マイクロ受動脚による低摩擦ラバー構造体の実現

斉 藤 文 孝* 鈴 森 康 一*

Low Friction Rubber Structure Consisting of Micro Passive Walking Legs

Fumitaka Saito* and Koichi Suzumori*

The final goal of this work is to develop functional rubber sheets with micro rubber structures such as friction free, adhesion, and impact adsorption rubbers, etc. We report a new micro rubber 4-legged structure realizing miniaturization and integration to achieve very low friction rubber. First, flexible passive walking by the 4-legged structure is designed and analyzed. Then, we apply this mechanism to rubber structural sheets with 120-legged passive legs. The 120-legged sheet is analyzed by non-linear FEM, fabricated by micro rubber molding process and tested. In the various experiments, multi-legged passive walking by the micro rubber structural sheet is realized successfully.

Key Words: Soft Mechanism, Micro Machine, Passive Walking

1. 緒 言

自然界に存在する多くの生物は、柔軟で微細な構造を持ち、摩擦制御や粘着制御、衝撃吸収、発色のようなマクロ機能を実現している[1]~[4]。一例として、ヤモリの足先には微細毛が存在し、これが高い粘着力を実現している[5][6]。てんとう虫は吸盤状と針状の構造体を持ち、特殊な分泌液により摩擦を制御している[7]。近年このような観点からマイクロ歩行ロボットの接地面構造の研究が進められている[8]~[12]。

本研究の最終目標は、生物が持つ微細な脚や吸盤構造を参考にした微細構造をモルディングによりゴム表面に一括成形し、低摩擦、粘着、発色などのマクロ機能を実現する機能性ゴムシートを開発することである。そして、機能性柔軟素材として皮膚や手足などロボットの表面に使用することを目的としている。

一方、近年、アクチュエータなしで歩行を実現させる受動歩行の研究が盛んに進められているが、いずれも機械的なリンク機構で構成されている[13]~[16]。これまでに柔軟な微細構造の構築と受動歩行ロボットの開発はそれぞれ多くの研究が行われている。

これに対して筆者らは、ゴムの弾性構造体による受動歩行を目指している[17]~[22]。Fig. 1に目標とする構造体の一例を示す。この例では $100 \times 100 \times 1$ [mm]程度の寸法であり、ラバーシート表面に数 $10 \mu\text{m}$ ~数 $100 \mu\text{m}$ の大きさを持った多数の

Fig. 1 Conceptual structure of friction free rubber

微細受動脚を有するゴム構造体を目指している。この構造体をゴムの一体成形プロセスにより作り出すことによって組み立てプロセスが不要となる。微小領域における各微細脚の受動歩行動作により、ラバーシート全体が自立的かつ継続的に移動し、これが疑似低摩擦ゴム表面の実現につながると考えている。これにより摺動性が必要とされるシリンダ等の無摺動シール材としての応用が期待される。

本構造の利点として、駆動源やリンク機構を用いていないため、量産化・小型化が容易となり、無数微細脚が構築されたラバーシートに応用しやすい点が挙げられる。

本論文では、小型・簡単形状である横揺れ運動を利用した微細ゴム4脚構造体を新たに考案し、まず、その4脚受動歩行の可能性について述べる。次に、この構造体から構成される120脚ラバーシートの解析、試作、実験を行い、その多脚化の可能性について述べる。

原稿受付 2009年12月18日

*岡山大学

*Okayama University

■ 本論文は提案性で評価されました。

2. 微細ゴム 4 脚構造体による受動歩行

2.1 微細ゴム 4 脚構造体の考案

筆者らは新しい受動歩行メカニズムを適用した低摩擦機能を実現するラバー構造体を提案している。本論文では **Fig. 2** に示すようにゴムシートへ拡張するための基本ユニットとして、横揺れ運動を利用した微細ゴム 4 脚構造体を新たに考案した。拡張するにあたり、基本ユニットには簡単かつ微細な形状が必要となる [19]。

進行方向に拡張した多脚受動歩行ロボットの研究が行われている [23]。筆者らは簡単かつ一体構造である厚紙 4 脚歩行玩具 [24] に着目し、これをゴムの弾性変形による受動歩行に適用した。本論文では脚の微細化を目的とし、製作する微細ゴム 4 脚構造体の寸法をその玩具の 1/10 に設定している。

2.2 歩行原理

微細ゴム 4 脚構造体は横揺れ運動により遊脚・支持脚が実現される。4 脚の場合はベース歩容に相当する。 **Fig. 3** に示すように脚先の傾斜により横揺れ運動が発生する。外力を与えることで進行方向へ推進力が生じ、ベース歩容による歩行が実現する。筆者らはまず、基礎実験として同様の構造を持つ厚紙 4 脚受動歩行玩具 [24] を用いて、脚先の傾斜角の影響を調べた。その結果、傾斜角が大きくなると横揺れ運動が大きくなり歩行の安定性が低下し、傾斜角が小さくなると安定性は向上するが、横

Fig. 2 A micro rubber 4-legged structure

Fig. 3 The leg tip structures of the micro rubber 4-legged structure

揺れ運動が十分に起きず、遊脚・支持脚が実現しないことが分かった。

微細 4 脚構造体の歩行動作原理を **Fig. 4** に示す。 **Fig. 4** に示すように、初期状態として進行方向に見て左 2 脚を支持脚、右 2 脚を遊脚とし、進行方向に外力を与える。支持脚側では外力と接地面との摩擦力によりたわみが発生する。支持脚と接地面との摩擦力が十分であるならば、脚のたわみ δ [mm] は式 (1) で表される。

$$\delta = \frac{P\ell^3}{3EI} \quad (1)$$

ただし、構造体の脚の高さを ℓ [mm]、股関節部の集中荷重を P [N] とする。 EI は脚の曲げ剛性を表している。一方、遊脚側では支持脚側で発生したたわみの戻り量が変位となり進行方向へ推移する。横揺れ運動により遊脚・支持脚が入れ替わり、右 2 脚が支持脚、左 2 脚が遊脚となる。この繰り返しにより継続した歩行が実現する。

2.3 FEM による解析

適切な弾性変形を実現するために脚部の剛性を考慮する必要がある。そこで、 **Fig. 5** に示すように 4 脚の厚さを a [mm]、胴体の厚さを b [mm] とし、FEM 解析を用いて形状の最適化を行い、弾性変形による受動歩行を実現する。

4 脚歩行モデルは脚の厚みおよび胴体の厚みを除いて **Fig. 5** に示す形状を採用している。なお FEM 解析に用いるゴム特性を **Table 1** に示す。進行方向 (z 軸方向) に圧力をかけることで推進力を得る。また、 **Fig. 6** に示すようにモデルの後方から圧力をかけ、水平面から 5 [deg] 傾けた状態をモデルの初期状態

Fig. 4 Walking principle of new 4-legged rubber structure

Fig. 5 The configuration of the 4-legged walking model

Table 1 Rubber Parameters for FEM analysis

Young's modulus	1.2 [MPa]
Poisson ratio	0.49
Pressure	0.0002 [MPa] (z -direction)
Density	3.6×10^{-9} [kg/m ³]
Coefficient of friction	0.8

(a) The direction of the pressure (b) Tilted state
Fig. 6 Initial conditions of the micro 4-legged rubber structure

Fig. 7 A leg motion in z-direction by non-linear FEM

とし、解析を行う。ここで、 x 軸方向は構造体の横揺れ方向を示し、 y 軸方向は接地面に対して垂直方向を示し、 z 軸方向は構造体の進行方向を示している。

脚の厚さ a および胴体の厚さ b は大きいほど弾性変形が少なくなるため、弾性変形により歩行を行う最小の値を求める。モデルの外観寸法を一定に保ったまま a , b それぞれの値を 0.2 [mm] のピッチで増し、Fig. 6 に示す条件の下で歩行シミュレーションを行った。

$0.2 \leq a \leq 2.4$, $b = 0.2$ の場合、および $a = 0.2$, $0.4 \leq b \leq 4.8$ の場合では、弾性変形が大きくモデルが転倒する結果となった。

$0.4 \leq a \leq 2.4$, $b = 0.4$ の場合、および $a = 0.4$, $0.6 \leq b \leq 4.8$ の場合では、弾性変形によるモデルの転倒は抑えることができたが不安定な動作となった。

$a = 0.6$, $b = 0.6$ の場合では、歩行動作を確認することができた。この値を本モデルのゴム厚の最適値とする。進行方向への周期的な変形、および遊脚相・支持脚相により歩行動作を確認している。両者とも一定周期で推移していることが弾性変形による受動歩行の理想である。

$a = 0.6$, $b = 0.6$ の場合の進行方向の変位、および垂直方向の変位をそれぞれ **Fig. 7** と **Fig. 8** に示す。Fig. 7 では周期的な階段状の波形が確認される。垂直面において遊脚運動を確認し、水平面において支持脚運動を確認した。また、一定の周期により変位しているため進行方向において遊脚・支持脚が周期的に行われていることが分かる。Fig. 7 に示すように 1.0 秒間に約 5 [mm] の変位を得た。

Fig. 8 では周期的な波形が確認される。垂直方向に約 0.2 [mm]

Fig. 8 A leg motion in y-direction by non-linear FEM

Fig. 9 A front/back right leg motion in y-direction

Fig. 10 A front/back left leg motion in y-direction

の変位を得た。Fig. 8 に示すように一定周期の遊脚・支持脚運動を確認した。Fig. 8 では支持脚時において垂直方向の変位が得られている。この原因は変位を測定するための基準点を脚先の内側に配置しているためである。支持脚時に脚先の内側が変位している場合、脚先の外側は横揺れ運動により接地しているため、脚先全体としては支持脚が実現できている。

Fig. 9 では進行方向に見て右前脚および右後脚の時間と垂直方向の変位の関係を示している。Fig. 9 より右前後脚が同位相で変位していることが分かる。同様に **Fig. 10** では進行方向に

見て左前脚および左後脚の時間と垂直方向の変位の関係を示している。左前後脚も同位相で変位していることが分かる。さらに、Fig. 9 および Fig. 10 がそれぞれ逆位相で推移しているため、本モデルがペース歩容で歩行していることが分かる。

2.4 型製作とゴム成形

FEM 解析で得られたゴム厚の条件下で微細 4 脚ゴム構造体の型製作およびゴム成形を行う。型製作では 2 段構造を採用している [19] [20]。2 段構造の型を用いることによって切り屑の脚内への防止や液状ゴムの流し込みを簡易にする利点がある。シリコンゴムを用いてゴム成形を行っている。型にはポリアセタールを用いており、加工には NC 工作機を用いた。

Fig. 2 に示すようにゴム成形により微細 4 脚ゴム構造体を製作した。寸法は Fig. 5 に示す寸法に加え、4 脚の厚さ 0.6 [mm]、

胴体の厚さ 0.6 [mm] である。

2.5 性能評価実験

高速度カメラにより製作した微細ゴム 4 脚構造体の性能評価実験を行う。この構造体は微細であるため、平面において一定に荷重をかけることが困難である。そのため、本論文では斜面での実験を採用する。微細領域において弾性変形による受動歩行の可能性を調べるため様々な角度で実験を行う。

弾性変形による受動歩行に成功したときの様子を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a) では時間 $t = 0$ [s] のときの様子を示している。Fig. 11 (a) の段階でピンセットを用いて初期振動を与えた。Fig. 11 (b) では左前後脚が接地した直後を示している。Fig. 11 (c) では左前後脚が接地した直後に右前後脚が進行方向に弾性変形し、遊脚を始めている。Fig. 11 (d) では遊脚時の右前後脚が遊脚相の頂点にある。Fig. 11 (e) では右前後脚が接地した直後の様子を示している。Fig. 11 (f) では右前後脚が接地した直後に左前後脚が進行方向に弾性変形し、遊脚を始めている。Fig. 11 (g) では遊脚時の左前後脚が遊脚相の頂点にある。Fig. 11 (h) では左前後脚が接地した直後の様子を示している。この繰り返しによって微細ゴム 4 脚構造体の歩行が実現される。このように高速度カメラにより自重のみによる受動歩行を確認することができた。

3. 120 脚ラバーシート

3.1 4 脚構造体の多脚シート化

120 脚ラバーシートの設計を行う。Fig. 12 (a) に示すように 120 脚ラバーシートは 30 ユニットの微細ゴム 4 脚構造体から構成される。進行方向に 5 ユニット、横揺れ方向に 6 ユニット配置している。これにより安定性が向上し、転倒が防止される。

Fig. 11 Experimental results of micro flexible passive walking observed by the high speed camera

Fig. 12 120-legged rubber structural sheet

(a) Standing phase of the right legs in the units

(b) Swinging phase of the right legs in the units

Fig. 13 Walking motion of 120-legged rubber structural sheet

寸法は $70.9 [\text{mm}] \times 58.5 [\text{mm}] \times 6.0 [\text{mm}]$ である。このラバーシートは微細ゴム4脚構造体の部分とそれを一つのゴムシートで繋ぐ胴体構造体の部分から成る。120脚ラバーシートの歩行動作原理、FEMによる解析、マイクロラバーモルディングプロセスによる製作、高速度カメラによる歩行動作実験により弾性変形による微細多脚受動歩行の可能性を述べる。

3.2 歩行原理

120脚ラバーシートによる受動歩行は微細ゴム4脚構造体それぞれが同位相で遊脚・支持脚の歩行動作を行うことにより実現される。Fig. 13に示すように横揺れ方向に圧力をかけると微細ゴム4脚構造体それぞれが同位相で歩行動作を実現する。すべての微細ゴム4脚構造体が同位相で動作するには、ラバーシートと微細ゴム4脚構造体をつなぐ胴体構造体の設計が必要である。Fig. 12(b)に一例を示すように横揺れ変位と脚の同期の度合いを評価指標とし、シミュレーションにより解析した。解析の結果、胴体構造体の厚さ $0.2 [\text{mm}]$ において、微細ゴム4脚構造体が同位相で歩行動作を行うことを確認した。また、同位相の歩行動作を確認するための胴体構造体の高さは $1.0 [\text{mm}]$ 以上であることが分かった。本研究ではシート状の多脚ゴム構造

Fig. 14 The right legs motion in z -direction Fig. 15 The right legs motion in y -direction

体を目指しているため、高さ $1.0 [\text{mm}]$ の胴体構造体を採用している。横揺れ運動に大きく弾性変形し、進行方向には弾性変形を起こさないように、胴体構造体の奥行きはシートの奥行きと同じ長さとしている。

3.3 FEMによる歩行解析

傾斜角 $15 [\text{deg}]$ の斜面に120脚ラバーシートを置き、初期条件として横揺れを起こすことによりラバーシートの歩行解析を行った。斜面では $5 [\text{deg}]$, $15 [\text{deg}]$, $30 [\text{deg}]$ の傾斜角で解析を行った。安定性があり、変位が得られる点を踏まえ $15 [\text{deg}]$ を採用した。ラバーシートに横揺れを起こすために、側面に様に横揺れ方向に $0.0002 [\text{MPa}]$ の圧力を瞬間的にかけている。ラバーシートの自重により推進力を得る。解析結果をFig. 14およびFig. 15に示す。解析結果ではラバーシートの4隅に位置するユニットの右前脚と、中央に位置する二つのユニットの右前脚の計6脚について示している。Fig. 14はこの6脚の y 方向の運動を、Fig. 15は z 方向の運動をそれぞれ示している。ここで z 方向は進行方向、 y 方向は垂直方向を示している。

Fig. 14に示すように指定した六つの右脚がほぼ同位相で進行方向に変位している。また、周期的に脚の変位が起きていることも確認できる。Fig. 14より $0.5 [\text{s}]$ で約 $0.5 [\text{mm}]$ の変位を確認した。Fig. 14では階段の水平面で支持脚を確認し、垂直面で遊脚を確認した。遊脚から支持脚に切り替わる際、弾性変形による振動が起きていることが階段面から確認される。

Fig. 15では指定した六つの右脚がほぼ同位相で垂直方向に変位していることが分かる。また、周期的に脚の変位が起きている

Fig. 16 Micro rubber molding process; (1) fabrication of a master mold and sticks, (2) assembling the mold and the sticks, (3) casting liquid rubber and vacuum deforming, (4) demold sticks, (5) demold rubber

Fig. 17 Design of the 120-legged rubber sheet

ることが確認される。

Fig. 15 に示すように斜面により 120 脚ラバーシートの歩行動作を解析しているため、 y 方向に変位が生じている。Fig. 15 に示すように山形の曲線で遊脚を確認し、水平面で支持脚を確認した。以上より、指定した六つの右脚が同位相で歩行動作を行っていることが分かる。FEM 解析によりすべての脚について同位相で遊脚・支持脚を確認した。ラバーシートに構成される 120 脚すべてが同位相で歩行動作を行っているといえる。

3.4 マイクロラバーモルディングプロセスによる製作

120 脚ラバーシートの簡易一体ゴム成形を実現するマイクロラバーモルディングプロセスについて述べる。本論文におけるこのプロセスは厚さ 0.2 [mm] の胴体構造体を実現するために、分割の型を用いた製作手法を用いた。これにより離型が確実に行える。Fig. 16 に示すようにこのプロセスは以下の手法により構成される。

- (1) 120 脚用型と胴体構造用スティックを製作する
- (2) 型の上面にスティックを組み合わせる
- (3) 液状ゴムを型に流し込み、真空脱泡を行う
- (4) 型からスティックを取り出す
- (5) ゴムを型から取り出す

Fig. 17 に示すように 120 脚用型は 30 ユニットの微細ゴム 4 脚構造体が配置されている。胴体構造用スティックは型の上面にある 0.2 [mm] 幅の凸間に挿入することで 0.2 [mm] の空洞を作り、薄膜のゴム成形を実現する。液状ゴムに関しては付加タイプのシリコンゴムを使用している（信越シリコン KE1603A-B）。液状ゴムの特性を Table 2 に示す。Fig. 18 は型からラバーシートを抜き取る様子である。Fig. 19 に製作した 120 脚ラバーシートを示す。Fig. 19 に示すように厚さ 0.2 [mm] の胴体構造体に 120 脚を取り付け、これらを一つのシートにすることに成功した。Fig. 19 (a) および Fig. 19 (b) より遊脚・支持脚の基本

Table 2 Rubber properties for the prototype

Durometer hardness	20
Tensile strength	4.2 [MPa]
Stretch	400%
Tearing strength	18 [kN/m]

Fig. 18 Demolding rubber sheet by micro rubber molding process (step 4)

(a) Swinging phase of right legs (b) Standing phase of right legs

Fig. 19 Prototype of 120-legged rubber sheet

動作が実現されていることが確認できる。

4. 歩行動作実験

高速度カメラを用いて、120 脚ラバーシートの歩行動作実験を行った。この実験により弾性変形による多脚受動歩行の可能性を調べる。実験手法として、Fig. 20 に示すように FEM 解析と同様、傾斜角 15 [deg] の斜面上にラバーシートを置き実験を行っている。シート上面に手動により横揺れ運動を起こし、そのときのラバーシートの挙動を観察する。斜面の材質にポリアセタールを用いている。高速度カメラでは 500 [fps] のフレームレートを用いている。

実験により得られた歩行動作を Fig. 21 に示す。Fig. 21 に示す動作実験では試験的にラバーシート上面に 10 [g] のおもりを乗せることで脚の大変形を実現している。脚の弾性変形が分かりやすいため、高速度カメラによる観測が容易になる。Fig. 21 (a) はラバーシートの初期状態を示している。斜面に置かれたラバーシートに手動でシート上面を加圧させることで横揺れ運動を起こしている。Fig. 21 (b) は指を離れた直後のラバーシートの挙動を示している。Fig. 21 (b) に示す手前の脚が支持脚となり、弾性変形していることが分かる。Fig. 21 (c) では手前の脚が遊脚となり、進行方向に変位している。その際、奥の脚は支持脚となり、弾性変形が起きている。この弾性変形量が遊脚時の変位

Fig. 20 Experimental setup

Fig. 21 Experimental results of 120-legged rubber sheet by the high speed camera

となる。Fig. 21 (d) では、再び手前の脚が支持脚となり、弾性変形が起きている。この繰り返しによってラバーシートの歩行動作が実現される。

モーションキャプチャを用いた歩行動作実験の結果を Fig. 22 および Fig. 23 に示す。Fig. 22 ではラバーシートの 1 脚についての進行方向の変位を示している。Fig. 23 ではラバーシートの 1 脚について垂直方向の変位を示している。Fig. 22 および Fig. 23 より歩行の周期性をおおむね確認した。また、本実験により 1.6 [s] において約 8 [mm] の変位を確認し、弾性変形による多脚受動歩行の可能性を実証した。本実験では手動により実験を行ったため、解析よりも大変形の歩行となっている。次段階として、実験により得られた結果を解析条件に反映させ、歩

Fig. 22 Experimental result of the leg tip in z -direction by a 3D motion capture Fig. 23 Experimental result of the leg tip in y -direction by a 3D motion capture

行動作をさらに明らかにしていく。

5. 結 言

機能性ゴムシートを実現するマイクロラバー構造体の一つとして表面に低摩擦機能を有する新しいラバー構造体を提案し、マイクロラバーモルディングプロセスにより、これを実現した。このプロセスにより脚の小型化、多脚化と一体成形が可能となり、微細多脚ラバーシートを実現した。高速度カメラを用いて 120 脚ラバーシートの歩行動作実験を行い、ゴムによる微細多脚受動歩行を確認した。本論文における結論を以下に示す。

- (1) 柔軟素材の弾性変形を利用した 4 脚受動歩行を行う新しいマイクロラバーストラクチャを考案した。
- (2) 簡単形状・小型化を実現する微細ゴム 4 脚構造体の設計・解析・製作・評価を行い、弾性変形による受動歩行に成功した。
- (3) 微細ゴム 4 脚構造体から構成される 120 脚ラバーシートを設計した。マイクロラバーモルディングプロセスにより 0.2 [mm] の厚さを有する 120 脚ラバーシートの簡易一体ゴム成形を実現した。
- (4) 種々の条件下で 120 脚ラバーシートの受動歩行動作実験を行った。高速度カメラによる画像解析により多脚受動歩行を確認した。

(5) 以上により, 弾性変形による多脚受動歩行の可能性を示すことができた.

(6) 今後の展望として, 多脚構造体における歩行動作を解析と実験の両方から検討し, 明確にする. 具体的には, 斜面の材質, 摩擦係数, 傾斜角度, おもりの質量等による歩行運動の違いについてゴム構造体の受動歩行を理論的に明らかにする. また, 歩行可能な外力の大きさ, 向き, 傾斜角の範囲を求め, ラバーシートを受動歩行の安定性を調べる. さらに, ゴムの種類を変更し, 硬度の違いによる影響を比較する. 本手法では, 型を製作する加工機の精度により 100 [μm] 程度まで小型化することができると考えられる. 冒頭に述べたように, 本研究は数 10 [μm]~数 100 [μm] の大きさに脚を小型化, 多脚化することを最終目標としており, 本手法により実現できると考えられる.

謝 辞 本研究は平成 19~22 年度文部科学省科学研究費基盤研究 (A) (機関番号 15301) “フレキシブルマイクロメカニズムの基盤技術の確立と応用展開”を受けて実施している.

参 考 文 献

- [1] 阿達直樹, 岩永浩, 元島栖二: ミクロの世界にズームイン. 文研出版, 2007.
- [2] 阿達直樹: 昆虫の雑学事典. 日本実業出版社, 2007.
- [3] 戒能洋一, 阿達直樹: けんぴきょうでわかった! いきものスゴイ能力. 株式会社 G.B., 2007.
- [4] (株) テクネックス工房, HP: <http://www.technex.co.jp/tinycafe/>
- [5] ピーター・フォーブ: ヤモリの指. 吉田三知世 (訳), 早川書店, 2007.
- [6] P. Forbes: The Gecko's Foot—Bio-inspiration: Engineered from Nature—. HarperCollins Publishers Ltd., 2005.
- [7] 小崎晶子, 山岡亮平: “テントウムシ類の足跡物質と体表リビッドの化学的特徴”, 日本応用動物昆虫学会誌, vol.40, pp.47–53, 1996.
- [8] M. Lanzetta and M.R. Cutkosky: “Shape deposition manufacturing of biologically inspired hierarchical microstructures,” CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008.
- [9] D. Santos, S. Kim, M. Spenko, A. Parness and M. Cutkosky: “Directional Adhesive Structures for Controlled Climbing on Smooth Vertical Surfaces,” 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1262–1267, 2007.
- [10] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman V. Mattoli and M.R. Cutkosky: “Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1268–1273, 2007.
- [11] K. Takahashi, J. Oriol, L. Berengueres, K.J. Obata and S. Saito: “Geckos' foot hair structure and their ability to hang from rough surfaces and move quickly,” International Journal of Adhesion & Adhesives, vol.26, pp.639–643, 2006.
- [12] M. Schargott, V.L. Popov and S. Gor: “Spring model of biological attachment pads,” Journal of Theoretical Biology, vol.243, pp.48–53, 2006.
- [13] T. McGeer: “Passive Dynamic Walking,” The International Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62–82, 1990.
- [14] 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄: “歩行現象の力学原理から見たヒトの歩行”, バイオメカニズム学会誌, vol.30, no.3, pp.119–122, 2006.
- [15] 浅野文彦, 羅志偉: “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行—I) コンパス型モデルの駆動力学—”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.4, pp.566–577, 2007.
- [16] 大須賀公一: “歩行力学の基礎としての受動的動歩行”, システム制御情報学会論文誌, vol.49, no.10, pp.393–398, 2005.
- [17] 鈴森康一, 斉藤文孝: “マイクロラバー構造体による受動歩行”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1P1-B01, 2008.
- [18] K. Suzumori and F. Saito: “Micro Rubber Structure Realizing Multi-Legged Passive Walking,” 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.
- [19] 鈴森康一, 斉藤文孝: “マイクロラバー構造体による受動歩行—第 2 報: 光造形プロセスによる集積化と小型化—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2P1-D06, 2009.
- [20] F. Saito and K. Suzumori: “Micro Rubber Structure Realizing Multi-Legged Passive Walking—Integration and Miniaturization by Micro Rubber Molding Process—,” 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [21] 斉藤文孝, 鈴森康一: “マイクロラバー構造体による受動歩行—第 3 報: 小型・簡単形状によるベース歩容の実現—”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 3P2-01, 予稿集 DVD-ROM, 2009.
- [22] 鈴森康一, 斉藤文孝: “マイクロラバー構造体による受動歩行”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.22, no.2, pp.167–172, 2010.
- [23] 吉岡秀隆, 杉本靖博, 大須賀公一: “超多脚型受動的動歩行ロボットの実現に関する研究”, Proc. of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2008.
- [24] 野呂茂樹: 科学工作&科学マジック (1), <http://sky.geocities.jp/noroshigeki3/>

斉藤文孝 (Fumitaka Saito)

2008 年岡山大学工学部システム工学科卒業. 2010 年同大学大学院自然科学研究科博士前期課程機械システム工学専攻修了, 同年 4 月よりパナソニック電工株式会社に勤務. 2009 年 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (IROS'09) を受賞. 主にマイクロゴム構造に関する研究に従事. 日本機械学会, IEEE 等各学生会員.
(日本ロボット学会学生会員)

鈴森康一 (Koichi Suzumori)

1984 年横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年株式会社東芝入社. 2001 年まで同社総合研究所および研究開発センターに勤務. この間, 1990 年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了. 1999~2001 年財団法人マイクロマシンセンター勤務. 2001 年岡山大学教授, 現在に至る. 工学博士. 各種アクチュエータの研究に従事. 日本機械学会, IEEE 等各会員.
(日本ロボット学会正会員)