

メタオプティクスでモバイルスケールのハイパースペクトルイメージングが可能に

アラン・ジャン、ナーレン・イエライ

メタオプティカルスペクトルイメージングは、ハイパースペクトルイメージングを大型のラボシステムからスケーラブルな実世界に即したソリューションへと転換している。

従来のRGBカメラは、3つの広いスペクトルバンドのみを捕捉するのに対し、ハイパースペクトルイメージングは、物質のスペクトルシグネチャ全体をキャプチャし、長年にわたってさまざまな業界に対する可能性を秘めてきた。しかし、サイズが大きく、機械式で、コストの高い分散光学系に依存するレガシーシステムが足かせとなり、この技術は主流分野での採用には至っていない。従来のシステムは、プリズム、回折格子、またはチューナブルフィルタが必要で、これらにかなりの光

路長と精密なアライメントが必要となるため、大型で脆弱で高額な装置となっている。

米チューノプティクス社(Tunoptix)は、根本的に異なるアプローチを採用し、機械的な複雑さをエンドツーエンドのメタオプティカル設計で置き換えた。この設計では、スペクトル情報を捕捉時に直接符号化する(図1)。そうすることで、かさばる分散光学系や外部処理が不要となり、ハイパースペクトルシステムのサイズとコストが大幅に削減される。これによって、新たな

市場と応用分野が開かれる。

メタオプティカル アーキテクチャと設計原則

当社のプラットフォームの中心にあるのは、半導体リソグラフィプロセスで製造された、工学的に設計されたナノ構造体であるメタオプティクス素子に、独自の機械学習アルゴリズムを組み合わせた、コデザインシステムである。これらのメタレンズとフィルタは、複数の光学機能を同時に実行し、チップスケール集積に対応している。

その結果として得られるのが、以下のイノベーションによって高忠実度のハイパースペクトルイメージングを実現する、モジュラー型マルチアーチ

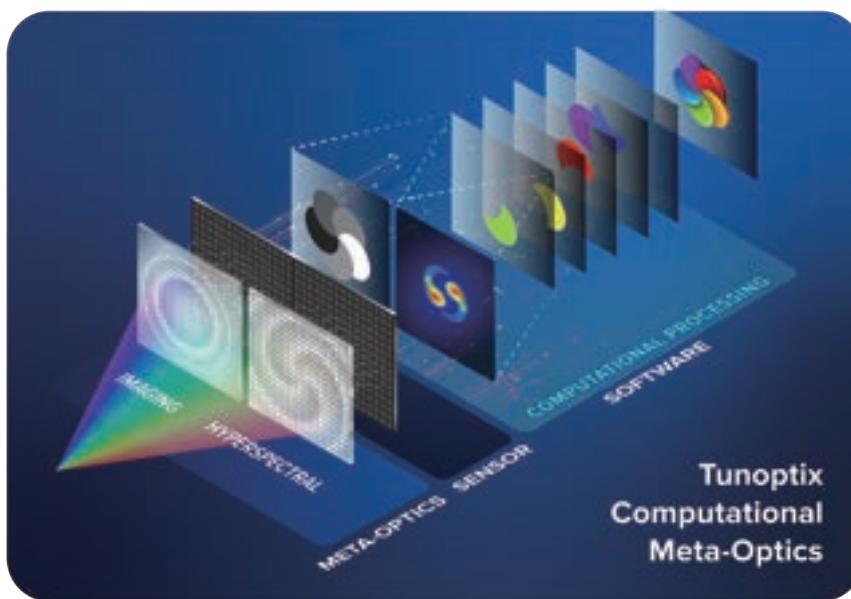


図1 チューノプティクス社のコンピュテーションナルメタオプティクス(提供:チューノプティクス社)

ヤーアーキテクチャである。

工学的に設計されたメタレンズ。当社の超薄型メタレンズは、空間的詳細を維持しつつ高い光スループットを実現するように設計されており、従来のシステムと比べて信号対雑音比を向上させる。これにより、コンパクトなモバイルスケールのモジュール内での高分解能イメージングが可能となる。

内蔵されたスペクトルフィルタ。デザインされたメタオプティカルフィルタにより、全視野にわたるスペクトル識別が可能である。これにより、アバーチャごとの多重スペクトルイメージングが可能となり、かさばる分散素子が不要となる。

スペクトル復号化。当社のモジュールは、スペクトルチャンネルデータを直接提供するようにキャリブレーションされており、これによってキャプチャ後の再構築が不要となる。オプションのソフトウェアツールによって、スペクトルアライメントの微調整や用途に特化した解析を行うことができる。

このエンドツーエンドのメタオプティクスモデルは、スペクトルフィルタとレンズをコンパクトなハードウェアプラットフォームに統合することで、システムの複雑さを増大させることなく、スケーラブルで効率的な統合を可能にする。

当社の現行のハイパースペクトル設計は、400～950nm (VNIR) で20nm未満のスペクトル分解能を達成し、従来のシステムの1000分の1未満である1cm³の体積に収まる。

- ・イメージングモード:スナップショット
- ・スペクトル範囲: 400～950nm (VNIR)
- ・スペクトル分解能:20nm未満
- ・チャンネルあたり分解能: 約720 × 480ピクセル(チャンネル数は30以上)

- ・視野:60°以上(対角)
- ・フレームレート:30fps以上
- ・消費電力:500mW未満
- ・動作温度:-20°C～70°C

製造とスケーラビリティ

当社の開発戦略の重要な項目の1つが、スケーラブルで高歩留まりの製造を確保することである。当社のメタオプティカル素子は、CMOS(相補型金属酸化膜半導体)互換のリソグラフィプロセスを使用して製造されているため、ファブレスファウンドリビジネスモデルによるウエハスケールの製造が可能である(図2)。これにより、スケーラビリティと一貫した品質が保証され、ユニットあたりコストが抑えられる。

後処理には、自動化されたウエハレベルテストやCMOSイメージセンサの集積などがあり、一貫した光学性能と分光性能を確保するためのプロセス制御が行われる。

ハイパースペクトルのフォームファクタとコストを劇的に削減することにより、当社の技術は次のような新しい用途を切り拓く。

モバイルデバイスと民生機器。スマートフォン、ウェアラブルデバイス、タブレットに、食品検査、スキンケア、パーソナルヘルスモニタリング、高度な色精度を実現するコンパクトなハイパースペクトルモジュールを搭載することが可能になる。

ヘルスケアとウェルネス。当社の小型モジュールは、スキンケア、オーラルケア、心肺モニタリング(反射率に基づく血中酸素濃度や水分量の測定など)をサポートする。

産業オートメーションとロボティクス。工場現場では、当社のシステムによって材料分類と品質管理を狭い空間で行うことができる。ロボティクスと

AR/VRの分野では、マシンビジョンと環境アセスメントを強化することができる。

農業と食品安全性。現場に展開可能なカメラによって、作物の状態、熟度、汚染をリアルタイムに評価することにより、精密農業と合理化された食品検査をサポートする。

防衛と安全保障。当社のモジュールは、状況認識、危険物検出、無人プラットフォーム用の軽量で堅牢なシステムをサポートする。

技術的障壁の克服

実環境に対応するメタオプティカルイメージングシステムを構築するには、以下のようないくつかの根本的な課題を解決する必要がある。

キャリブレーションと安定性。チューナブル光源と積分球を用いた自動化手順により、各ピクセルのスペクトル応答をマッピングする。これにより、実際の照明下におけるスペクトル忠実度とチャンネルレベル精度が確保される。

環境的堅牢性。温度変化や湿度に耐えて、一貫した光学特性を維持するように設計する。

演算効率。モバイルプロセッサやエッジプロセッサにおけるリアルタイムのスペクトル出力をサポートするようにシステム応答を最適化する。

統合サポート。OEMによる統合を簡素化するためのソフトウェア開発キット、リファレンスデザイン、キャリブレーションユーティリティを提供する。

戦略的パートナーシップと技術的エコシステム

メタオプティカルスペクトルイメージングを前進させるには、光学、ナノファブリケーション、コンピューテーションナルイメージング、システム統合な

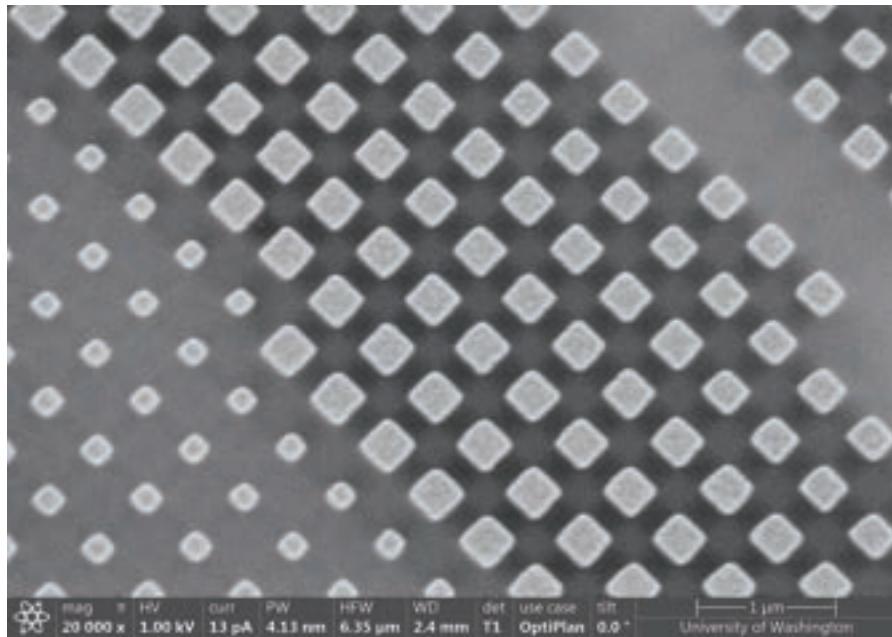


図2 メタオプティクスのSEM画像(提供:チューノプティクス社)

ど、複数の分野にわたる専門知識が必要である。チューノプティクス社は、学術機関、OEM(Original Equipment Manufacturer)、製造専門企業と連携して、イノベーションの促進と生産規模の拡大を図っている。

社内イノベーションと ファブレス運営

中核的な光学設計とシステムエンジニアリングは、アラン・ジャン(Alan Zhan)統括の下で社内で行っている。当社はファブレスモデルを採用しており、主要なナノファブリケーションファウンドリやオプトメカニカルインテグレーターと提携して、パッケージングとアセンブリを行っている。この分散型アプローチは、迅速なプロトタイプニングを可能とし、スケーラブルなエハレベル製造に対応する。

当社は、構造化されたOEMエンジメントプログラムを通して、当社の技術ロードマップへのアーリーアクセスをパートナーに提供し、カスタム

モジュールの開発をサポートしている。これらのエンゲージメントには、プロトタイプ製作、非反復エンジニアリング(NRE)プロジェクト、特定用途向けの最適化が含まれている場合が多く、カスタムメタオプティクスの設計、スペクトルバンドのターゲット設定、商用プラットフォームへのシームレスな統合がカバーされる。

ロードマップと今後の焦点

当社は、現行のプラットフォームを基盤に次のような機能拡充を進めている。

スペクトルカバレッジの拡大。約2500nmまでの短波赤外(SWIR)領域へと波長域を拡大し、生体医療診断、プラスチックリサイクル、農業の分野で有用となる、より深い材料センシングを実現する。

分解能の向上。次世代モジュールでは4K以上の空間分解能を目指し、非

常に細かい細部とスペクトル精度が求められる用途に対応する。

特定用途向けの設計。個人の健康とウェルネスに焦点を当てたウェアラブルデバイス、堅牢な産業用センサ、ドローンやロボティクスにおける組み込みビジョン向けに、構成をカスタマイズする。

コスト効率。民生エレクトロニクスやエッジAIシステムなどによる大規模採用をサポートするために、50ドル未満のモジュールを提供することを目指す。

分光モジュール。イメージング以外にも、携帯型の化学および分子センシングを可能にするために、反射率、吸収率、コンパクトなラマン分光法のためのメタオプティカルモジュールを検討している。

今後の展望

メタオプティカルスペクトルイメージングは、ハイパースペクトルイメージングを大型のラボシステムからスケーラブルな実世界に即したソリューションへと転換する、根本的な飛躍的進歩である。チューノプティクス社は、画期的な性能を抜本的に縮小されたファットプリントで実現し、スペクトルインテリジェンスを日常的なデバイスに搭載することを可能にする。

チューノプティクス社は、当社との提携機会を検討していただけるOEM、開発者、研究機関を募っている。当社は秘密保持契約(NDA)の下、承認済みパートナー向けにリファレンスデザイン、SDK、ホワイトペーパーを提供している。当社の技術が貴社の次世代製品をどのように強化できるか、ぜひお問い合わせいただきたい。

著者紹介

アラン・ジャン(Alan Zhan)は、米チューノプティクス社(Tunoptix)のチーフテクノロジスト、ナレン・イエライ(Naren Yellai)は、同社CEO。URL: www.tunoptix.com