

氏名(本籍)	川嶋 なつみ (和歌山県)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第151号
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当者
学位授与の年月日	令和3年3月24日
学位論文題目	Ultra-miniature long-wavelength infrared Fourier spectroscopy with high sensitivity and wavelength resolution for on-site component identification
論文審査委員	(主査) 石丸 伊知郎 (副査) 高尾 英邦 (副査) 寺尾 京平 (副査) 西山 成 (副査) 和田 健司

論文内容の要旨

We aim to realize a society in which the passing of daily data contributes to solving social issues, such as achieving Sustainable Development Goals, by establishing highly sensitive and ultra-miniature spectroscopic systems mounted on wearable terminals. Presently, we obtain component data and identify a component using expensive and large equipment at laboratories and specialized institutions after samples are picked up on site. However, if a small and low-cost sensor that measures and identifies components of samples becomes common, the public can obtain component information on site and specialists can receive on-site information from them. An on-site temporal monitoring system of component information would thus be realized. Presently, small sensors mounted on wearable terminals can detect acceleration and illuminance but few other components. Attempts have been made to miniaturize spectroscopic imagers in the visible wavelength region and mount them on smartphones. However, infrared spectroscopic imagers that are appropriate to component analysis have not yet been mounted on smartphones. It is difficult to obtain data that have a high signal-to-noise ratio using long-wavelength infrared spectroscopic imagers because the photons of long-wavelength infrared light are absorbed readily by water and the light intensities are thus very weak. There are two types of spectroscopy, wavelength dispersive and Fourier, which have different optical systems. In principle, wavelength dispersive spectroscopy uses a slit to separate the weak light into individual wavelengths and then

detects their intensities.

Application of wavelength dispersive spectroscopy to long-wavelength infrared spectra is difficult because the light intensities are low.

Conversely, Fourier spectroscopy has high sensitivity and is well suited to long-wavelength infrared measurement applications because it uses white light containing multiple wavelengths over a broad band.

Fourier spectroscopy uses one of two types of instruments. The first is the temporal phase-shift interferometer, which registers optical path differences by moving a mirror, as used in the Fourier-transform infrared spectrometer based on the Michelson interferometer. The second is the spatial-phase-shift interferometer, which registers optical path differences using a Wollaston prism to remove the need for moving parts, as used in the static imaging Fourier transform spectrometer. Therefore, spatial-phase-shift interferometers have high time resolution and can measure components quantitatively and continuously. However, the light intensity per pixel of the array device is too low because, in principle, over the objective plane of the interferometer, the beam will spread out from the bright point.

I establish the wide-field-stop and beam-expansion method, superimposing interferogram method, and point-one-shot Fourier spectroscopy to improve the detected light intensity, the interference definition, and the wavelength resolution of spatial-phase-shift interferometers that can be used as small infrared spectrometers mounted on wearable terminals. Point-one-shot Fourier spectroscopy, which uses only one lens and a camera and one spatial-phase-shift interferometer, detects two-dimensional fringe patterns using point-area information and thus achieves high wavelength resolution using a low-cost low-pixel camera.

Conventionally, the sensitivity that is combined using the detected light intensity and interference definition of spatial-phase-shift interferometers is lacking because a field stop is inserted in the optical system and the wavelength resolution and sensitivity of interferometers have a trade-off relationship. However, by combining my three proposed methods, we realize ultra-miniature long-wavelength infrared Fourier spectroscopic imagers that have high sensitivity and wavelength resolution for on-site component identification.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「Ultra-miniature long-wavelength infrared Fourier spectroscopy with high sensitivity and wavelength resolution for on-site component identification」について審査委員会にて審査を行った。本学位論文はウェアラブル端末に

搭載可能な遠赤外分光装置を実現するための基盤技術であるビームエキスパンダー式高感度化手法、インターフェログラム重畳法、ポイントワンショットフーリエ分光法を提案しその効果を実証した。以下 4 つの章で構成しており、各章の概説は次の通りである。

第 1 章では、赤外分光法及びそれに使用されている干渉計の現状を概説し、本研究の研究背景、研究目的、研究の位置付けを述べた。波長 6~15 μm の中赤外帯域は指紋領域と呼ばれ、分光吸光度による成分同定能力が高いことで知られている。しかし、中赤外光は光子エネルギーが低く水分による吸収が極めて大きいことから、中赤外分光装置を用いた SN 比の高いデータの取得は困難である。そもそも赤外分光法には分散型分光法とフーリエ分光法の二種類存在するが、分散型分光器は原理的に回折格子などの分散素子を用いて波長ごとの光を検出することから感度が不十分であるため生体計測には不向きであった。対して、広帯域における多波長の光を含む白色光を同時に測定可能であるという点で高感度なフーリエ分光法がよく用いられてきた。フーリエ分光法は FTIR (Fourier transform infrared spectrometer) のようなマイケルソン干渉計をベースにした可動ミラーによって時間的に光路長差を生じさせる時間的位相シフト干渉計と、ウォーラストンプリズム等を用いることで可動域をなくした sIFTS (static imaging Fourier transform spectrometer) のような空間的位相シフト干渉計の 2 つに分けられる。生体計測を前提とした場合、生命活動による皮膚や血管の動き等、常に動きを伴う生物が計測対象となるため、赤外分光装置には高い計測感度の他に高い時間分解能も求められ、空間的位相シフト干渉計の使用が必須となる。

第 2 章では、空間的位相シフト干渉計の 1 つであるワンショットフーリエ分光法の構成及び視野絞りの開口面積と回折角に着目したビームエキスパンダー式高感度化手法を提案し、分光器の性能評価の結果を述べた。開口面積の増加により入射光量が増加することで分光器の感度が改善される。開口幅の増加に伴う回折角の減少は対物レンズと視野絞りの間に平凹シリンドリカルレンズを挿入することで改善した。

第 3 章では、空間的位相シフト干渉計の高感度化及び干渉鮮明度の向上を目的としたインターフェログラム重畳法を提案した。視野絞りの開口幅の最大値を明らかにする際、開口幅に対する干渉鮮明度の依存性を発見した。この光学現象を物理的モデルにより仮説を立て実験により実証することで、光学系の物体共役面上にて使用する多重スリットの設計手法を確立した。また、インターフェログラム重畳法における課題である波長の狭帯域化現象を解消する広帯域多重スリットを提案する。多重スリット設計時に使用する中心波長周辺の光が主に抽出されて干渉縞を形成することから、特定の狭帯域の波長のみしか分光計測に使用することができない。この波長の狭帯域化の現象を物理モデルにより仮説を立て実験的に明らかにした。

第 4 章では、空間的位相シフト干渉計における波長分解能の改善が可能なポイントワンショットフーリエ分光法を提案する。本手法は背面を 2 軸周りの傾きを持ったウェッジプリズムの形状にした対物レンズ 1 個と低解像度カメラのみのシンプルな光学構成で実現す

ることができる。干渉縞を 2 次元に展開し、同位相の画素を繋ぎ合わせることで長い光路長を確保することが可能な手法である。炭酸ガスレーザーによる検証実験の結果、干渉縞及び波長分解能の改善を確認することに成功した。

本学位論文に関する内容として、学会誌 (Optical Engineering、Optical Review) に英文 2 件、及び国際会議 (Proc. of SPIE) に 1 件を含む複数の学术论文を掲載された。

以上により、本学位論文はその価値とオリジナリティは国際的にも認められている。本学位審査委員会は、審査申請者が香川大学大学院の博士 (工学) の学位授与に値するものであると判定した。

最終試験結果の要旨

公聴会での 1 時間 15 分の発表後、口述試験では主査と 4 名の副査による質疑応答を 1 時間程度行った。公聴会の発表では、空間的位相シフト干渉法と言う学術分野に於ける根本的な低感度と言う課題に対して、川嶋氏が提案するインターフェログラム重畳法が理論的に解決することを論理的に説明できていた。口述試験では、下記の 3 例に示すような 4 名の副査からの質問に対して的確に答えることができています。

【質問例 1】理論値と検証実験との主な誤差要因は？また、誤差要因は独立か従属か？

回答：主な誤差要因は以下の 2 点であり独立した関係である。

① 干渉鮮明度：マルチスリット開口部の加工精度と調整精度

→ 開口幅の $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度の加工誤差が鮮明度に対して 11.8%の影響がある。

② 波長分解能：フーリエ変換の窓関数の処理方法とカメラの階調

→ ゼロフィリング後に窓関数処理を施すことで 20%の改善効果が期待できる。また、現状の 8 bit から 16 bit に階調を増やすことにより 17.8%の改善が理論的に期待できる。

【質問例 2】空間分解能と波長分解能の関係は？

回答：波長分解能を向上させることにより空間分解能は劣化する。

波長分解能を向上させるために開口数を増加すれば、水平方向の空間分解能は低下する。しかし、水溶液等の面内の成分分布が均一な計測対象に対しては高感度かつ高い SN 比の計測が可能になる。更に、提案するポイントワンショット分光法によれば、高い波長分解能をも同時に確保することが可能になる。

【質問例 3】赤外分光法が得意、あるいは不得意とする計測対象は何か？

回答：有機物は得意であるが、水を含む試料は膜厚の薄い物にしか適用できない。

赤外光の吸収は、分子構造、特に官能基の構造起因による振動や回転運動のエネルギーにより生じる。一般的に、気体や液体、固体の有機物であれば赤外吸収スペクトルを測定可能であることが知られている。しかし、水による赤外光の吸収も極めて顕著であることから膜の厚い液体試料の計測には適していない。

以上の、2 時間を超える公聴会と口述試験による最終試験を踏まえて、主査と 4 名の副査により可否の審議を行った。その結果、100 年を超える歴史を有する赤外分光法と言う学術

分野に於いて、“その場計測”と言う先駆的な技術分野を開拓した学位論文であり、審査委員の総意により、博士（工学）の取得に相応しいと判断して合格とした。