

[研究助成 (A)]

光弾性を利用した力覚変色表示ソフトアクチュエータの研究開発

2241030



研究代表者

法政大学

准教授

山 田 泰 之

[研究の目的]

さらなる人間と機械の調和の促進を考えた場合、人と機械の共同作業、人がいる空間での機械の作業などのインタラクションを考えた場合、直感的に機械の状況を人間が認識できることが望ましい。例えば、多くのロボットや機械は、位置制御にもとづいた移動や作業を行うが、これは人間のパントマイムに近いものがある。つまり、そのロボットや機械の動きから、重いものを運んでいるのか、硬いものを掴んでいるのか、力をいれて動いているのかななどを視覚的に判断することは難しい。

このような場合、例えばロボットの状況をセンシングして、数値化して、アラートを出すことは技術的には容易であるが、そのような複雑システムによる方法が様々な環境下で効果的に活用できるかは疑問が残る。

そこで、本研究では、人間が人間に直感的に感じるように、例えば力こぶや、躍動感のようなもののように、ロボットや機械の外観的な要素からその状況が理解できるほうが、人間と機械の調和の促進をさらに飛躍させることができると考え、目的とする。そこで本研究ではロボットや機械の構造を、人が色に関して感じる軽重感などに合わせて変色するパッシブな機械要素の実現を目指す。その第一段階として、人と機械のインタラクションで着目されているソフトアクチュエータに対して、その状況を色で可視化する方法の実現を目指す。

[研究の内容、成果]

研究の内容

本研究のサブゴール（本申請の研究成果目標）は、光弾性を利用した力覚変色表示ソフトアクチュエータの研究開発を実現するための具体的な取り組みについて説明する。技術的な課題は①ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現（従来のソフトアクチュエータ、例えばマッキベン型や軸方向繊維強化型人工筋肉などと融合）と、②より可視光で判別しやすい色の発色である。③再現性のある製作と記録。研究概要と現在の知見や実験環境について説明したうえで、それぞれについて詳しく説明する。

本研究では、図1のように、ロボットや機械の色を人間が色に対して感じる軽重感等と一致させることで、人間と機械の調和（状況の直感的な伝達）を目指すものである。様々な環境でこのインタラクションを成立させるために、電気的なセンシングなどを用いずに、かつ安定的に発生するように、光学特性の1つである光弾性の応用を行う。光弾性は図2のように、高分子材料内の光の分光による色の変化である物理現象であるため可視光させれば様々な環境で

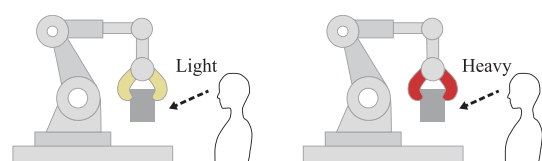


図1 外観色による状況伝達

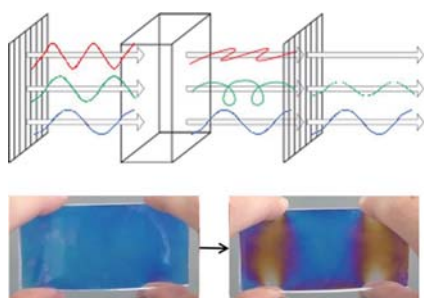


図2 光弾性の概念図

安定的に機能する。基本的原理は、光弾性を発生しやすい軟質塩化ビニルシート（以下 PVC シート）等の透明素材（光造形，FDM 造形含む）を偏向板で挟んで、透過した可視光から観察される。研究代表者らは、これまでの研究の成果から、この光弾性を応用して透明樹脂シートの厚みや重ね枚数，織，溝や切欠きなどが，構造体に対して加わる力と色変化，表面の模様変化に及ぼす特性を明らかにした。また，光弾性による色発生を機械やロボットなどの構造体として応用する方法として，例えば図3のようなロボットハンドとして試作した。さらに，色の発色と人の軽重感を一致させる機構開発図4



図3 把持対象によるハンドの色変化



図4 軽重感と一致させる機構

を研究開発してきた。しかし，アクチュエータ自体の色や模様を変化させたり，それを発生している荷重や，変形と関係させて変化させることも実現できない。そこで，1) ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現と，2) 再現性のある製作と記録方法の確立を目指した。

1) ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現

これまでの研究では，PVC 等の透明素材に力を加えた際の変色について検討してきた。一方で，これらをソフトアクチュエータとしてインテグレーションできていない。そこで，ソフトアクチュエータであるマッキベン型空気圧人工筋肉，ワルシャワ型人工筋肉，折り紙アクチュエータ，パウチモータと光弾性による変色や模様変化について融合を試みた。

2) 再現性のある製作と記録

光弾性現象は可視光のように幅広い可視光範囲の波長を含む光の下による PVC 材料等の透明高分子素材に発生する現象である。そのため，材料や製作方法による素材自体あるいはソフトアクチュエータの個別のものづくりによる個体差と，撮影環境の違いによる色の変化が発生する。より具体的に説明する。提案方法でソフトアクチュエータを変色させると，偏向板により光量が半減するため，薄暗い色となる。人間の目は高い感度があるため，問題なく見えるが，実験として色を量的に比較する上では，照明が必要になる。この場合用いる照明や配置方法で，撮影される対象の色の量的な数値が変化してしまう。

そこで，なるべく個体差が出にくい作り方，つまり手作りではなく，機械化による再現性の確保を目指す。具体的にはカットマシンやレーザカッターを用いて透明柔軟素材のサイズを一定にたもつ。

また，撮影環境も記録される数値が変化ないように，自然光の遮蔽と照明の管理を行い，撮影による色変化の誤差を抑制することを目指した。

研究の成果

ソフトアクチュエータは柔軟な材料を使用して構成されている場合が多い。そのため、透明な樹脂素材で構成できれば、光弾性による変色や模様変化を発生させられる可能性がある。ソフトアクチュエータには、空気圧や電気、ジャミングなど様々な駆動方式がある。その中でも内部構造が透明としやすい空気圧式アクチュエータに着目した。折り紙式アクチュエータ、マッキベン式人工筋肉、パウチモータ、ワルシャワ型人工筋肉を対象とした。

光学的特性は、光の伝播、屈折、反射、分散等の物理的現象によるもので、表1のような種類がある。本研究では力学特性である光弾性を利用する。

表1 光学現象の例

1	力学要素による変化	光弾性特性
2		モアレ
3	光学要素による変化	二色性
4		フォトクロミズム
5	温度による変化	サーモクロミズム
6	機械的刺激による変化	メカクロミズム

様々な種類や厚みの透明樹脂素材や、それらの重ね合わせの組み合わせを用いて、どのような光弾性特性を示すかを材料検討した。そえらの中で、同じ撮影環境において、より明るく発色する素材（の組み合わせ）や、加工性を考慮して材料を選定した。

選定した透明樹脂素材を用いて、図5～図8のように、折り紙アクチュエータ、パウチモータ、マッキベン式人工筋肉、およびワルシャワ型人工筋肉を作成した。それぞれの図は、無加圧状態と加圧（減圧）状態を併記した。

折り紙式アクチュエータは、視覚方向に関して各面の角度方向が変化することで、観察者からの色の見え方が変わることが分かる。

パウチモータは、基本的にのびにくいフィルム素材を用いて構成するインフレーションアクチュエータであるため、色というより模様の変化が観察された。

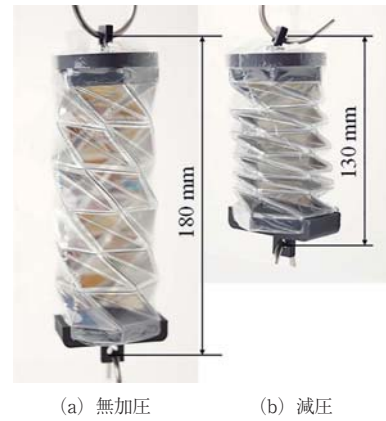


図5 光弾性を応用した折り紙アクチュエータ

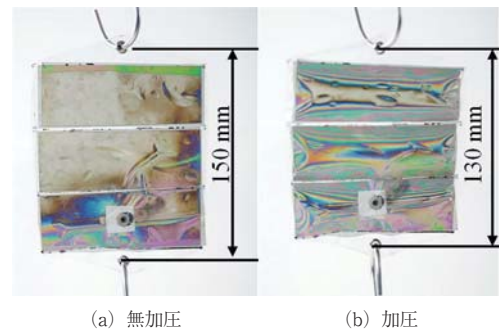


図6 偏光弾性を応用したパウチモータ



図7 偏光弾性を応用したマッキベン式人工筋肉



図8 偏光弾性を応用したワルシャワ型人工筋肉

マッキベン型アクチュエータは、透明素材を均一な角度で編み込むことに苦慮して、発色できている部分が少ない。今後は、光弾性素材で編み組チューブをつくる編み機もつくる予定である。

ワルシャワ側人工筋肉は、内部の透明樹脂チューブの変色を明確に確認できた。特に無加圧状態で色は見られず、加圧とともに、色が変化していき、最大変化時は写真のように赤い部分が増えるため、アクチュエータの変化（加圧）と視覚的な変化の関係を管理しやすい可能性が高いと考えられる。

本研究では、光弾性特性を応用してソフトアクチュエータの可視的な変色や模様の変化について実験的に検証した。素材や厚み、組み合わせや使い方などの基礎的な検討から、各アクチュエータでの光弾性特性の発生状態について

も、試作により確認した。今後は、それぞれのアクチュエータについて、さらにパラメトリックな実験を行い、物理的特性変化と、可視的な（色など）の変化を対応でけられるソフトアクチュエータを目指す。

〔成果の発表，論文など〕

- ・ 松田潮音，財部真輝，山田泰之，光弾性特性を用いて変色するソフトアクチュエータ — マッキベン型人工筋肉/ワルシャワ型人工筋肉の変色の検討一，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025, 2A2-C04, 日本機械学会, (2025, 6)
- ・ 松田潮音，大塚 瞭，山田泰之，光弾性特性を用いて変色するソフトアクチュエータ — 非伸縮性フィルム素材を用いたソフトアクチュエータの検討一，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025, 1A2-N02, 日本機械学会, (2025, 6)