

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420223

研究課題名(和文) 昆虫を規範とした表面機能集積型ロボットの研究

研究課題名(英文) Study on insect-inspired robots with surface functions 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、昆虫の表面を参考にして撥水性、付着性などの機能を持つ表面を創成し、これらをロボットの表面に集積化することにより、昆虫の機能を再現した小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、撥水性の脚を持つ水面移動ロボット、付着性の足底パッドを用いた壁面歩行ロボット、気流を制御するための微細構造を翅に加工した羽ばたき飛翔ロボットを開発し、表面機能の評価、およびロボットの性能評価を行い、提案手法の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Objectives of this study are to create insect-inspired functional surfaces, and to develop miniature mobile robots with various functions integrated on their surfaces. We developed a water-walking robot with water-repellent legs, a wall-climbing robot with adhesive foot-pads, and a flapping-wing robot with micro-structured functional wings. The surface functions and performances of the robots were evaluated, and the effectiveness of the proposed methods were verified.

研究分野：マイクロ・ナノ工学

キーワード：バイオミメティクス 機能表面 移動ロボット MEMS 微細加工 表面張力 濡れ性

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」が注目を集めている。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動作している。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、摩擦特性などの機械的な特性を制御している。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も果たしている。サイズの小さい昆虫では体積に対する表面積の割合が大きくなるため、表面の構造や機能は昆虫の行動に重要な役割を果たしている。

昆虫や微小な生物の表面の構造や機能を人工的に再現する研究は、これまでも多数行われている。例えば、昆虫の感覚毛を規範とした気流センサ、ヤモリの脚の付着原理を規範とした壁面歩行ロボットなどが開発されている。しかし、従来の研究では、個々の表面構造やセンサ等を独立した部品として製作し、これらを組み合わせてロボットやマイクロシステムが製作されてきた。この方法では、手作業による組み立てが必要で、小型化には限界があった。そこで本研究では、機能性の表面構造やセンサを、ロボットの表面部材の中にあらかじめ組み込んだ状態で製作し、その部材の折り曲げ等によって立体的なロボットを構成する。このことにより、組み立て工程が不要となり、機能と構造の一体化による小型化、集積化、高精度化が実現される。

2. 研究の目的

本研究は、以下の3点を目的とする。

(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、機能性ナノ・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開発する。

(3) ロボットの表面機能を利用して、壁面歩行、水面移動、羽ばたき飛翔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、および組立時の曲げ加工や可動部として利用可能なヒンジ部の材料、構造を設計し、強度、耐久性、加工精度などの評価を行う。

(2) 濡れ性、付着性、摩擦力、流体力などを制御するための微細構造を持つ表面を製作し、各機能の性能評価を行い、表面の構造と機能

の関係を明らかにする。

(3) ロボットの構造部材に(2)の表面機能やセンサ等を集積化するための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の自立移動ロボットを製作し、性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) 緒言

生物の表面は毛や突起などの複雑な微細構造で覆われており、その構造によって様々な機能を発現していることが知られている。本研究では、MEMS 等のマイクロ加工技術を利用し、昆虫の表面を模擬した微細構造を加工し、生物の機能を再現することにより、表面の構造と機能の関係を明らかにする。具体的には昆虫の脚の付着性や撥水性、飛翔昆虫の羽の微細構造による気流の制御などに着目し、これらの構造 MEMS 技術などを用いて再現し、種々の機能を発現させる。また、製作した微細構造をロボットの表面に集積化して小型ロボットを組み立て、羽ばたき飛翔、水面移動、壁面歩行など昆虫と同様な運動機能を有する自律移動ロボットを開発する。これらのロボットの開発を通して、生物の表面機能の原理の解明を行うとともに、新たな表面設計の指針を抽出することにより、工業製品などへの応用が可能になる。また開発したロボットは、狭所や危険な場所での情報収集や、医療、ヘルスケア等の分野への応用が期待される。

(2) 水面移動ロボット

本節では、アメンボを規範とし、表面張力により水面上に浮遊し、自立的に移動するロボットに関する成果を述べる。

水面上での体重支持と推進の原理

図1は、水面上のアメンボの脚を円柱としてモデル化したものであり、円形断面に働く力を示している。単位長さの脚に働く支持力は、浮力成分と表面張力成分の和で表される。浮力成分は、固体と液体の界面に働く圧力  $p$  の鉛直成分を積分したものであり、脚の上部の空間 ( $S_1$  部分) から排除された水の重量に等しい。また表面張力成分は固体・液体・気体の境界である3重線に沿って、水面の接

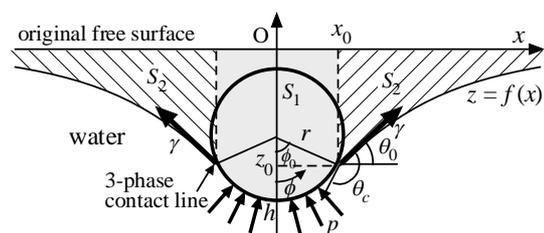


図1 アメンボの脚の理論モデル

線方向に働く表面張力の鉛直成分であり水面の窪み ( $S_2$ ) 部分の水の重量に等しい。以上より、「水面上の物体に働く支持力は、物体によって排除された水の重量に等しい」というアルキメデスの原理が、表面張力成分を含めて成り立つことが導かれる。また、浮力成分は脚の直径によって増加するが、表面張力成分の最大値は  $145.5\text{mN/m}$  ( $20^\circ$ ) 一定であり、脚の直径にはよらないため、脚が細くなるほど表面張力成分の割合が増加する。

また、図2のように、水面上で円柱状の脚を水平に動かしたときの流体抵抗は、 $0 \sim 300\text{ mm/s}$  の速度で実験を行った結果、圧力抵抗が支配的になることがわかった。脚を水平に動かすと水面は図2のように変形し、水面の窪みと盛り上がりを考慮した投影面積  $A = (d+h)l$  を用いると、水面から受ける抵抗は投影面積  $A$  と速度  $U$  の2乗に比例し、抗力係数は、実験より  $0.125$  と求められた。また、脚表面がある程度撥水性が高ければ、流体抵抗は接触角にはよらないこと、撥水性が低いと水没しやすくなること、水没すると流体抵抗が減少することなども確認された。

アメンボは、前脚と後脚で体重を支持し、中脚で水面の窪みを後方に蹴って駆動力を得ている。駆動脚では、脚を横に長く張り出して投影面積を稼ぎ、水面を破らない範囲で深く速く蹴ることが有効であり、支持脚は投影面積を小さくして抵抗を減らすことが有効である。

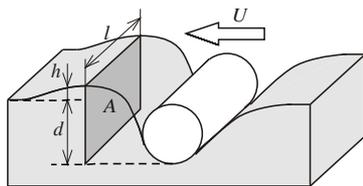


図2 脚に働く流体抵抗

#### 水面での支持力と抗力の測定

アメンボの脚を模擬したワイヤ状の撥水脚を製作し、水面上での支持力と抗力を測定した。支持脚は図3のような楕円形とし、直径  $1\text{mm}$  の真鍮線にフッ素系撥水剤を塗布したものを、全体の長さが  $130\text{mm}$  となるようにして、幅  $w$  を変えたものを数種類製作した。撥水剤を含むワイヤの直径は  $1.1\text{mm}$ 、表面の接触角は  $145^\circ$  である。製作した支持脚を水面に対して  $0.5\text{ mm/s}$  と  $2.5\text{ mm/s}$  の速さで垂直に押し付けていったときの最大支持力の測定結果を図4に示す。 $0.5\text{ mm/s}$  の結果は計算値とよく一致しており、準静的に押し付けているとみなすことができる。脚の幅が  $10\text{mm}$  以下になると支持力は低下した。

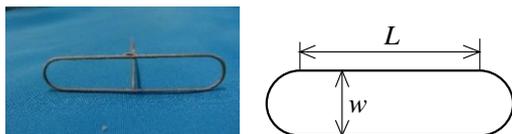


図3 撥水性の支持脚

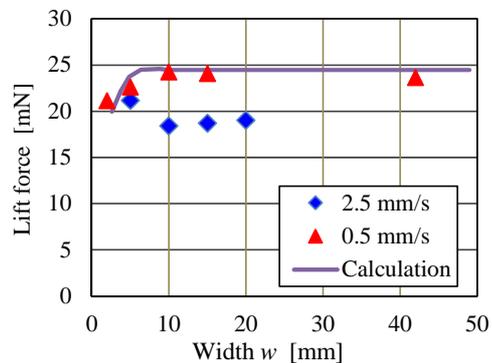


図4 撥水性の脚の支持力

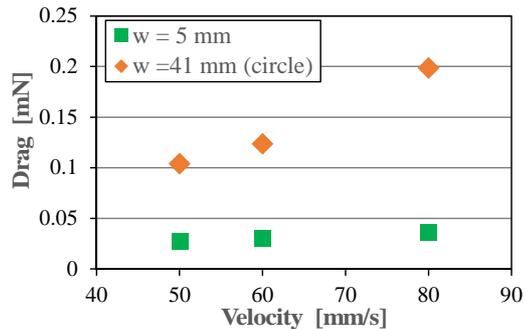


図5 水面上での抗力 (深さ  $3\text{mm}$ )

これは楕円形の脚の内側の水面が下降し、水面の傾斜角  $\theta$  が減少すること、および脚の曲線部の曲率が増加して沈みやすくなることが原因として考えられる。また、 $2.5\text{ mm/s}$  の速度で押し付けたときには、支持力が低下した。これは慣性力などによって水面の窪みが維持できず水没しやすくなるためと考えられる。

図5は支持脚を水面上で水平に動かしたときの抗力の測定結果である。 $w = 41\text{mm}$  の円形の脚では  $w = 5\text{mm}$  の細長い脚に比べて投影面積が大きくなるため抗力が大きく、速度に対する増加も大きいことが確認された。

#### 水面移動ロボット

上記の解析結果をもとに、水面移動ロボットの設計、製作を行った。支持脚は、質量と抗力を小さくし、支持力を大きくするため、直径  $0.5\text{mm}$ 、長さ  $130\text{mm}$  の真鍮線を幅  $10\text{mm}$  の楕円形に曲げたものを4脚用いた。4脚による静的な支持力は  $86.5\text{ mN}$  ( $8.8\text{gf}$ ) であり、ロボットの重量  $4.39\text{ gf}$  の2倍となっている。中脚には、チェビシェフリンク機構を用いて駆動した。チェビシェフリンク機構はリンクの先端がD字形の軌道を描き、直線部が低速、曲線部が高速で動くという特徴を持つ。この性質を利用して、脚を水没させずに水深  $3.5\text{ mm}$  の位置で高速で水をかき、水面より上を低速で戻すようにリンクの長さを調整した。ロボットはDCモータとバッテリーを搭載し自立移動が可能である。水面移動実験を行った結果、 $4\text{ Hz}$  で水面をかき、平均速度  $60\text{ mm/s}$  で移動することが確認された。

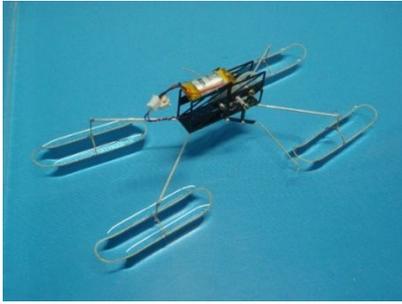


図6 水面移動とポット

### (3)羽ばたき飛翔ロボット

#### 昆虫の羽ばたき飛翔

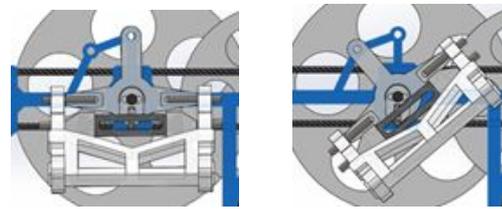
微小な生物である昆虫は、羽ばたきを利用して空中を自由に飛翔し、ホバリングや急旋回など大型の鳥とは異なる高度な飛翔を実現している。サイズが小さくなれば、揚力が十分に得られなくなるため、固定翼に比べて羽ばたきによる飛翔が有利になると考えられる。本研究では、昆虫の中でも4枚の翅を複雑に動かして高度な飛翔を実現しているトンボの羽ばたき飛翔に着目した。トンボは、翅の羽ばたき（フラッピング）、ねじり（フェザリング）、前後動作（リードラグ）をそれぞれの筋肉によって独立に制御し、さらに状況に応じて羽ばたき平面角度や前後の翅の位相差を変化させることによって多彩な飛翔を実現している。本研究ではトンボの飛翔を規範として、羽ばたき平面角度の調整機構を搭載し、体軸角度を変えずに推進力の変更できる機構を製作し、離陸、水平飛行、垂直上昇を自立的に行うロボットの開発を行った。また、翅の翅脈構造が、羽ばたき時の翅の変形および発生する推進力に及ぼす影響を調べた。さらに、トンボの翅の表面に見られる微小な突起を加工した翅を製作し、微小構造が流体力に及ぼす影響を調べた。

#### 羽ばたき平面角度変更機構

図7に体軸角に対するはばたき平面の角度を変更可能な機構を示す。DCモータによりクランクを回転させ、その円運動をスライダの往復運動とそれに直交する方向の翅の揺動運動に変換する機構を用いている。翅のはばたき角は水平から $\pm 30^\circ$ になっており、羽ばたき平面角度は体軸に対して $0^\circ, 50^\circ, 90^\circ$ の角度で固定できるようになっている。

#### 翅脈形状の検討

トンボの翅の付け根部分には三角室と呼ばれる剛性の高い部分があり、はばたき時に翅の付け根の変形を抑えることで、変形を飛行に適したものにしていくと考えられる。このような翅脈構造が飛翔性能に及ぼす影響を調べるため、図8のように放射状に翅脈をもつ翅Aと三角室を再現した翅Bを製作した。翅は厚さ $8\mu\text{m}$ のポリエチレンフィルムを用い、翅脈は直径 $0.5\text{mm}$ のカーボンロッドとス



(a)  $\alpha = 90^\circ$  (b)  $\alpha = 50^\circ$   
図7 羽ばたき平面角度変更機構

チレン樹脂を用いた。製作した翅を図7の羽ばたき機構に取り付け、はばたき周波数を $0\sim 23\text{ Hz}$ まで変化させて発生する流体力を測定した。流体力は、羽ばたき機構を3分力計に固定し、羽ばたき平面に平行な力と垂直な力を測定して合力を求めたが、発生する力の向きは羽ばたき平面にほぼ垂直で前方に向かう力であったため、これを推力と呼ぶことにする。推力の測定結果を図9に示す。

$3.7\text{V}$ の電池により駆動可能なはばたき周波数 $23\text{ Hz}$ のとき、放射状の翅脈の翅Aの推力は $53\text{ mN}$ 、三角室を再現した翅Bは推力は $68\text{ mN}$ であり、推力は $28\%$ 向上した。また、羽ばたき動作を高速カメラで観察した結果、翅Bの方が翅Aに比べて翅先端部の変形が大きいことが確認された。

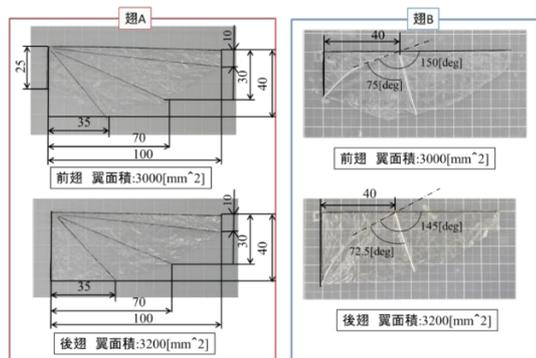


図8 翅脈の形状

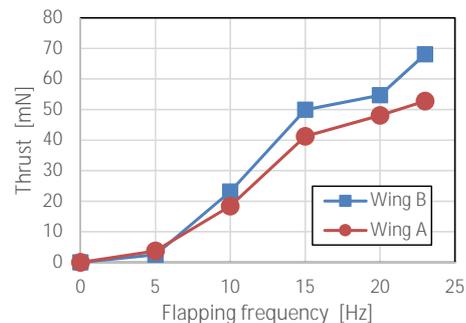


図9 羽ばたき周波数と推力の関係

#### 飛翔実験

図7の羽ばたき平面角度調整機構と図8の三角室を再現した翅Bを組み合わせて、自立的に離陸し垂直上昇を行うロボットと、水平飛行を行うロボットを製作した。垂直上昇用のロボットは羽ばたき平面角度を $0^\circ$ に設定し、ローリングとピッチングを抑えるため、機体の上部と下部に補助翼を取り付けた。ま

た、水平飛行用のロボットは羽ばたき平面角度を  $90^\circ$  に設定し、ヨーイングとピッチングを抑えるため、機体後部に垂直尾翼と水平尾翼を取り付けた。2種類のロボットの写真を図10に示す。ロボットには、3.7Vのリチウムポリマー電池と無線で操作可能なスイッチを搭載した。ロボットの質量は垂直上昇用が7.3g、水平飛行用が7.1gとなった。満充電時の電池の電圧は約4.1Vで、羽ばたき周波数約25Hzとなるため、図9の結果より推力によって自重を支持可能である。

飛翔実験を行った結果、垂直上昇では、地面に静止した状態から2.6秒間で1.75mの高さまで上昇し、32秒間滞空した。また、水平飛行では、地面に静止した状態から斜めに飛び立ち、1秒間に4mの距離をほぼ水平に飛行した。羽ばたき平面角度を調整可能な機体により、水平飛行、垂直上昇の両立が可能であることが実証された。

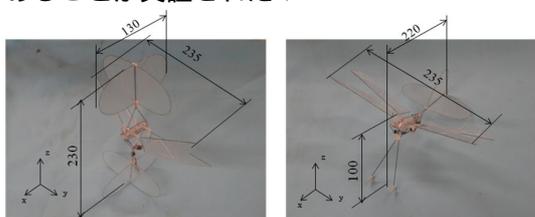


図10 羽ばたき飛翔ロボット

#### 翅の表面の微細構造の影響

トンボの翅の表面には、微細なとげのような構造が存在することが知られており、飛翔性能に影響を与えていることが考えられる<sup>(2)</sup>。図11は、ミヤマアカネ (*Sympetrum pedemontanum*) の翅の表面のSEM写真である。翅脈の上に根元の直径が約  $30\mu\text{m}$ 、高さ約  $50\mu\text{m}$  の棘状の構造が、前翅は約  $300\mu\text{m}$ 、後翅は約  $200\mu\text{m}$  の間隔で並んでいることが観察された。このような微細構造が飛翔性能に与える影響を調べるため、MEMS技術を利用して表面に微細な突起を持つ翅を製作した。厚さ  $50\mu\text{m}$  のポリイミドフィルム上に、厚さ  $50\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$  のフォトリソを塗布し、間隔  $250\mu\text{m}$  の格子点状に並べた直径  $30\mu\text{m}$  の円形パターンを露光、現像して、円柱状の構造を製作した。図12に製作した翅と微細構造の顕微鏡写真を示す。翅の大きさは長さ  $140\text{mm}$ 、翼弦長  $40\text{mm}$  であり、 $94\text{mm} \times 40\text{mm}$  の範囲に微細構造が製作されている。翅のフレームは直径  $1\text{mm}$  のCFRPを用いた。実際の円柱構造の測定値は、直径が約  $50\mu\text{m}$ 、高さが約  $60\mu\text{m}$  と  $105\mu\text{m}$  であった。

微細構造を加工した翅（高さ  $50\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$ ）と加工していない翅をそれぞれはばたき機構に取り付け、はばたきにより発生する推力を三分力計で測定した。本実験で用いたはばたき機構は、DCモータの回転を、

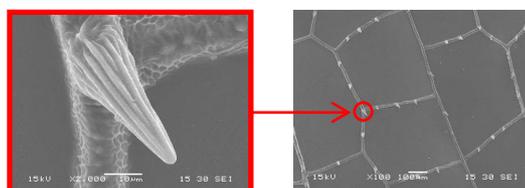


図11 トンボの翅の棘のSEM画像

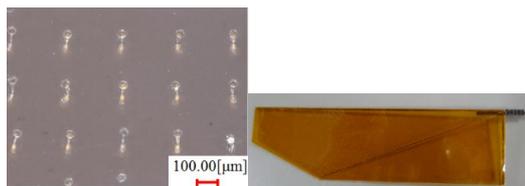


図12 微小突起を有するポリイミド翅

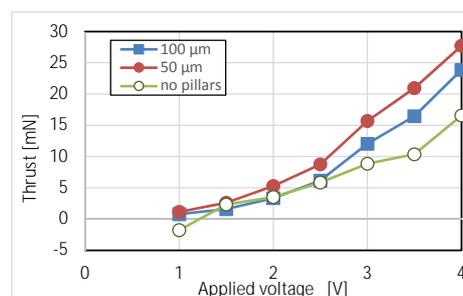


図13 推力の測定結果

てこ・クランク機構により翅の揺動運動に変換するものである。図13に推力の測定結果を示す。微細構造を加工した翅は、加工していない翅に比べて推力が最大で1.7倍ほど大きくなった。また、トンボの棘に近い高さ  $50\mu\text{m}$  の翅は、高さ  $100\mu\text{m}$  のものに比べて推力が大きくなった。微細構造によって推進力が増加するメカニズムについては本実験では解明できなかったが、微細構造によって翼のまわりの渦の生成が促進されるとする報告があり<sup>(2)</sup>、推進力の増加に関係していると考えられる。

#### (4) 結言

水面移動ロボットに関して、撥水性の脚の支持力、引き離し力、流体抵抗の発生原理を理論と実験により明らかにし、その結果に基づいて駆動脚、支持脚の形状の最適化し、水面移動ロボットの設計、製作を行った。流体抵抗は、投影面積一定のもとでは、移動方向に垂直な直線部分を多くすることで増加する傾向があることがわかった。製作したロボットは  $31.3\text{mm/s}$  の速度で水面を自立的に移動した。

羽ばたき飛翔ロボットに関して、羽ばたき平面角度を調整可能な機体と、トンボの三角室と呼ばれる翅脈構造を再現した翅を用いることにより、垂直上昇と水平飛行が可能なるロボットを製作した。翅脈構造の違いにより羽ばたき時の翅の変形状態が変わり、推力が増加することが確認された。また、翅の表面にトンボと同様な微細構造を加工することにより、推力が増加することが確認された。

<参考文献>

- (1) Song Y. S. and Sitti M., IEEE Transactions on Robotics, 23 (3), 2007, pp.578-589
- (2) Hashimoto H., et al., ASME-ISPS /JSME- IIP Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2012, pp.300~302.

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3件)

Fujie H., Oya K., Tani Y., Suzuki K., and Nakamura N., Stem Cell- Based Self-Assembled Tissues Cultured on a Nano-Periodic-Structured Surface Patterned Using Femtosecond Laser Processing, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 10, No.1, 2016, pp. 55-61.

鈴木健司, アメンボ型水面移動ロボット, 日本ロボット学会誌, 解説, 査読無, Vol.33, No.1, 2015, pp.25-29.

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.

[学会発表](計21件)

阿久津祥一, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 微細加工による撥水性表面の創成, 日本機械学会精密機器部門講演会, H-P-2, 2016/3/15, 東洋大学(東京都).  
一瀬 R.和喜, 岩部純一, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, アメンボを規範とした水面移動ロボットの開発, 第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2015/10/30, PN-022, 朱鷺メッセ(新潟県).

Oya K., Tani Y., Koizumi K., Sugita N., Suzuki K., Nakamura N., and Fujie H., Tensile properties of stem cell-based self-assembled tissue (scSAT) bio-synthesized on nanoperiodic structured substrate, Summer Biomechanics, Bioengineering, and Biotransport Conference, 2015/6/19, Snowbird (USA).

鈴木英之, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, トンボを規範とした飛翔ロボットの研究 パッシブなフェザリング機構の搭載, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1- R01, 2015/5/18, みやこめっせ(京都府).

Kobayashi K., Suzuki K., Takanobu H. and Miura H., Study on insect-inspired wall climbing robot: Adhesion using viscous liquid, Proceedings of the Sixth International

Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, 2014/11/15, Honolulu (USA).

Iwabe J., Suzuki K., Takanobu H. and Miura H., Biologically inspired water strider robot with microstructured hydrophobic legs, Proceedings of the Sixth International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, 2014/11/15, Honolulu (USA).

鈴木健司, 生物に学ぶ微細構造と表面機能, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014/9/8, 東京電機大学(東京都)(招待講演)

神保敬志, 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飛翔ロボットの研究 翼形状が推進力に及ぼす影響, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014/6/28, 富山市総合体育館(富山県).他13件

[図書]なし

[産業財産権]なし

[その他]

・ホームページ等

マイクロシステム研究室

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

工学院大学 機能表面研究センター

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1036/>

・受賞

鈴木健司, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門 2014 年度功績賞, 2015 年 9 月 14 日

・報道

鈴木健司, 科学の峰々75 “バイオミメティクス”と昆虫を規範とした“マイクロロボット”の研究(上)/(下), 科学機器, No.782, 2013 年 8 月, pp.18-23 / 9 月 pp.12-17.

鈴木, 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 年 4 月.

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

(4) 研究協力者 なし