

審査の結果の要旨

氏名 王 宏強

本論文は「Integration of Electrode adhesion and Electrostatic Actuation and its Application for Climbing Robots (和訳：静電吸着と静電アクチュエーションの統合とその壁面移動ロボットへの応用)」と題し、柔軟電極フィルムから構成される静電吸着技術と静電アクチュエーション技術を統合する手法と、その壁面移動ロボットへの応用方法について論じている。

壁面等に吸着しながら移動する壁面移動ロボットは、高所や狭所の検査や清掃などに有用であることが期待され、これまでに様々な手法が研究されている。壁面移動ロボットにおいて特に重要となる要素技術は壁面への吸着技術であり、従来研究では、空気圧、磁力、爪等を用いた吸着機構が盛んに研究されてきた。一方、近年、柔軟な電極シートにより生ずる静電気力を用いて壁面に吸着する技術が提案され、これを用いた壁面移動ロボットが複数試作されている。この静電吸着の技術を用いることで、薄く軽量で、かつ、柔軟な壁面移動ロボットを実現できる可能性があるが、従来研究ではロボットの移動に通常の電磁モータを用いていることから、静電吸着技術のそうした特徴が活かしきれていなかった。そこで、本論文では、静電吸着技術同様に柔軟な電極シートで構成される静電アクチュエーション技術をロボットの移動に利用し、これを静電吸着技術と統合することで、薄く軽量で、かつ、柔軟な壁面移動ロボットを実現することを提案している。

統合における技術的な課題として、本論文は主に3つの課題を挙げ、それぞれについて詳細な検討を加えている。一つ目の課題は、電極シートの剥離に関する問題である。壁面に吸着した柔軟な電極シートは、壁面の接線方向への力に対しては高い保持力を有するが、壁面法線方向の力をシートの端部に加えると、粘着テープなどが容易に剥がせるのと同様に、比較的簡単に壁面から剥離してしまう。壁面移動ロボットにおいては、こうした剥離はロボットの落下に繋がるため、剥離力に関する検討が不可欠である。静電吸着以外の壁面吸着技術では剥離に関する詳細な検討が行われているものもあるが、静電吸着技術の剥離については、これまで詳細な検討が行われていない。本論文では、Kendall

モデルとして知られる剥離モデルをもとに、静電吸着エネルギーを用いて静電吸着技術の剥離力をモデル化し、実験を通じて提案モデルの妥当性を確認している。また、この結果にもとづき、実際の壁面移動ロボットの剥離特性についても論じている。

二つ目の課題はロボットの座屈である。静電吸着技術と静電アクチュエーション技術を統合して製作するロボットは、柔軟な電極シートのみから構成することができるが、そうして製作した柔軟なロボットは負荷荷重や自重によって、容易に座屈しうる。本論文では、ロボットにおける座屈の起こり方を論じるとともに、静電吸着を効果的に用いることでロボットの姿勢を保ち座屈を防止する手法を提案している。そのために、静電吸着の効果を含めた座屈の解析モデルを構築し、その妥当性を実験的に検証している。

三つ目の課題は、静電吸着と静電アクチュエーションの力発生に伴う課題である。静電吸着と静電アクチュエーションの両技術は、同等の電極構造で実現できることから、本論文では、両技術で電極を共用することを提案している。その場合、静電吸着力と静電アクチュエーション力との間に干渉が発生することが懸念される。そこで、数値解析と実験により両者の干渉を調べ、提案構成において両技術が互いに干渉せずに利用できることを明らかとしている。また、壁面移動ロボットにおいて静電吸着力と静電アクチュエーション力の両者を効果的に用いるために、どのような電極設計をすれば良いかを数値解析を通じて論じ、最適設計のための電極パラメータ選定手法を提案している。

以上の基盤的な課題を論じた上で、本論文では複数の壁面移動ロボットを実際に試作し、その性能を評価している。具体的には、クローラ方式のロボットとインチワーム方式のロボットを試作し、いずれも垂直壁面に吸着しながら上方に向けて移動可能であることを実証している。

以上のように、本論文では、壁面移動ロボットにおける新しいコンセプトとして、静電吸着と静電アクチュエーションを統合した薄型軽量ロボットを提案し、その実現のための課題を理論と実験の両面から論じるとともに、実際に提案コンセプトに基づくロボットを試作し提案の妥当性を示している。こうした一連の結果は、静電力応用技術や壁面移動ロボット技術の発展に寄与する内容であると認められる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。