する水面移動ロボットの研究, 日本機械学会2007年度年次大会, 2007年9月11日, 大阪. (他12件)

[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,, INTECH, 2010年, 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

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1041/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三浦 宏文 (MIURA HIROFUMI)  
工学院大学・顧問  
研究者番号: 50010682

### (2) 研究分担者

鈴木 健司 (SUZUKI KENJI)  
工学院大学・工学部・教授  
研究者番号: 50251351  
高信 英明 (TAKANOBU HIDEAKI)  
工学院大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40308177

### (3) 連携研究者

なし