

審査の結果の要旨

論文提出者 奥 寛雅

本論文は、「マイクロビジュアルフィードバックのための高速可変焦点光学系の研究」と題し、9章より構成されている。近年、マイクロマシン技術やバイオテクノロジーの発展に伴って、微小な対象の操作の補助や自動化の重要性が高まりつつある。しかしながら、微少な対象に対するセンシングの難しさから、実効的なシステムは実現されていない。この問題を解決する手法の一つとして、微小な対象に対して高速な視覚システムを用いたフィードバック制御を行う手法であるマイクロビジュアルフィードバック(MVF)が提案されている。本論文は、MVFにとって光学系の高速制御が重要であることを指摘した上で、光学系の高速制御を実現するための高速可変焦点レンズを提案し、その理論的考察、試作、性能評価、並びに高速可変焦点レンズを用いた高速可変焦点光学系の構築と応用実験を行い、その有効性を示すものである。

第1章は、「序論」と題し、MVFの概念とその応用例を述べて研究の背景を示した上で、本論文の目的と構成を述べている。

第2章は、「微生物トラッキングシステム」と題し、微生物を対象とした視覚トラッキングシステムについて述べている。微生物の運動は微生物の大きさに対して高速であるため、運動を捕らえるセンサには高速性が要求される。このため、高速なビジュアルフィードバックと顕微鏡の組み合わせであるMVFがこの要求に適することを述べ、特に、ビジュアルフィードバックの高速性が重要であることを論述している。さらに、実際に高速視覚システムを用いて微生物トラッキングシステムを構築し、2次元的に運動するゾウリムシを顕微鏡視野内に捕捉する実験を示し、MVFが微生物対象に有効であることを実験的に示している。

第3章は、「MVF用顕微光学系の特性制御と可変焦点レンズ」と題し、光学特性の高速制御について詳しく議論を進め、MVFに適用するためには光学特性の制御にどのような仕様が要求されるかを議論している。まず、光学特性の制御による画像処理として従来研究を説明し、MVFに適用するためには光学特性の制御が高速でなければならないことを説明している。これを実現するために、焦点面位置の制御に要求される性能を決定し、可変焦点を実現する方法を比較から、光学特性を制御を行う手法が最適であることを導いている。さらに、光学特性の制御をおこなう方法を比較し、可変焦点レンズが最適であることを示している。

第4章は、「高速可変焦点レンズ High-speed Focusing Lens (HFL)」と題し、可変焦点レンズに要求される仕様を検討し、高速応答を可能とする新たな可変焦点レンズである高速可変焦点レンズ(HFL; High-speed Focusing Lens)を提案している。まず、従来の可変焦点手法では要求される仕様は実現されないことを示し、液体を封入した薄いガラス容器内の液体の圧力を変えることでそのレンズ特性を変換させる方法を提案し、その設計方法を示している。また、実際に試作並びに基本的評価実験を行い、試作したHFLは1[kHz]の入力に対して応答可能であることを示している。

第5章は、「HFLの流路設計論」と題し、HFL内部の液体がHFLの性能に及ぼす影響について考察している。まず、液体を理想気体であると近似して、その膨張や圧縮とHFLの性能について考察し、容器の体積をできる限り小さくすること、液体の体積変化率を大きくすること、レンズ表面部分が発生する圧力を小さくすることが重要であることを示している。また、液体を非圧縮性の粘性流体と仮定し、円筒管モデルと拡大管モデルに定常流を流した場合にその圧力損失について求め、そこで起こる圧力損失はHFLに大きな応答遅れを及ぼすものではないことを述べている。さらに、液体のキャビテーションの問題について考察し、気泡の発生はHFLの性能に深刻な影響を及ぼすため、できるかぎり気泡の発生を防ぐ必要があることを説明している。

第6章は、「HFLレンズ部分の薄型化」と題し、HFLのレンズ部分を薄くするためには、流体の粘性抵抗の評価が重要であることを述べ、簡略化したモデルを用いて粘性抵抗の評価を行っている。次に、FEMを用いて流体の粘性抵抗を評価することによって流路の形状を決定し、実際にレンズの設計、試作を行い、その応答評価実験から、粘性抵抗の影響が理論と合っていることを示している。

第7章は、「MVFのHFLによる高速可変焦点光学系への適用」と題し、HFLと顕微鏡対物レンズを組み合わせて共焦点の原理を応用した高速可変焦点光学系を用いることで、対象の奥行き情報を取得する方法を提案し、実際に実験を行って、対象の奥行き情報を1[ms]で取得できることを示している。さらに、奥行き方向の一次元画像についてMVFを適用することで、対象の奥行き方向の運動についてトラッキングができることを実験的に示している。

第8章は、「HFLのダイナミック収差補正」と題し、HFLのレンズ径に関するスケーリングと収差補正について議論している。HFLのレンズ半径のスケーリングに対してHFLを構成する各部分がどのように変化するかを論じ、実現可能なHFLのレンズ半径の最大値は5[mm]であることを示している。異なる半径をもつ2つのHFLを組み合わせることで、動的に収差を補正する手法を提案し、実現可能な半径をもつHFLの組み合わせについてその収差を数値的に算出し、その結果から提案手法の有効性を示している。

第9章は、「結論」と題し、以上の結果がまとめられている。

以上要するに、本論文は、光学系の特性を高速に制御することがマイクロビジュアルフィードバック(MVF)にとって重要であることを示し、これを可能にする高速可変焦点レンズ(HFL)を提案・試作し、その高速性を実験的に確認するとともに、実際にMVFとHFLによる高速可変焦点光学系を組み合わせた実験からMVFに対する高速可変焦点光学系の有効性を示したものである。これにより、既存の光学系が持つ特性制御の速度のボトルネックを解消し、微小対象制御のみならず高速ビジュアルフィードバックの応用全般に新たな展開をもたらすものであり、関連する分野の研究の発展に貢献するとともに、計測工学の進歩に対して寄与することが大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。