

イメージセンサーによる組込みビジョンの実現

インダストリー4.0における協働ロボットや消火活動、農業に利用されるドローン、生体認証による顔認識、家庭用の局所的な携帯医療機器など、新しい画像処理アプリケーションが急成長しています。このような新しいアプリケーションの出現が可能になったのは、組込み型ビジョンがかつてないほど身近になった為です。エンベデッドビジョンは新しい概念ではなく、外部コンピュータを使わずにデータを制御・処理するビジョンセットアップを含むシステムを定義したものです。一般に「スマートカメラ」と呼ばれる形で、産業界の品質管理にも広く利用されています。

最近の変化としては、コンシューマー市場向けに開発された安価なハードウェア部品が入手可能になったことで、BOM (Bill of Material) やサイズがコンピュータに比べて劇的に小さくなったことが挙げられます。例えば、小規模なインテグレート/OEMは、NVIDIA Jetsonなどのシングルボードコンピュータやシステムオンモジュールを少量で見つけることができますが、大規模なOEMは、Qualcomm Snapdragonなどの画像信号プロセッサを直接供給することができます。ソフトウェアレベルでは、市販のソフトウェアライブラリにより、特定のビジョンシステムをより迅速に開発し、かなり少量でも簡単に配備できるようになりました。

この機械学習により、研究所のニューラルネットが学習され、プロセッサに直接アップロードされるため、プロセッサは自律的に特徴を認識し、判断を下すことができるようになります。

画像処理産業において、このような高成長をしているアプリケーションをターゲットとする企業にとって、組込み型ビジョンに適応したソリューションを提供することは非常に重要なことです。組込み型ビジョンシステムの性能と設計に直接影響を与えるイメージセンサーは、より多くの採用に向けて大きな役割を担っており、その主要なドライバーは、サイズ、重量、電力、コストの削減というSWAP-Cの頭文字でまとめることができます。

1. 非常に重要なコスト削減

組込み型ビジョンの新しい用途を促進するためには、市場に受け入れられる価格帯を満たすことが必要です。これはビジョンシステムのコストに強い制約をもたらします。

1.1. 光学系のコスト削減

イメージセンサーの画素サイズが小さくなると、同じウェハー上に多くのチップを搭載できるため、シリコンのコストが縮小し、センサーがより小型で低コストの光学系に収まるようになります。例えば、ピクセルサイズを2.8 μm まで小さくすることで、Teledyne e2vのEmerald 5Mは、Sマウント (M12) の光学系を5MPグローバルシャッターセンサーに使用でき、エントリーレベルのM12レンズが10ドル程度であるのに対し、CマウントやFマウント光学系などの大きな光学フォーマットは、通常10~20倍の価格であることから直接的なコスト削減となります。そのため、フットプリントの縮小に取り組むことは、組込み型ビジョンシステムのコスト低減に有効な手段と言えます。

イメージセンサーメーカーにとって、この光学コスト削減は、設計にある影響を及ぼします。一般的に、光学コストが下がれば下がるほど、画像センサーの入射角が最適でなくなるからです。したがって、低コストな光学系では、画素の上に特定シフトされたマイクロレンズを配置し、歪補正の上、広角からの光を集光する設計が必要となります。

1.2. 費用対効果の高いインターフェース

光学的な最適化だけでなく、インターフェースの選択も間接的にビジョンシステムのコストに影響します。MIPI CSI-2インターフェースは、MIPIアライアンスがモバイル業界向けに開発したものであり、インターフェースによるコスト削減を可能にする最も適した候補と言えます。多くのISPで広く採用され、NXP・NVIDIA・Qualcomm・Rockchip・Intelなどのコスト効率の高いシステムオンチップ (SOC) やシステムオンモジュール (SOM) に無駄なく統合できるため、産業市場でも採用が始まっています。CMOSイメージセンサーやイメージングモジュールをMIPI CSI-2インターフェースで設計すると、イメージセンサーからホストSOCやSOMに中間変換ブリッジなしで直接データを転送できるため、コストと基板面積を節約することができます。もちろんこの利点は、360°ビジョンなどの複数のセンサーを使用する組込みシステムでより強くなります。

但し、これらの利点には、いくつかの制約があります。マシンビジョン業界で広く使われているMIPI CSI-2 D-PHY規格は、コスト効率の高いフラットケーブルに依存していますが、接続距離が20cmに制限されており、交通監視やサ라운드ビューアプリケーションのように、センサーがホストプロセッサから離れているリモートヘッドセットアップでは最適とは言えない場合があります。接続距離を長くするには、MIPIセンサーボードとホストプロセッサの間にリピーターボードを追加配置する方法がありますが、小型化が難しくなります。同軸ケーブルや差動ペアケーブルをサポートするいわゆるFPD-Link IIIやMIPI CSI-2 A-PHY規格は、最大15mまでの接続を可能にします。

1.3. 開発コストの削減

新製品に投資する際、開発費の上昇がしばしば問題になります。何百万ドルもの経常外費用がかかり、市場投入までの時間にプレッシャーがかかる事があります。組込み型ビジョンでは、モジュール性 (イメージセンサーの切り替えが可能であること) がインテグレーターにとって重要な価値であるため、このプレッシャーは、さらに強くなってきます。同じピクセルアーキテクチャーを持つコンポーネントのファミリーを定義し、電気光学性能を安定させ、共通の光学センターを持って単一のフロントメカニクスを共有し、フットプリントまたはピン間互換性によって互換性のあるPCBアクセスを提供し、図1に示すように評価・統合・サプライチェーンを迅速に行うことによって、経常外費用を抑える事ができます。

図1 イメージ センサ プラットフォームは、ピン互換性 (左側) またはフットプリント互換性 (右側) を提供し、独自のPCB レイアウトが実現できるように設計することが可能です。

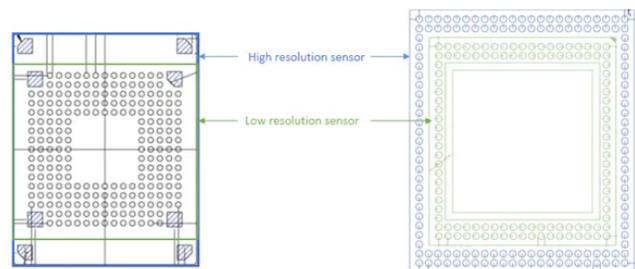


図1 イメージ センサ プラットフォームは、ピン互換性 (左側) またはフットプリント互換性 (右側) を提供し、独自のPCB レイアウトが実現できるように設計することが可能です。

continued >

行えるようになってきています。通常、これらのターンキー製品は、すぐに組込めるセンサーボードで構成されており、前処理チップ、メカニカルフロントフェイスやレンズマウントも含まれていることがあります。これらは高度に最適化されたフットプリントと標準化されたコネクタにより、NVIDIA JetsonやNXP i.MXなどの市販のプロセッシングボードに直接接続でき、中間アダプタボードを設計・製造する必要がないため、アプリケーションにメリットをもたらします。これらのモジュールやボードレベルソリューションは、PCB設計や製造の必要性をなくし、ハードウェア開発を容易にするだけでなく、ほとんどの場合、Video4Linuxドライバと一緒に提供されるので、ソフトウェア開発を劇的に短縮することも可能です。そのため、OEMやビジョンシステムメーカーは、イメージセンサーとホストプロセッサの通信にかかる数週間の開発を省略し、差別化されたソフトウェアやシステム全体の設計に集中することができます。また、Teledyne e2v が提供する光学モジュールは、レンズもモジュール内に統合し、光学系からドライバー、センサーボードまでのフルパッケージを提供し、レンズの組立てやテストに関するタスクを排除することによって、ターンキーという側面をさらに一歩押し進めることができます。



図2 新しいモジュール (右側) は、オフ・ザ・シェルフ・プロセッシング・ボード (左側) とフラット・ケーブルで直接接続でき、追加のボードを設計する必要がありません。

2. 自律性を向上する省電力化

小型のバッテリー駆動のデバイスは、外付けのコンピュータがポータブルなアプリケーションを妨げるため、エンベデッドビジョンの恩恵を受ける最も明白なアプリケーションと言えます。システムの消費電力を低減するために、イメージセンサーには、システム設計者が電力を節約できるような機能が数多く搭載されています。

センサーの観点からは、画像取得のフレームレートを落とさずに、組込み型ビジョンシステムの消費電力を減らす方法が複数存在します。最も簡単な方法は、システムレベルでセンサーのスタンバイモードやアイドルモードを (可能な限り) 使用してセンサーの動的動作を最小化し、センサー自体の消費電力を低減することです。特にスタンバイモードでは、センサーのアナログ回路をオフにすることで、センサーの消費電力を機能モード時の数パーセントまで低減することが可能です。アイドルモードでは、消費電力を約半分に抑え、マイクロ秒単位で画像取得の準備をすることができます。

またより高度なリソグラフィノードを用いてセンサーを設計することも省電力化の一つの方法です。テクノロジーノードが小さいほど、トランジスタのスイッチングに必要な電圧は低くなり、電圧の二乗に比例するため、ダイナミック消費電力を低減することができます: $P_{\text{動的}} \propto C \times V^2$ 。したがって、10年前に180 nmの技術を使っていた画素は、トランジスタを110 nmに縮小しただけでなく、デジタル回路の電圧も1.8Vから1.2Vに低下させたのです。次世代センサーでは、65 nmテクノロジーノードを用いて、組込み型ビジョンアプリケーションのさらなる省電力化を実現させる予定です。

最後に、イメージセンサーを適切に選択することで、特定の条件下でLEDの消費電力を低減することができます。組み込みシステムの中には、3Dマップの生成

や動きのフリーズ、あるいは特定の波長を順次パルス状に照射してコントラストを高めるなど、アクティブイルミネーションに依存するものがあります。このような場合、イメージセンサーは、光量不足の状況下で動作する際にセンサーのノイズを低減することで省電力化を実現することができます。また、センサーのノイズを低減することで、組込み型ビジョンシステムに搭載するLEDの電流強度や個数を削減することができます。また、画像取り込みやLEDフラッシュが外部イベントによってトリガーされるような条件では、適切なセンサー読み出しアーキテクチャを選択することで、大幅な省電力を実現することができます。通常のローリングシャッターセンサーではフレームの全露光時間でLEDを点灯させる必要がありますが、グローバルシャッターセンサーでは、フレームの一部分のみ点灯させることが可能です。これにより、ローリングシャッターイメージセンサーからグローバルシャッターイメージセンサーへの移行が可能となり、照明コストの削減を実現するとともに、画素内相関二重サンプリング (CDS) により、顕微鏡用CCDセンサー並みの低ノイズを維持することができるようになりました。

3. 高機能化による用途に応じたビジョンシステムの構築

この組み込み型ビジョンのコンセプトを極端に拡張すると、すべての処理機能を統合したイメージセンサー (System-On-Chip) をフルカスタマイズし、3Dスタック方式で性能と消費電力を最適化することが可能になります。しかし、そのような製品には膨大なコストがかかるため、長期的にはカスタムセンサーがそのレベルに到達することも全くないわけではありませんが、現在は、特定の機能を直接センサーに埋め込んで計算負荷を減らし、処理時間を短縮するという中間的なステップにあります。

例として、バーコード読み取りアプリケーションでは、Teledyne e2vが特許を取得した、特定のバーコード識別アルゴリズムを含むセンサーチップに組み込まれた機能により、各フレームでバーコードの位置を特定し、ISPがこれらの領域にのみ焦点を当て、より効率的にデータを処理できるようにしました。

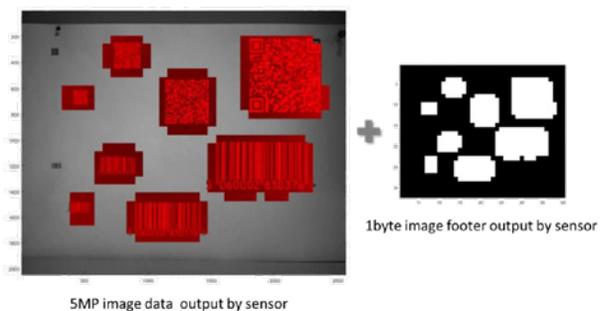


図 3自動バーコード位置決め機能付き Teledyne e2v Snappy 5m センサー

また、処理負荷を軽減し、「良い」データを最適化する機能として、Teledyne e2vが特許を持つFast Exposureモードがあります。これは、照明条件が変わったときに飽和しないよう、センサーが自律的に露出時間を修正することを可能にする機能です。この機能では、1フレーム内の照明の変動に適応するため処理時間が最適化され、この迅速な反応によりプロセッサが処理する必要のある「不良画像」の量を最小限に抑えることができます。これらの機能は特殊であることが多く、お客様のアプリケーションをよく理解する必要があります。用途が十分に理解されていれば、他のオンチップ機能を設計して、組込み型ビジョンシステムを最適化することが可能です。

continued >

4. 最小限に収まる軽量化と省スペース化を実現

組み込み型ビジョンシステムの主な要件は、小さなスペースに収まること、または携帯機器に収まるように軽量化すること、そしてバッテリー駆動のエンジンを最大限に活用することです。したがって、現在、ほとんどの組み込み型ビジョンシステムでは、1MPから5MPまでの限られた解像度の小型光学フォーマットセンサーが使用されています。

画素配列の小型化は、イメージセンサーのフットプリントと重量を減らすための最初的手段に過ぎません。現在、65 nmプロセスでは、電気光学性能を損なうことなく、グローバルシャッターの画素ピッチを2.5 μmまで縮小することが可能です。その結果、携帯電話と同じ1/3インチ以下のフルHDグローバルシャッターCMOSイメージセンサーのような製品が誕生したのです。

さらに、センサーの重量や設置面積を減らすためのキーテクノロジーとして、パッケージの小型化も挙げられます。近年、ウエハレベルパッケージは、モバイル・車載・医療用途を中心に急速に市場が拡大しています。産業市場で使用されている従来のCLGA (Ceramic Land Grid Array) パッケージと比較して、ウエハレベルのファンアウトパッケージやチップスケールパッケージは高密度接続を実現し、組み込みシステム用の小型・軽量イメージセンサーの製造という課題に対する優れたソリューションとなります。Teledyne e2vの2Mピクセルの場合、ウエハレベルからのパッケージングとより小さなピクセルサイズの組み合わせにより、5年間で4分の1のサイズに小型化できました。

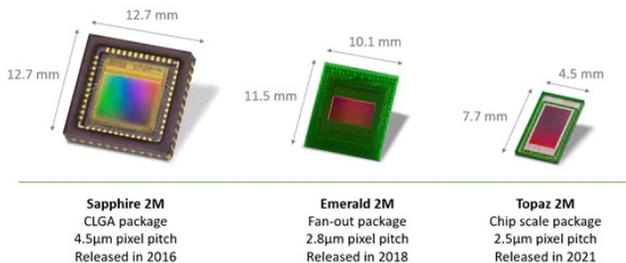


図4 2016年以降のパッケージと画素の技術改良に伴うイメージセンサーのフットプリントの典型的な進化

将来的には、別の技術によって、エンベッドビジョン用のセンサーのサイズがさらに小さくなるのが予想されます。

このように、異なる回路ブロックを別々のウエハで製造し、それらを積層してCu-Cu接続やTSV (シリコン貫通電極) で相互接続することで、半導体部品を製造する画期的な技術が3次元積層技術です。3次元積層は、層の重なりにより、従来のセンサーよりも小さなフットプリントでデバイスを作ることができる3次元積層イメージセンサーでは、読み出しと処理のブロックを画素配列と行デコーダの下に移動させることができます。その結果、読み出しブロックと処理プロ

ックの表面積が減少し、同時にセンサー内に処理能力を追加してイメージ・シグナル・プロセッサの負荷を軽減することが可能になりました。

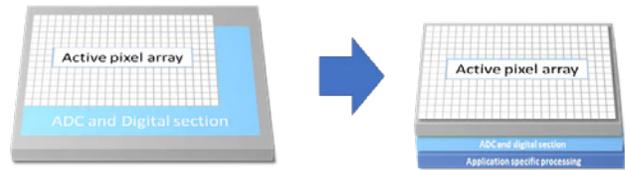


図5 3Dチップ積層技術は、センサーのフットプリントを小さくしながら画素配列、アナログ回路、デジタル回路を重ね合わせ、さらにアプリケーション固有の処理を追加することができる技術です。

しかし、3次元積層技術がイメージセンサー市場に広く採用されるためには、いくつかの課題があります。第一に、3次元積層技術は新しい技術であり、第二に従来技術のウエハと比較してシリコンコストが3倍以上高くなるプロセスステップが必要であるため、コストが高くなるということです。したがって、3D積層は主に高性能または非常に小さなフットプリントの組み込みビジョンシステムのためのオプションになります。

最後に、組み込み型ビジョンは、「無駄のない」ビジョンを行うということに集約され、OEM・システムインテグレーター・標準カメラメーカーを含む多くの企業が適用することが可能です。「組み込み型」は多くのアプリケーションで使用される総称であり、単一の仕様一覧表を設定することは困難です。しかし、組み込み型ビジョンシステムの最適化にはいくつかのルールがあります。一般的に、流動的な市場では、最先端のスピードや感度ではなく、サイズ・重量・電力・コストに左右されるため、このようなルールが適用されます。イメージセンサーはこれらのパラメータに大きく寄与する為、組み込み型ビジョンシステム全体の性能を最適化するイメージセンサーの選択には注意が必要です。適切なイメージセンサーは、組み込みビジョンの設計者に、材料費の削減他、照明と光学系のフットプリントを縮小する自由度を提供します。しかし、イメージセンサー以上にイメージング・モジュールというターンキーボードレベルのソリューションの出現は、サイズ・重量・電力・コストのさらなる最適化への道を開き、開発コストと時間を大幅に削減し、余計な複雑さを加えることなく、手頃な価格でディープ・ラーニングに最適化した画像信号処理プロセッサを民生市場から入手することができます。