

ヤモリの手のひら構造を模倣した突起シートの製作および摩擦特性の評価

Fabrication of the Protrusion Sheet imitating Gecko the palm structure and Evaluation of Frictional Characteristics

東海大・工（正）*徳植 輝 東海大・工（正）落合 成行 東海大・工（非）山本 二千翔

Hikaru Tokuu*, Masayuki Ochiai*, Nichika Yamamoto*

*Tokai University

1. 緒言

2020年初頭から世界中で流行している新型コロナウイルス (COVID-19) の影響から、人間同士の接触を避けることのできるロボットの需要が益々高まっている。これらのロボットにおける動力伝達手段として主に歯車方式が使用されている。しかし、歯車は歯の噛み合いによって動力を伝達するため、振動や騒音が大きという問題がある。一方、振動や騒音を抑制した動力伝達手段として、トラクションドライブが挙げられる。しかし、潤滑油の供給機構や高荷重の押付機構を必要とするため、高コスト化や装置の大型化が懸念される。以上のことから、低振動かつ低騒音な小型動力伝達手段の開発が必要であると考えられる。

これらを検討するにあたり、本研究ではバイオミメティクスの観点からヤモリに着目した。ヤモリの指先には *Seta* と呼ばれる微細な突起があり、先端に *Spatula* と呼ばれる分岐部を有している。この *Seta* が接地面にマクロスケールで存在する凹凸に入り込むことで、接地面との真実接触面積を増加させている。これにより、ファンデルワールス力を発現させて、壁面との接着を可能としている⁽¹⁾。また、接地面に対し 30° 以上の角度を付けて引張荷重を加えると吸着力が激減し、わずかな力で剥離する特殊な剥離特性を有している。これら特性により、ヤモリは僅かな力で吸着と剥離を繰り返すことが可能であり、他の接着剤には見られない特異性を有する。著者らは、このような *Seta* の特性をトラクション方式の動力伝達に応用できると考えた。この方式は、*Seta* を模倣した突起シートを駆動側ローラに貼付し、両転動体の接触部でファンデルワールス力を発現させ、動力を伝達する手法である。

過去にもヤモリの吸着特性を模倣した突起シートについての研究事例が報告されており、Daniel Santos ら⁽²⁾によって開発されたヤモリ型ロボットが壁面に吸着して走行することに成功したことが報告されている。このロボットに使用された突起シートは *Spatula* のような超微細構造を有していないが、*Seta* の吸着・剥離特性を再現できている。

このような背景の下、本研究ではヤモリの優れた吸着・剥離特性を再現することを目的とした突起シートを製作し、各形状における摩擦係数を計測することにより動力伝達に適した突起形状を選定した。また、X線/CTや高速ビデオカメラを用いて突起の変形や接触部の様子を可視化することで、接触状態が摩擦係数に及ぼす影響について考察した。

2. 実験装置および方法

2.1 突起シートの製作

突起シートの製作には、鋳型と高分子材料の中で高い弾性率と形状適応性を有するウレタンを用いた鋳造法を用いた。Figure 1 に製作した突起シートを示す。同図より、突起根本部及び先端部にそれぞれ 60° と 20° の傾斜を施した先端がフラットな単純傾斜と、直立した突起の先端が対称および非対称に分岐した場合の 3 種類の突起構造を製作した。また、比較のため突起のないプレーンシートも製作した。

2.2 突起シートの摩擦係数測定実験

本実験では、3分力計の上に突起シートを設置し、0.2 N の垂直荷重を加える。その後、滑車を介して重りの荷重を変化させ突起シートが滑り出した際の重りの質量より摩擦係数を算出し、各突起シートの摩擦特性を評価した。

2.3 X線/CTを用いた突起の変形可視化実験

X線/CTを用いて、垂直荷重のみを付加した際の接触時の突起変形を可視化した。突起構造透過したX線をディテクタにより検出し、被写体を 360° 回転させて撮影することで物体の内部構造を調べることが可能である。可視化条件は、エネルギー70 kV、ビーム電流75 μ A、電圧5.3 W、有効ピクセル8.18 μ m、露光時間1000 ms、フィルターにはAlの0.1 mmを使用した。

2.4 高速ビデオカメラを用いた接触部の可視化実験

実験では、プレパレート上に突起シートを設置し、静的に垂直荷重をかけた状態から水平荷重を付加した際の接触面の変化の様子を高速ビデオカメラによって撮影した。なお、画像上のコントラストを高めるため、染料を突起先端部に付着させている。

3. 実験結果

Figure 2 に摩擦試験結果を示す。同図より、プレーンシートと各突起シートの静止摩擦係数を比較すると、単純傾斜構造では242%、対称分岐構造では69%、非対称分岐構造では80%向上しており、単純傾斜構造が最も高い値を示している。同様に動摩擦係数においても単純傾斜構造が最も大きく、プレーンシートに比べて297%向上していること

が確認される。これは、接触面や突起の変形に違いが生じているためと考えられる。そこで、各突起の静止状態における接触状態を確認するために、X線/CTを用いて突起の変形の可視化結果を比較することにした。

Figure 3にX線/CTにおける可視化結果を示す。同図より、単純傾斜構造(a)は先端に施した傾斜部が接地面に対して水平になるように変形し、接触していることが確認される。一方、対称分岐構造(b)では突起が倒れるように変形し、先端の分岐部ではなく突起側面での接触になっていることが確認される。これに対し、非対称分岐構造(c)では、分岐した2つの先端が接触していることが確認される。対称分岐構造(b)とは変形の様子が異なるものの、何れの分岐構造においても単純傾斜構造に比べて接触面積が低下し、摩擦係数が低くなったものと考えられる。

次に、高速度ビデオカメラを用いて水平荷重を付加した場合の突起の接触面を可視化して比較することにした。Figure 4にその結果を示す。ここでは高速度カメラを用いて得られた画像から代表的なものを抽出している。得られた画像より、接触面積を算出し単純傾斜構造の接触面積を100%とした場合、対称分岐構造は86%、非対称分岐構造においては78%となった。分岐構造においては、もし突起先端が接触しているとする、接触面が2箇所に分かれると考えられる。しかし同図(c)より非対称分岐構造の接触面が1箇所になっていることがわかる。そのため、水平荷重を付加した場合は対称分岐構造と同様に、先端は剥離して突起が倒れ、突起の側面が接してしまっているものと推測される。これにより単純傾斜構造よりも接触面積が小さくなり、分岐構造の摩擦係数が低下したのと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ヤモリの持つ優れた吸着特性を応用した動力伝達手段の開発を目的として、Setaを模倣した3種類の突起シートを製作し、各突起シートの性能を摩擦試験、X線/CTを用いた突起の変形の可視化、高速度カメラを用いた接触部の可視化を行った。これらの結果から得られた知見を以下に示す。

1. 摩擦係数を測定した4種類のシートの中では、単純傾斜突起構造が最も高い値を示した。
2. X線/CTを用いた可視化結果から、単純傾斜構造では、垂直荷重を受けた際に、先端の傾斜部が相手面に対して平行になるように接触し、広い接触面積を確保していることが確認された。
3. 高速度ビデオカメラを用いた接触部の可視化において、単純傾斜構造の突起は水平荷重を受けた際にも広い接触面積が確保されていることが確認され、摩擦係数の増加に寄与したのと考えられる。

5. 謝辞

本研究はNSKメカトロ財団の研究の一環として行われたものであり、ここに厚く御礼申し上げます。また、東海大学機械工学科甲斐研究室より3Dプリンタを、東海大学イメージングセンターより卓上走査型電子顕微鏡、X線/CTを使用させて頂きましたので御礼申し上げます。

文献

- 1) Kellar Autumn, Metin Sitti, Yiching A. Liang, Anne M. Peattie, Wendy R. Hansen, Simon Sponberg, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing, Jacob N. Israelachvili, and Robert J. Full: Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae, vol. 99, 12252–12256, (2002)
- 2) Daniel Santos, Matthew Spenko, Aaron Parness, Sangbae Kim, Mark Cutkosky: Directional adhesion for climbing, Journal of Adhesion and Technology, Vol.27, 1317–1341, (2007)

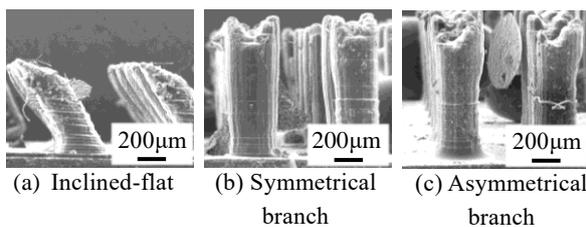


Fig.1 Manufacture protrusion sheet

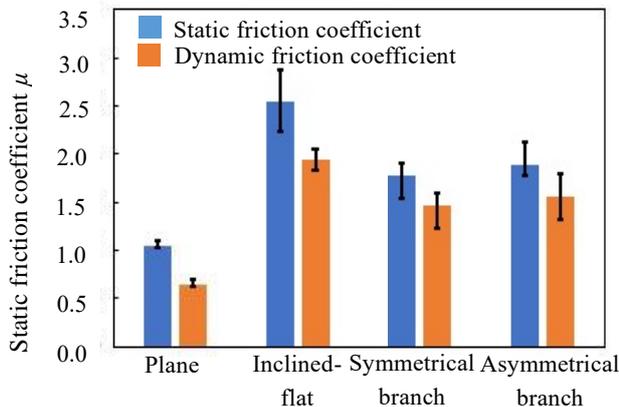


Fig.2 Flat friction test results

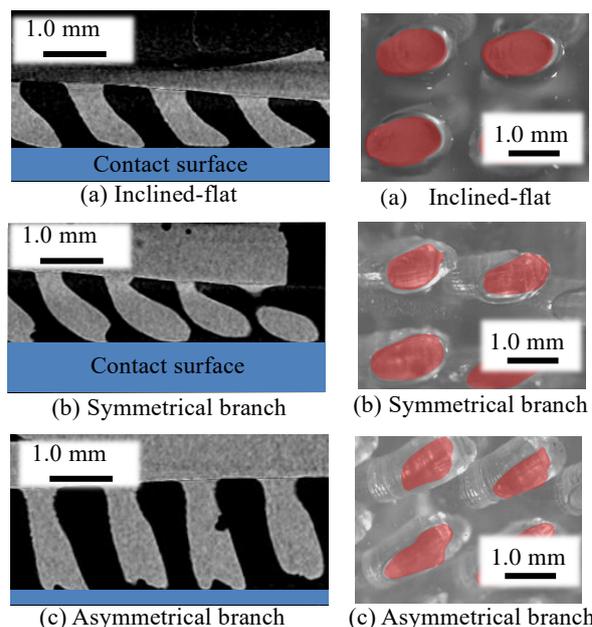


Fig.3 Visualization result of X-ray/CT

Fig.4 Visualization result of the contact part