

標準的なCMOSイメージセンサに 3Dイメージングをもたらす 回折マスク設計

ギル・サミー、ジェームズ・ミハイチュク

CMOSイメージセンサに光符号化透過回折マスクを適用すると、高品質の2Dカラー画像と近視野深度マップの両方が生成される。

3Dイメージングは、セキュリティ、民生エレクトロニクス、自動車をはじめとする多くの業界において、人間とマシンビジョンを対象とした多くの用途に不可欠な要素である。非常に広く利用されているため、ハードウェア、サイズ、演算負荷がいくらかでも削減できれば、メリットがある。本稿では、加エアリー 3D社 (AIRY3D) が開発した3D コンピュータビジョン手法である「DEPTHIQ」について、概要を説明する。従来の3Dイメージング技術よりもシンプルで、手ごろな価格で入手できるため、より高速で安価で小型の3Dビジョンシステムを構築することができる。

DEPTHIQは、標準的なCMOSイメージセンサに光符号化透過回折マスク (Transmissive Diffraction Mask : TDM) を重ねることにより、互いに本質的に相関関係のある高品質の2Dカラー画像と近視野深度マップの両方を生成する技術である。

2つの薄い透過材料層で構成されるTDMを、多くのCMOSイメージセンサの上に重ねることにより、2D画質を実質的に全く低下させることなく、3Dセンシング機能を提供することができる。これらの層は、位相格子からの回折を利用することにより、3D画

像をキャプチャするための低コストで低演算量の小型ソリューションを実現する。

図1は、透明なTDMを従来型のCMOSイメージセンサに適用した様子である。簡単に言えば、透明な材料によって、マイクロレンズアレイの上に回折格子が形成されている。これが、マイクロレンズとカラーフィルタアレイ (CFA) の両方の特性に与える影響は最小限である。アクティブシリコンの中のピクセルフォトダイオードに達する前に、光を屈折及びフィルタリングすることにより、マイクロレンズとCFAは、スペクトル応答と色精度に強く影響を与える。このTDMは、元の2DのCMOSイメージセンサの基本的な微小光学構造に対応するように、設計が最適化されている。

TDM設計の概要

TDMの背景にある物理的原理は、位相格子からの回折である。従ってTDMは、高損失のマスクではなく透明構造であり、不透明ナリソグラフィによるパターン形状には依存しない。そのため、少数の後処理工程によって、任意の既存のイメージセンサ設計に追加することができる。

一般的にわずか数ミクロンの厚みし

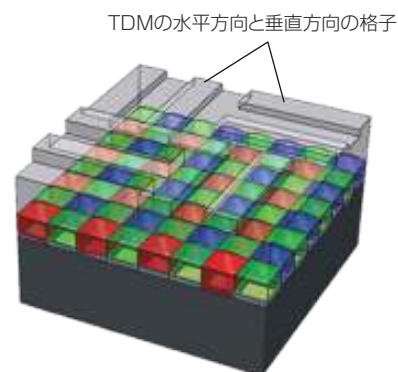


図1 水平方向と垂直方向の格子を持つ透過回折マスク (TDM) を標準的なCMOSイメージセンサの上に配置した様子。

かないため、通常はレンズやその他のカメラモジュールコンポーネントに変更を加える必要なく、TDMをイメージセンサに追加することができる。ただし、どのようなイメージセンサもそうであるように、開口数 (Numerical Aperture : NA)、主光線入射角 (Chief Ray Angle : CRA)、アライメント許容誤差に関して、適合性のあるレンズを選択することがやはり重要である。

TDMは回折によって、位相/方向情報を光強度分布に符号化するように設計されている。この通常は「隠された状態にある」自由度には、発光源の深度に関する情報が含まれている。方向情報はTDMによって、フレネル回折という近視野光学現象に基づくプロセスを使用して抽出される。具体的には、回折格子などの周期的な構造によって生成された光照射野が、タルボット

ト (Talbot) 効果として知られる自己像形成現象によって表される。これは、光の位相と強度の両方によって、格子の近くにフラクタルに似た回折パターンが形成される現象である。

光学設計に関する考察事項

TDMとカメラモジュールの設計は、2Dイメージング要件だけでなく、必要な深度検出範囲や相対深度精度などの3D仕様によっても左右される。深度精度は通常、対象物体までの既知のグラウンドトゥルースの距離を基準としたパーセント誤差で表される。例えば、広く知られている商用のステレオカメラで、有効範囲は約20cm～数メートル、絶対誤差は2%以下と表記されている。

実際の性能は、3Dイメージングソリューションの使用目的と、照明やコントラストといった実装の詳細条件に依存する。それでも3Dイメージングシステムの仕様を、TDMを採用するかどうかにかかわらず、2D画像キャプチャ仕様と、所望の深度範囲及び精度の組み合わせによって、暫定的に定義することが可能である。

光学設計者は、TDMを適用したイメージセンサから高品質の2D画像が簡単に再構築できることも示す必要がある。評価の対象となる画像品質の主要指標には、変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF)、量子効率 (Quantum Efficiency: QE)、色忠実度、感度不均一性 (photoresponse nonuniformity: PRNU、光を当てた場合の固定パターンノイズ [Fixed Pattern Noise: FPN] に相当するもの) などがある。

開口数 (NA)

2Dイメージセンサの場合、重要な設計パラメータは、NA、CRA、所望

の2D解像度 (ピクセル数) などである。TDMを使用して3Dイメージングに拡張されたイメージセンサの場合でも、これらの属性はやはり重要だが、光学特性が深度分解能と精度に与える影響も、評価する必要がある。

NAは、屈折率と、カメラレンズの受光範囲を表す境界光線を母線とする光円錐の頂角の半分との積で概算される。つまりNAは、システムが受光する角度範囲を表す。

対物レンズに入射して、境界光線を母線とする円錐の範囲内にある光に対し、適切に設計されたTDMは、2Dまたは3D画像データにひずみを引き起こすことなく、格子で変調された2D画像の中に有効な方向情報を提供することができる。

主光線入射角 (CRA)

CRAは、ピクセルアレイのアクティブシリコンの最初の表面の垂線と、特定のマイクロレンズの中心を通る光線との間の角度として定義される。

CRAは、ピクセルアレイの中心からその四隅または縁に向かうにつれて値が変化する。ピクセルアレイの縁に近いピクセルにおけるレンズシェーディング (ビネッティング) 効果を補正するために、各マイクロレンズの中心は、アクティブシリコン内の対応するフォトダイオードの中心から少しずらされている (図2)。アレイの中心近くでは、CRAはゼロであるため、ほとんどの光

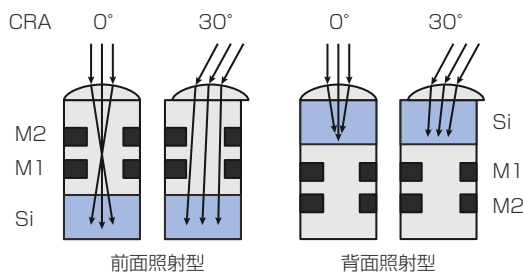


図2 マイクロレンズのCRAの値が、ピクセルアレイの中心近くのゼロから、最外縁近くになると30°まで変化する様子を表した図。

線が近軸光線としてピクセルに達するとみなされる。CRAがゼロではないセンサでも、アレイ中心のピクセルについては、マイクロレンズアレイのCRAはゼロである。しかし、マイクロレンズが対応するピクセルフォトダイオードに対して意図的にずらされているため、マイクロレンズのCRAは通常、アレイの中心と隅を結ぶ直線に沿って、ピクセルが中心から離れるにつれて大きくなっていく。

図2において、M1とM2は不透明な金属層で、Siはピクセルフォトダイオードのアクティブシリコンである。右側の図のように、背面照射型のピクセル構造のほうが一般的に、光学積層体は薄い。マイクロレンズアレイの光学特性が同じである場合、光学積層体が短い背面照射ピクセルのほうが、高いCRAとの適合性が高い。

TDMは、マイクロレンズのずれと、レンズとピクセルアレイの間のCRAの不整合を考慮して、最適化する必要がある。

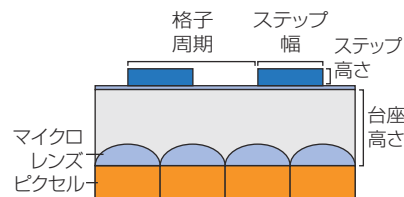


図3 TDMの設計パラメータ。

ある。そのために設計者は、TDMの格子周期の定められた割合の範囲内に光学的な位相のずれを維持することを念頭に置いた、特殊な設計の開発を選択することもできる。

TDMに基づく3Dセンサ設計を最適化して、所望の深度範囲全体で有効な動作を保証するには、巨視的なものとピクセルレベルのもの両方の光学設計パラメータの組み合わせを考慮する必要がある。角度感度は、TDMの特性だけでなく、レンズのNAにも関連する。

TDM 格子の設計パラメータ

TDMの主要な幾何学的設計パラメータをいくつか定義することができる(図3)。これらの幾何学的特性を適切に変更することによって、深度精度や2D画質を最適化することができる。

格子材料。TDMの格子材料は、所望の波長範囲において透明でなければならない。台座と格子の材料は、従来のCMOSイメージセンサに対する信頼性の高いウエハレベルの後処理と適合する必要もある。TDMは、マイクロレンズアレイと機械的に適合するだけでなく、各マイクロレンズの意図した集光効果を維持するために、台座(低屈折率)とマイクロレンズ(高屈折率)の屈折率の差が十分に大きくなければならない。

格子周期。TDMの格子周期(ピッチ)は、特定のピクセル構造の中の光学積層体に適合させることを特に目的として、調整する必要がある。TDMの光学設計は、所望の角度応答を維持しつつ、ピクセル間のクロストークが最小限になるようにする必要がある。格子周期は、物体深度判定のための深度サンプリングレート(充填率)にも影響を与える。標準的な格子周期は、ピクセ

ルピッチの少数倍である。

格子ステップの高さ。TDMの格子ステップの高さは、台座の高さに合わせて調整される。台座の高さと光学特性によって、幅広い範囲のステップ高さが選択可能である。

格子の位相ずれ。TDMの格子の位相ずれは、特定の格子ステップと、対応するピクセル内のフォトダイオードの中心との間の横方向のオフセットで定義される。ピクセルの中心の真上に位置する格子ピークには、格子の位相ずれはない。ピクセルフォトダイオードを最も近い隣接フォトダイオードから分離する仮想的な対称軸の真上に位置する格子ピークには、90°の位相ずれがある(図3)。

台座の厚み。台座の厚みは、マイクロレンズアレイの底面からTDM格子ステップの底面までの長さである。台座を経由する光学経路は、特定のTDM設計の変調深度と角度感度に影響を与える。台座の厚みは通常、数ミクロンである。屈折率が高い台座ほど薄くすることができるが、上でも述べたとおり、台座の屈折率がマイクロレンズ材料と同程度に高いと、マイクロレンズは効果を発揮できない。

格子方向。TDMの格子方向とは、ピクセルアレイの水平行または垂直列に対する格子の罫線の向きのことである。格子の向きによって、ピクセルアレイのフォトダイオードで光電子が生成される度に、光生成信号を回折によって変調する、行方向または列方向の向きが決まる。回折は、格子の短軸に沿ってほぼ生じるため、垂直または水平の罫線からなる格子は、それらと同じ方向を持つシーンの中のコントラストエッジにおいてのみ、深度を検出することができる。

材料、光学特性、幾何学的特性に基

づいて、慎重に設計して最適化したTDMにより、3D画像キャプチャ機能を改善することができる。完全なモデルを構築するには、カメラレンズ、モノリシックに統合されたTDM格子、CMOSイメージセンサのピクセルの光学設計を考慮する必要がある。TDMの組成と格子特性、ピクセルアレイに対する格子の位相ずれ、台座の厚みのすべてを使用して、深度計算のための変調深度と角度感度を調整することができる。

本稿で紹介したTDM設計手法はこれまでに、幅広い種類のCMOSイメージセンサに基づく、シングルセンサの3Dイメージングソリューションの実装に適切に応用されている。このTDM手法は、スマートフォン用の背面照射型のモバイルセンサと、マシンビジョン用の前面照射型のグローバルシャッターセンサの両方に適合するように変更されている。これによってTDM構造はこれまでに、ピクセルピッチが約1~3 μm 、ピクセル数が約2~20メガピクセルのセンサに組み込まれた実績がある。

エアリー 3D社は、効率的な深度計算アルゴリズムと、さまざまな組み込みビジョンプラットフォームへの統合によって、完全型の3Dシステムの実現に取り組んでいる。DEPTHIQブランドのTDMベースのシングルセンサ設計は、モバイル、セキュリティ、ロボティクス、車載システムにおける、単一開口のカメラへの迅速な統合に対する、大きな可能性を示している。

著者紹介

ギル・サミー (Gil Summy) は、加エアリー 3D社 (AIRY3D) の光学系グループに所属するディレクター、ジェームズ・ミハイチュク (James Mihaychuk) は、同社製品マネージャー。
e-mails: gil.summy@airy3d.com, james.mihaychuk@airy3d.com URL: airy3d.com