マイクロラバー構造体による受動歩行 —第4報：120脚受動歩行シートの開発—

Micro Rubber Structures for Passive Walking

4th report; Development of Rubber Sheet Realizing 120-Legged Passive Walking

学 斉藤 文孝 (岡山大) ○正 鈴森 康一 (岡山大)

Fumitaka SAITO, Okayama University, saito7@act.sys.okayama-u.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Okayama University, suzumori@sys.okayama-u.ac.jp

We are trying to realize very low friction rubber sheets with thousands of micro passive walking legs. In the previous report, we reported a 64-legged rubber sheet with a pitching movement. In this paper, we report a 120-legged rubber sheet consisting of new micro 4-legged structures with a rolling movement, which realizes miniaturization to 600[μm] of the leg size and simplification of the leg structure. The rubber sheet is analyzed with non-linear FEM, and fabricated through micro rubber molding process. By evaluation experiments using a high speed camera and a motion capture, multi-legged passive walking of micro rubber structural sheet is confirmed.

Key Words: Soft actuator, Micro machine, Passive walking

1. 緒言

多くの生物には、柔軟で微細な構造が存在している[1]。そして、この微細構造により摩擦制御や発色、粘着のようなマクロ機能が実現される。これまでに微細構造を有する接地面構造の研究が盛んに行われている[2, 3]。一方、ロボティクス・メカトロニクスの分野では、駆動源を用いない受動歩行の研究が行われているが、いずれも機械的なリンク機構で構成されている[4-8]。

本研究では、両者の研究概念を取り入れたゴムの弾性変形による受動歩行を目指している[9-14]。最終目標は受動歩行メカニズムを微細構造としてゴム表面に一体成形することにより、物理的に低摩擦機能を有するラバーシートを実現することである。数 10[μm]～数 100[μm]の微細受動脚を 1000 個程度配置したシートサイズ 100×100×1[mm]のラバーシートを目指している。このラバーシートの実現により低摩擦摺動シール材や加重による搬送用ラバーシートの応用が期待される。

本稿では、微細構造に着目したゴムによる受動歩行の第 4 報として 600[μm]の受動脚からなる 120 脚ラバーシートを開発した。そして、FEM 解析、製作、性能評価実験を駆使し、ゴムの弾性変形による多脚受動歩行に成功した。このラバーシートは脚寸法 600[μm]の 4 脚構造体と厚さ 200[μm]の胴体構造から構成され、小型化に成功した。

2. 120 脚ラバーシート

図 1 に示すように 120 脚ラバーシートは 30 ユニットの 4 脚構造体とこれらの構造体を連結させる胴体構造から構成される。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。寸法は 70.9[mm]×58.5[mm]×6.0[mm]である。図 1 に示すように傾斜した脚先により横揺れ運動を発生させ、遊脚、支持脚が実現される。胴体構造では FEM 解析により連結部の長さ、厚さを最適化することで各 4 脚構造体に同位相の動きを与える。歩行動作原理として、各 4 脚構造体が同位相で横揺れ運動を行うことでラバーシート全体に横揺れを発生させ、遊脚・支持脚を実現する。傾斜面にラバーシートを配置し、自重により推進力を得る。

Fig.1 120-legged rubber sheet consisting of 4-legged structures

Table1 Initial parameters for FEM analysis

Slope angle	15degree
Pressure	0.0001MPa
Young's modulus	1.2 MPa
Poisson ratio	0.49
Density	$3.6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
Coefficient of friction	0.8

Fig.2 The right legs motion in x-direction by FEM analysis

Fig.3 The right legs motion in y-direction by FEM analysis

3. FEMによる歩行動作解析

FEMを用いて120脚ラバーシートの歩行動作を解析した。表1に示すように、解析条件として傾斜角15[deg]の斜面にラバーシートを配置し、横揺れ方向に0.0001[MPa]の圧力をかけている。解析結果を図2及び図3に示す。本稿では、ラバーシートの4端の脚と中心に位置する2つの脚の計6脚について解析結果を示す。図2では指定した6脚について進行方向の変位を示している。変位が発生する範囲では遊脚を、変位が生じない範囲では支持脚を確認した。図3では指定した6脚について垂直方向の変位を示している。同様に変位が発生しない範囲分では遊脚を確認した。支持脚に関しては、脚先においてFEMで使用するメッシュ分割の都合上、わずかながら変位が生じているが脚先全体で支持脚が確認された。シミュレーション評価により全ての脚について同時に横揺れ運動を確認した。以上の結果、FEM解析により120脚全てにおいて遊脚・支持脚を確認し、多脚受動歩行を実現した。歩行性能として、0.21[mm]の遊脚能力を確認し、1[s]において約5[mm]の変位を得た。

4. マイクロラバーモルディングプロセス

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。本論におけるこのプロセスは厚さ200[μm]の胴体構造体を実現するために、組み立て式の製作手法を用いた。

Fig.4 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

Table2 Rubber properties for the prototype

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

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

Fig.5 Prototype of 120-legged rubber sheet

図4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

胴体構造用スティックは型の上面にある200[μm]幅の凸間に挿入することで200[μm]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)。液状ゴムの特性を表2に示す。図5に示すように厚さ200[μm]の胴体構造体に120脚を取り付け、これらを1つのシートにすることに成功した。図5(a)及び図6(b)より遊脚・支持脚の基本動作が実現されていることが確認できる。

Table3 Experimental setup

Slope angle	15[deg]
Mass of object	10[g]
Material of slope	Polyacetal
Frame rate of high speed camera	500[fps]

Fig.6 Experimental results of 120-legged rubber sheet by the high speed camera

5. 性能評価実験

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。本実験の目的として、ゴムの弾性変形による多脚受動歩行と加重による物体搬送能力の可能性について調べる。実験方法として、表 3 に示すように傾斜角 15 度のポリアセタル上にラバーシートを配置し、10[g]のおもりのをせる。手動により横揺れ運動を発生させることでラバーシートの挙動を撮影する。

実験により得られた歩行動作を図 6 に示す。図 6(a)はラバーシートの初期状態を示している。図 6(b)は手動により加重をかけた直後のラバーシートの挙動を示している。図 6(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。図 6(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している手前の脚の変位となる。図 6(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図 7 及び図 8 に示す。図 7 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。図 8 ではラバーシートの 1 脚についての垂直方向の変位を示している。図 7 及び図 8 ともに階段状のグラフを確認した。変位が発生する部分では遊脚を、変位が発生しない部分では支持脚を確認し、ラバーシートの弾性変形による多脚受動歩行の可能性を実証した。

Fig.7 Experimental result of the leg tip in x-direction by a 3D motion capture

Fig.8 Experimental result of the leg tip in y-direction by a 3D motion capture

6. 結言

柔軟素材の弾性変形を利用した 4 脚受動歩行から構成される 120 脚ラバーシートを設計した。FEM 解析によりラバーシートの多脚受動歩行に成功した。マイクロラバーモルディングプロセスにより 200[μm]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。高速度カメラ、及びモーションキャプチャによる解析によりラバーシートの多脚受動歩行を確認した。今後の展望として、ゴムの種類を変更して成形し、硬度による比較を行う。また、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動作の違いについて解析を行い、ゴム構造体の受動歩行を理論的に明らかにする。本手法では、型を製作する加工機の精度により 100[μm]程度まで脚の小型化、多脚化ができると考えられる。冒頭で述べたように、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) (No.19206027) “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。

文 献

- [1] 阿達直樹, “昆虫の雑学事典”, 日本実業出版社, 2007
- [2] Daniel Santos, Sangbae Kim, Matthew Spenko, Aaron Parness, Mark Cutkosky, “Directional Adhesive Structures for Controlled Climbing on Smooth Vertical Surfaces”, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007
- [3] Sangbae Kim, Matthew Spenko, Salomon Trujillo, Barrett Heyneman, Virgilio Mattoli, Mark R. Cutkosky, “Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot”, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007
- [4] Tad McGeer, “Passive Dynamic Walking”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, 62-82 (1990)
- [5] 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, 2006
- [6] 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. 578-588, 2007
- [7] 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, 第 49 巻 第 10 号
- [8] 細田耕, 浅田稔, 荻野正樹, 春名正樹, 俵和史, “受動歩行からヒューマノイドロボット歩行に向けて”, 第 17 回バイオメカニズムシンポジウム, pp.203-209, 2001
- [9] 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, ビッグハット (長野県)
- [10] Koichi Suzumori, Fumitaka Saito, “Micro Rubber Structure Realizing Multi-Legged Passive Walking”, *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, September 22-26, 2008
- [11] 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, 福岡
- [12] Fumitaka Saito, Koichi 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*, St.Louis, MO, USA, October 11-15, 2009
- [13] 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, 横浜, 2009
- [14] 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, No2, 2010