

審査の結果の要旨

氏名 安井 真人

安井真人氏の博士論文は、眼球内手術など遠隔操作で駆動するマイクロロボットを実現するため新概念の磁気マイクロアクチュエータの研究について述べている。比重1で水中駆動が容易な中性浮力を持つ磁気光硬化素材を考案開発しマイクロ光造形法により製作した。その際、光硬化樹脂に大量の磁気粉末と中空ビーズを混入した光造形法樹脂の硬化過程の一般化数学モデルを開発し、サイズを問わず汎用的な硬化特性の定量的検討手法を構築した。本手法でスクリー型の磁気マイクロアクチュエータを試作し、液中での医療応用に十分な応答性を持つ遠隔3次元駆動制御に成功した。

磁場は人体に影響することなく通り抜けるため、磁気駆動マイクロマシンは低侵襲手術への応用が期待されている。磁気駆動マイクロマシンには主に2種類に分類される。一つ目は体積力を利用する方法で、磁石同士が引き合うことを利用する。二つ目は、スクリー形状で外部磁場で回転させ推進力を得る方法である。スケール効果の観点からは、前者はサブミリを超える比較的大きいサイズで、後者は幅広いサイズで有効である。

手術で利用する磁気駆動マイクロマシンのサイズは、発生力の観点から数ミリからサブミリが望ましい。しかしこのサイズでは重力の影響が強く効き、磁気駆動マイクロマシンの駆動を阻害するため磁気駆動マイクロマシンの3次元駆動の研究は進んでいなかった。サブミリ以上の体積力を利用した方法で3次元駆動に成功している研究は存在するが、巨大な励起コイルを用いた強磁場の必要となり移動速度も遅かった。またスクリー型の磁気駆動マイクロマシンでは、サブミリ以上のものを3次元はおろか2次的に制御することも実現できていなかった。上記のように重力の問題は、磁気駆動マイクロマシンの医療への応用を阻害していた。

そこで重力の影響をなくすために、磁気駆動マイクロマシンの比重を1にする手法を考案した。主材料である光硬化樹脂に、磁性微粒子と中空マイクロカプセルを最適に混合する手法である。比重が大きな磁性微粒子は磁性を付加するために加えている。中空マイクロカプセルは気体をポリマーで囲んだ形状をしており比重が1以下である。この特性を利用し、中空マイクロカプセルを最適に混合させることで軽量化をはかった。中空マイクロカプセルの濃度をあげると樹脂の比重も低下していき、比重1の中性浮力を持つ磁性光硬化樹脂の開発に成功した。

しかし一般に光硬化樹脂に磁性微粒子や中空マイクロカプセルを混入すると、光硬化樹脂の光硬化特性が変化する問題が発生する。従来微粒子による光硬化特性の変化を定量的

に予測可能な理論は存在しなかった。そこで黒色の磁性微粒子や白色の中空マイクロカプセルが光硬化特性との関係を解明する理論モデルを構築した。さらに磁性微粒子と中空マイクロカプセルの濃度を変えて光硬化特性を計測する実験により、本理論モデルの有効性を示した。その結果、微粒子の粒子径は大きくし横方向の散乱を抑えると硬化特性が大幅に改善されることが判明した。近年、光硬化樹脂に微粒子を混ぜ樹脂の機能化する研究が盛んになりつつある。本モデルは磁性微粒子や中空マイクロカプセル以外にも適用できる一般性を持つため、微粒子を混入した光硬化樹脂の開発に広く貢献する。

開発した中性浮力化した磁性光硬化樹脂を用いて、スクリー型磁気駆動マイクロマシンの3次元制御をおこなった。幅 0.3mm、長さ 2mm のスクリー型の構造物をマイクロ光造形法により作製した。半径方向に着磁し、2cm 角の水槽内で回転磁場をかけた結果、重力の影響を受けず3次元的に駆動することが示された。さらに回転磁場の方向や周波数を変えることで、磁気駆動マイクロマシンの進行方向や速度を 100m 秒以下の高速制御にも成功した。鉛直方向と水平方向の速度を比較した結果、試作磁気駆動マイクロマシンが中性浮力化されていることを示した。

磁気駆動マイクロマシンを細胞スケールまで小型化すれば、細胞のマニピレーションに応用できるため、磁気駆動マイクロマシンのマイクロ化を行なった。当初は 100 μ m の造形分解能を持つ2光子マイクロ光造形法の利用を試みたが、磁性微粒子に2光子マイクロ光造形の強い赤外パルスレーザーが照射されると熱による気泡が生じ造形することができなかった。そこで He-Cd レーザを用いた1光子マイクロ光造形法により磁性樹脂構造体をつくり、後で2光子マイクロ光造形法によりスクリー部分を造形付与する方法を開発した。このプロセスを用いて 10 μ m 程度の磁気駆動マイクロマシンの造形に成功し、外部磁場による水中での3次元制御を実現した。

磁気駆動マイクロマシンの素材開発から造形手法、光造形の一般理論モデル、磁気駆動マイクロマシンの試作、3次元駆動制御まで系統的かつ高度な研究成果をあげている。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。