

分光・偏光サーマルイメージング実現に向けた回転するメタオプティクス

サリー・コール・ジョンソン

米パデュー大(Purdue University)の研究者らは、光学エンジニアリングと最先端の計算イメージング技術を融合させた。回転するスタック型メタサーフェスによって熱光をスペクトル成分と偏光成分に分解する。

赤外線画像(サーマルイメージング)は現在、セキュリティ、サーモグラフィ、暗視カメラ、医療診断、リモートセンシングなど幅広い用途で使われている。しかし、大きな欠点が1つある。従来の赤外線画像システムは情報損失が大きい傾向にあるため、熱画像が不鮮明になってしまう。

パデュー大のズービン・ジェイコブ教授(Zubin Jacob)の研究チームは、この問題を早期に解決する方法を見つけ出し、熱アシスト検出・測距(HADAR)を開発した。HADARは、サーマルイメージングにおいて構造を詳細にでき、夜の暗闇の中でもまるで日中のように機器が知覚できる。

ジェイコブ教授と熱フォトンクスでも研究をしているポスドク研究員のシュエディー・ワン氏(Xueji Wang)は、「HADARは、長波長の赤外線スペクトル

にあるスペクトル分解を必要とする。コンセプトは、人間の目が赤、緑、青(RGB)の色を認識する方法に似ているが、HADARは目に見えない赤外線スペクトルの“色”を検出する」と説明する。「従来のスペクトル分解を行うサーマルイメージングは大型のフィルターホイールや干渉計に依存するため、一般に巨大かつデリケートになってしまう」。

近年のメタオプティクス分野の著しい発展により、可視域のスペクトル情報については、よりコンパクトで効果的な方法でキャプチャすることが容易になっている。

ジェイコブ教授は、「我々の現在の研究は、これらの発展を赤外域に応用したものだ。メタサーフェスをベースにしたアプローチを導入することで、分光・偏光サーマルイメージングを実現している」と話す。「我々の目標は、HADARをより広く普及させ、レーダー、ライダ、ソナーのような確立された技術のレベルにまで高めることだ」。

そのために、研究チームは高度なサーマルイメージング向けのメタオプティクス技術を開発した。ワン氏は、「メタオプティクスとは、メタマテリアルとして知られている人工光学材料を用いることであり、サブ波長スケールで光を操作できる」と述べる。

研究チームのメタオプティクス技術は、主に熱放射の強度をとらえる従来

の赤外線カメラの枠を超え、スペクトルや偏光の詳細も明らかにすることで、撮影対象をより包括的に理解できるようになる(図1)。

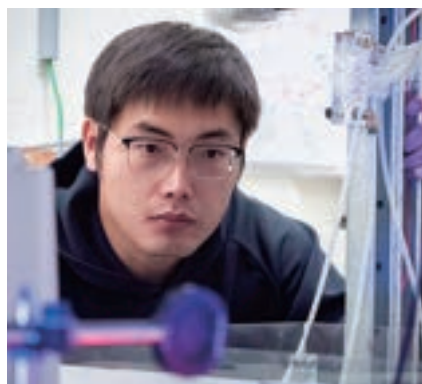
回転するメタサーフェスと新規の計算アルゴリズムの邂逅

研究チームは、赤外熱放射の透過効率が高いセレン化亜鉛(ZnSe)から作られたメタサーフェスを設計した。メタサーフェスとは、光を複雑な方法で操作する極薄構造表面のことである。このメタサーフェスの上に、入射光と相互作用して分光・偏光分類を可能にする金の微細構造を搭載した。

ワン氏は、「これらのメタサーフェスを積み重ね、物理的に回転させる(スピニングさせる)ことで、熱放射をスペクトル成分と偏光成分に分解できる」と話す。「本システムを標準的な赤外線画像と統合することで、複雑なデータを画像ベースで記録できる。最後に、このデータを我々の計算アルゴリズムが解析し、赤外線画像内の各ピクセルの詳細なスペクトル情報と偏光情報がわかる」。

本技術は、主にコンパクトさ、堅牢さ、多用途性という理由から際立っている(図2)。従来の分光サーマルイメージング機器は、大きなフィルターホイールまたは干渉計に依存する巨大な卓上型システムが多く、ポータブルデバイスには不向きだった。

ワン氏は、「我々の手法を用いれば、約10×10×10cmという非常に小さなモジュールを作ることができる」と述べる。「我々が設計したスピニング



研究室のシュエディー・ワン氏(ズービン・ジェイコブ教授の研究チーム、パデュー大提供)

操作は、標準的な回転装置で効率よく実行できる。これは、干渉計で必要とされるデリケートで波長スケールの鏡の動きよりも堅牢であることを意味する。携帯性や堅牢性が増したことで、我々のシステムはより幅広いアプリケーションに適応できる」。

この過程で最大の難関であり、研究チームにおいて鍵となるイノベーションが、大面積メタサーフェスの開発だった。ワン氏は、「望ましい赤外線応答が生じるようメタサーフェスを設計した。並行して、イメージング用途に適した直径2.5cmという大面積デバイスを作製するため、複雑な製造プロセスも開発した」と話す。

これらの大面積メタオプティカルデバイスと、計算イメージングアルゴリズムとの統合が、本研究で重要な役割を果たしたことに注目すべきである。この組み合わせにより、熱放射スペクトルの効率的な再構成が可能になり、従来よりもコンパクトで堅牢、効果的な分光・偏光サーマルイメージングシステムが実現した。

研究チームは、本システムを市販のサーマルカメラと組み合わせることで、

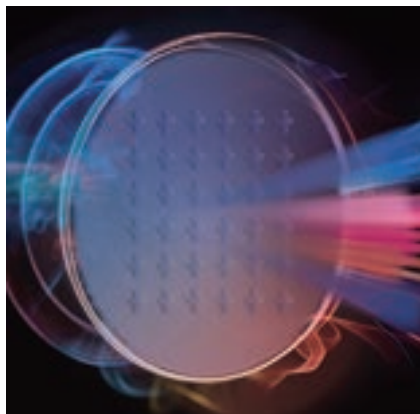


図1 研究者らは、回転するメタサーフェスデバイスを積み重ねることで、従来の赤外線画像ではとらえることができなかった熱放射のスペクトルや偏光を詳細にとらえる(ワン氏、パデュー大提供)

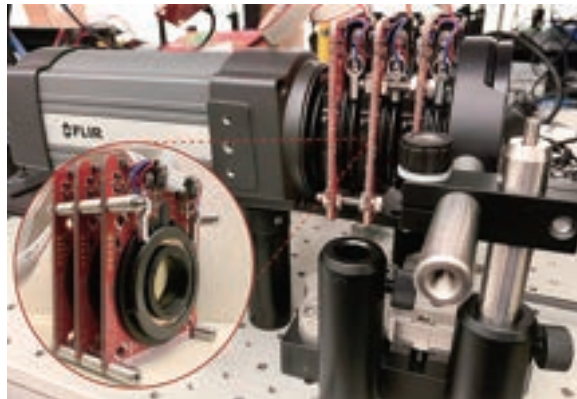


図2 研究チームのイメージングセットアップでは、回転するスタック型メタサーフェスが熱光をスペクトル成分と偏光成分に分解する。従来の長波長赤外線カメラにスタック型メタサーフェスを搭載し、計算イメージングアルゴリズムと組み合わせることで、コンパクトで堅牢な分光サーマルイメージングシステムを作製した(ワン氏、パデュー大提供)

従来のサーマルカメラでは困難だったさまざまな材料の分類が可能になることを実証した。

幅広い応用への期待

研究チームのシステムは、特に詳細な赤外線画像が要求される場面で幅広く応用できる。ジェイコブ教授は、「たとえば、セキュリティ分野において、隠し持っている道具や物質を検出することで、空港システムに革命を起こすだろう」と話す。「分光・偏光シグネチャに基づいて温度変化を識別し、物質を同定できることで、安全性と効率の両方を向上できる」。

分光サーマルイメージングは、オーバーヒートしている機械を故障前に正確に特定できるため、予知保全にも活用できる。医療用途では、体温変化を正確に把握することで診断のアシストが可能だ。

ワン氏は、「我々のシステムはコンパクトで堅牢な設計のため、さまざまな環境条件への適合性が増している。自律航法にも有効だ」と話す。「従来の自律航法はRGBカメラに大きく依存しており、低照度や悪天候のような厳しい条件下では苦戦を強いられる」。

分光・偏光サーマルカメラはこうした困難な状況でも、RGBカメラや一般的なサーマルカメラよりもはるかに鮮明な画像をもたらすため、重要な情報

を得ることができる。ジェイコブ教授は、「リアルタイム映像が可能になれば、この技術はライド、レーダー、ソナーと同様に自律走行車に不可欠なものとなるだろう。人体の熱を検出することで厳しい状況下でも個人の位置を特定できるので、現場の把握や安全・救助活動全体が大幅に向上するだろう」と話す。

メタサーフェスの設計研究

次はスペクトル分解能、透過効率、画像キャプチャと処理速度の向上に焦点を当てる。ワン氏は、「より複雑な光操作ができるようメタサーフェスの設計を改良し、スペクトル分解能をより高くすることを計画している」と話す。

スタック型メタサーフェスの利用によって透過効率とシグナルノイズ比が制限されるため、現在、研究者の実証実験は高温の対象物に限定されている。ワン氏は、「材料の改良、メタサーフェスの設計、反射防止コーティングのような技術を用いることで、室温でのイメージングに拡張することを目指している」と補足する。「もう1つの目標は、リアルタイムで映像をキャプチャするために、高速回転マウントを開発することだ。こうした進歩は、本技術を研究室から商業利用へと移行させる鍵となる」。