

論文内容の要旨

博士論文題目

Multi-channel bandpass mosaic filter for spectral imaging in near-infrared fundus camera

(近赤外眼底カメラにおける分光イメージングに向けた多チャネルバンドパスモザイクフィルタに関する研究)

氏 名 TANG HONGHAO

(論文内容の要旨)

眼底カメラは、医療機器として、眼疾患、循環器疾患、脳血管疾患、神経疾患などを検出することができる。可視光による RGB カラー画像は、組織の分光反射率から得られるものであり、より高解像度で幅広い分光情報を得ることで、病気の正確な診断に役立つ。眼底分光撮影を行うには、分光器と眼底カメラの組み合わせや、眼底カメラに複数のバンドパスフィルタを導入するなどの方法がある。しかし、これらの方法では、検査装置が大型化し、長時間露光や複数回の撮影が必要になる。そこで本研究では、小型で短時間での撮影が実現できる、近赤外線 (NIR) 領域の分光撮影を可能とする CMOS イメージセンサー (CIS) 用オンチップマルチチャネルモザイクフィルタ搭載眼底カメラの開発を目的とした。

本研究では干渉フィルタの原理に基づいて分光フィルタを設計・製作した。このフィルタは、高屈折率と低屈折率の誘電体を $1/4$ 波長の厚さで 13 層重ねている。対称的な上下の $1/4$ 波長スタックの間には中間層が挟まれている。中間層の厚さを変えることで、各チャネルの通過帯域の波長を制御できる。本研究では、高屈折率材料として TiO_2 、低屈折率材料として SiO_2 を用いた。一般に、マルチスペクトルイメージングでは、チャネル数が多いほど分光分解能が高くなる。しかし、スナップショットマルチスペクトルイメージングにおいてチャネル数が少ないと、単位面積当たりの同一チャネルの画素数が減少するため、各チャネルの空間解像度が低下する。さらに、チャネル数が多くなると、製造工程が複雑になり、歩留まりが悪くなる。そのため、チャネル数と空間解像度はトレードオフの関係にある。

今回作製したモザイクフィルタの通過波長帯は 5 つで、1 つのモザイクブロックは 7×7 画素の面積であった。これは、空間分解能が十分でないことを示している。人間の眼は常に不随意運動 (固視運動) しているため、同じ検出領域の画像を異なるバンドパスチャネルで連続撮影することが可能である。眼底像の動きを追跡し、複数のフレーム画像を重ねることで、眼底像全体を全チャネルで収集することが可能である。また、

スペクトル分解能を向上させるために、スペクトル復元用のデコンボリューションアルゴリズムを開発した。分光計測処理において、各バンドパスチャンネルの強度は、特定の波長における実際の反射強度、CMOS イメージセンサーの感度、特定の波長に対するフィルターの透過率の畳み込み処理となる。したがって、デコンボリューション問題を解くことにより、スペクトルを再構成することができる。

以上より、眼底検出のための小型分光撮像システムを提案した。この分光撮像システムは、5チャンネルモザイクフィルタと CIS で構成されている。眼底カメラによる動画撮影では、眼球が不随意運動するため、同じ検出領域の画像を異なるバンドパスチャンネルで連続撮影することが可能である。そこで、動いている対象を撮影し、複数のフレーム画像を合成することで、各画素のスペクトルを取得できることを確認した。開発したアルゴリズムを適用することで、元の解像度よりも高いスペクトル分解能を実現した。

(論文審査結果の要旨)

眼底カメラは、医療機器として、眼疾患、循環器疾患、脳血管疾患、神経疾患などを検出することができる。可視光による RGB カラー画像は、組織の分光反射率から得られるものであり、より高解像度で幅広い分光情報を得ることで、病気の正確な診断に役立つ。眼底分光撮影を行うには、分光器と眼底カメラの組み合わせや、眼底カメラに複数のバンドパスフィルターを導入するなどの方法がある。しかし、これらの方法では、検査装置が大型化し、長時間露光や複数回の撮影が必要になる。そこで本研究では、小型で短時間での撮影が実現できる、近赤外線 (NIR) 領域の分光撮影を可能とする CMOS イメージセンサー (CIS) 用オンチップマルチチャンネルモザイクフィルター搭載眼底カメラの開発を目的とした。

本研究では干渉フィルターの原理に基づいて分光フィルターを設計・製作した。このフィルターは、高屈折率と低屈折率の誘電体を $1/4$ 波長の厚さで 13 層重ねている。対称的な上下の $1/4$ 波長スタックの間には中間層が挟まれている。中間層の厚さを変えることで、各チャンネルの通過帯域の波長を制御できる。本研究では、高屈折率材料として TiO_2 、低屈折率材料として SiO_2 を用いた。一般に、マルチスペクトルイメージングでは、チャンネル数が多いほど分光分解能が高くなる。しかし、スナップショットマルチスペクトルイメージングにおいてチャンネル数が少ないと、単位面積当たりの同一チャンネルの画素数が減少するため、各チャンネルの空間解像度が低下する。さらに、チャンネル数が多くなると、製造工程が複雑になり、歩留まりが悪くなる。そのため、チャンネル数と空間解像度はトレードオフの関係にある。

今回作製したモザイクフィルタの通過波長帯は 5 つで、1 つのモザイクブロックは 7×7 画素の面積であった。これは、空間分解能が十分でないことを示している。眼底カメラによる動画撮影では、眼球が不随意運動するため、同じ検出領域の画像を異なるバンドパスチャンネルで連続撮影することが可能である。そこで、動いている対象を撮影し、複数のフレーム画像を合成することで、各画素のスペクトルを取得できることを確認した。また、スペクトル分解能を向上させるために、スペクトル復元用のデコンボリューションアルゴリズムを開発した。分光計測処理において、各バンドパスチャンネルの強度は、特定の波長における実際の反射強度、CIS の感度、特定の波長に対するフィルターの透過率の畳み込み処理となる。したがって、デコンボリューション問題を解くことにより、スペクトルを再構成することができる。開発したアルゴリズムを適用することで、元の解像度よりも高いスペクトル分解能を実現した。

今後本技術を発展させることで、様々な眼底画像計測への展開が可能であり、その成果は、学術的に新しい知見を見出していると判断され、審査委員一同は、本論文が博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認めた。