

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 奥 寛雅

マイクロマシンやバイオテクノロジーの進歩に伴い微小な対象の加工や操作の重要性が高まりつつある。しかし、このような作業の補助や自動化はほとんど実現されていない。この主な原因として、微小な対象に適したセンサフィードバックシステムが実現されていないことが考えられる。

これに対し、これまで筆者らはこのような微小な対象のセンサフィードバックでは計測・フィードバックの高速性が特に重要であることを主張し、高速視覚と顕微鏡を組み合わせる微小な対象のフィードバックをおこなう手法であるマイクロビジュアルフィードバック(MVF)を提案して、特に機械系を対象とした実験からその有効性を示してきた。

本研究の目的は大きく分けて2つある。1つは、これまで議論されていなかった微生物対象についてMVFが有効であることを示すこと、もう1つは、その結果から必要性が導かれる高速光学特性制御を実現することである。

そこで、本論文では、まずMVFについて説明し、その課題として、微生物の制御についての有効性が未確認であることを指摘する。生物内部には高速な反応が存在することや、その運動は大きさに比べて高速であるため、センサには高速性が要求される。また、光による非接触な計測が重要であることを考えると、生物対象を制御するためには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が適する。実際にMVFが微生物対象について有効であることを示すために、運動する微生物のトラッキングを特に目的と仮定する。運動する微生物の観測では、対象の微生物が顕微鏡視野からすぐに外れてしまうという問題があり、対象を顕微鏡視野内にトラッキングしたいという要求が存在する。そこで、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、実際に2次元的に運動するゾウリムシを顕微鏡視野内捕捉する実験をおこなった。これから構築した微生物トラッキングシステムは運動する微生物をトラッキングできることがわかり、MVFが微生物対象に有効であることがわかった。また、この結果から、現在のMVFでは実現できない、微生物の運動にあわせて視野や焦点面位置を制御することの必要性が示され、微生物を対象としたMVFでは顕微光学系の高速な特性制御が重要であることがわかった。

次に微生物トラッキングシステムの結果から光学特性を高速に制御する手法について論じ、MVFに適用するためには光学特性制御にどのような仕様が要求されるかを説明する。まず、光学特性制御を用いた画像処理は従来から研究されており、画像だけからでは計測不可能な情報を取得できるために重要である。MVFの高速性を損なわずに光学特性制御を組み合わせるためには、光学特性制御に高速性が要求される。そこで、光学特性制御の目

的を焦点面位置の制御と仮定し、MVF に応用するために焦点面制御に要求される仕様を 1[kHz]の応答と焦点面位置の可動範囲が 500[μm]であること、と決める。実際に可変焦点を実現する方法には、光学特性を制御する方法、対物レンズを動かす方法、撮像素子を動かす方法があるが、光学特性制御をおこなう手法でないと仕様を満たせない。次に光学特性制御をおこなう場合に候補となるデバイスである AO, SLM, 可変焦点レンズを比較すると、可変焦点レンズが最も適する。そこで、本論文では可変焦点レンズについて詳しく研究をおこなう。

可変焦点レンズに要求される仕様は、可変焦点面の仕様から 20 倍の対物レンズと組み合わせることを仮定して、焦点距離の逆数が $-1/333\sim 1/315$ [1/mm], 応答速度が 1[kHz]である。既存の可変焦点レンズではここで要求される仕様は実現できない。そこで、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)を提案する。HFL は堅い容器の中に透明な液体を封入した構造をもち、容器には並行する二枚の透明な円形の板がとりつけられており、内部の圧力に応じて歪むように設計する。この部分がレンズとなり、ゆがめることで光の屈折する角度をかえ、焦点距離を変化させるものである。容器にはレンズとは別にもう一箇所ゆがむ面が取り付けられており、この面の面積はレンズ表面に比べて非常に大きく(100 倍程度)設計する。ここを高速な積層型アクチュエータで歪めることで内圧を伝えるとともに、アクチュエータの変位を効率よく増幅してレンズに伝えることで十分な焦点距離の変化を実現する。次に、その設計にあたって、特にレンズ表面部分とシリンダー部の設計方法について円盤の振動方程式から導出すると、円盤の半径を小さくし、厚みを薄くすることが重要であることがわかる。その結果にしたがって高速応答確認用の試作品 HFL V. 0.1, V. 0.15 を製作した。試作品の周波数応答測定実験の結果から確かに 1[kHz]で応答することが確認でき、提案した HFL の構造は 1[kHz]の入力に対して応答可能である。

HFL 内部の液体が HFL の性能に及ぼす影響について考察する。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 の性能について関係式をたてると、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がわかる。次に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る。これから、このモデルで考える限り、粘性抵抗による圧力損失は HFL に大きな応答遅れを及ぼすものではないことがわかった。最後に液体のキャビテーションの問題について考察し、気体の圧縮についての式から気泡の発生は 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がわかった。

また、HFL のレンズ部分を薄くするためには、流体の粘性抵抗の実際の形状での評価が重要である。レンズ部分を薄くすると、液体の流れる流路の断面積が小さくなるので、それに伴って液体の粘性抵抗が増す。粘性抵抗が大きすぎると流れを妨げることで高速な応答が実現できなくなる。そこで、実際の粘性抵抗は流路の形状に依存するので、流路の形

状をきめるために FEM を用いて流体の粘性抵抗を評価することで、実現可能と思われるレンズ部分の設計をおこなう。この結果から、レンズ部分の厚みは流路部分が 2[mm]まで薄くすることが可能であると見積もられた。最後に、レンズ部分を薄くした HFL V0.2 を設計し、実際に試作して応答特性を測定した。これから、流路による粘性抵抗の影響は認められず、設計した流路は適切であった。また、レンズ表面形状測定から、加工精度が原因でレンズ表面形状が理論的な形状とは異なっているが、解決策として精度の高い加工法を適用することが考えられることを示した。

次に、実際に HFL が MVF にとって有効であることを実験から示す。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構築すると、共焦点の原理と焦点面制御を組み合わせることで対象の奥行き方向の情報を計測することが可能になる。そこで、実際にガラス薄板を対象として奥行き方向の情報を測定する実験をおこない、対象の奥行き情報を 1[ms]で取得できることを示した。さらに、奥行き方向の二次元画像について 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ので、人間が対象の奥行き方向位置に手で外乱を入れ、その対象位置に焦点を合わせ続ける実験をおこなう。この結果、実際に人間が手で入れる外乱にたいしてトラッキングできることを示し、HFL を用いた高速可変焦点光学系は MVF の高速性を損なうことなく焦点面制御を実現し、MVF に適していることが示された。

最後に将来的に HFL に重要と思われる、HFL のレンズ径に関するスケージングと収差補正とについて議論する。HFL のレンズ半径のスケージングに対して HFL を構成する各部分がどのように変化するかについて関係式を導出し、その式を用いることで、積層型ピエゾアクチュエータの出力の限界から実現可能な HFL のレンズ半径を求めると、最大のレンズ半径は 5[mm]であった。次に、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た。

以上の議論から、

- ・微生物の計測・制御に MVF が適していること
- ・MVF にとって顕微鏡の光学特性を高速に制御することが重要であり、高速な光学特性制御の実現には可変焦点レンズが適していること
- ・提案した高速可変焦点レンズ HFL が 1[kHz]以上の高速な応答を可能とすること
- ・HFL を用いて構築した高速可変焦点光学系に MVF を適用することで光軸方向のトラッキングが可能になり、HFL を用いた高速可変焦点光学系が MVF に適していること
- ・HFL は、複数を組み合わせて制御することで、将来的には動的に収差を補正することが可能であると考えられること

が示せた。