

組み込みビジョンを支えるイメージセンサ

マリー=シャルロット・ルクレール

組み込みビジョンは、外部コンピュータなしでデータの制御と処理を行うビジョン設定を含むシステムを定義するものである。

インダストリー 4.0における協調型ロボットや、消火活動や農業に使われるドローン、生体顔認証、家庭で使われるポイントオブケアの携帯型医療機器など、新しいイメージング用途が急速に成長している。これらの新しい用途の出現を可能にした主要な要因の1つは、組み込みビジョンが以前よりも利用しやすくなったことである。組み込みビジョンは新しい概念ではない。それは単に、外部コンピュータなしでデータの制御と処理を行うビジョン設定を含むシステムを定義するものである。産業品質管理では、「スマートカメラ」として一般的に知られる形態で、それが広く活用されている。

最近の変化は、民生市場向けに開発された、手頃な価格のハードウェアコンポーネントが提供されるようになり、部品の数とサイズがコンピュータと比べて著しく減少したことである。例えば、小規模インテグレート/OEMは、米エヌビディア社(NVIDIA)の「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(SoM)を少量単位で入手できる一方で、より規模の大きなOEMは、米クアルコム社(Qualcomm)の「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る。ソフトウェアレベルでは、市販のライブラリによって特定のビジョンシステムを、かなりの少量生産であっても、これまでよりもはるかに迅速に開発して、簡単に実装できるようになった。

組み込みビジョンシステムの成長を促進している2つめの変化は、機械学習の出現である。機械学習によって、ニューラルネットワークを研究施設でトレーニングして、プロセッサに直接アップロードすれば、プロセッサは、自律的に特徴を識別して、リアルタイムに判断を行うことができる。

組み込みビジョンに適合するソリューションを提供することが、成長著しいこれらの用途をターゲットにしたいと考えるイメージング業界の企業にとって非常に重要なことである。組み込みビジョンシステムの性能と設計に直接的な影響を与えるイメージセンサは、さらなる普及を促す上で重要な役割を担うものであり、その主要な推進項目は、SWaP-Cという頭字語で表すことができる。SWaP-Cとは、Size(サイズ)、Weight(重量)、Power(消費電力)、Cost(コスト)のことで、これらを低下することが目標となる。組み込みビジョンの新たな用途につながる強力な促進剤は、市場で受け入れられる価格を達成することで、それは、ビジョンシステムのコストにかなりの制約をもたらす。

光学系コストの削減

ビジョンシステムのコストを削減するための最初の方法は、そのフットプリントを縮小することであり、それは次の2つの理由に基づく。

- ・イメージセンサのピクセルサイズが縮小すれば、より多くのチップを同

じウエハに配置できるようになるため、本質的にシリコンコストが低下する。

- ・センサを、より小型で低コストの光学系に搭載することができる。

イメージセンサのメーカーにとって、この光学系コストの削減は、もう1つの影響を設計にもたらす。一般的に、光学系のコストが低いほど、センサに対する入射角は最適ではなくなる。従って、低コストの光学系を使用する場合は、特別にシフトさせたマイクロレンズをピクセルの上に配置して、歪みを補正し、広い角度から入射する光を集束する必要がある。

費用対効果の高いインタフェース

光学系の最適化以外に、インタフェースの選択も、ビジョンシステムのコストに間接的に影響を与える。MIPI CSI-2インタフェースは、もともとモバイル業界を対象にMIPI Allianceによって開発されたものであるため、インタフェース関連のコストを削減する上で、最適な候補である。MIPI CSI-2は、ほとんどのISP(インターネットサービスプロバイダー)によって広く採用されており、蘭NXP社、エヌビディア社、クアルコム社、中国ロックチップ社(Rockchip)米インテル社(Intel)などが提供する、費用対効果の高いシステムオンチップ(SoC)やSoMにリークに統合することができるため、産業市場においても採用され始めている。MIPI CSI-2インタフェースを持つ

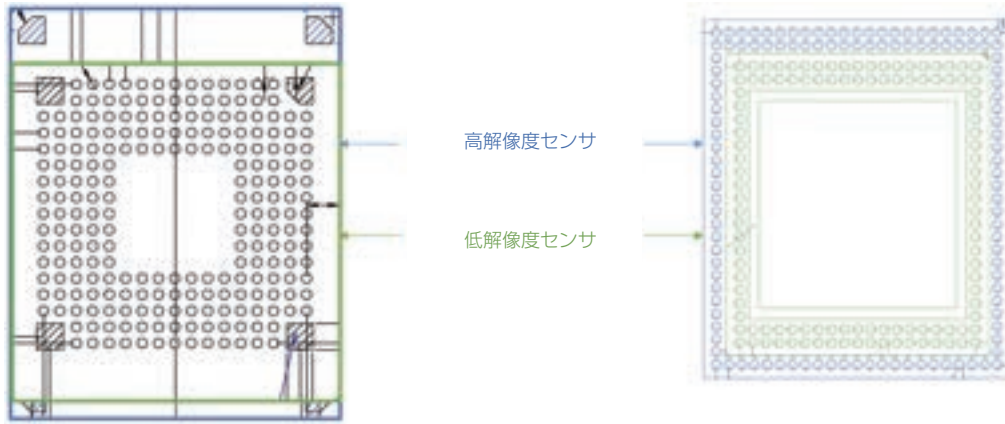


図1 ピン間の互換性(左)やフットプリントの互換性(右)を持つようにイメージセンサプラットフォームを設計することにより、独自のPCBレイアウト設計を実現することができる(画像提供: テレデザインe2v社)

CMOSイメージセンサまたはイメージングモジュールを設計すれば、コンバータブリッジを仲介することなく、イメージセンサから組み込みシステムのホストSoCまたはSoMまでデータを直接転送することができ、コストとPCB(プリント回路基板)面積を削減することができる。当然ながら、360°のビジョンを実現するために複数のセンサを搭載する組み込みシステムでは、そのメリットはさらに大きくなる。

しかしそのメリットには、いくつかの制約が伴う。マシンビジョン業界で現在広く採用されているMIPI CSI-2 D-PHY規格では、費用対効果に優れたフラットケーブルが使用されるが、このケーブルには接続距離が20cmに制限されるという欠点があり、センサがホストプロセッサから離れた位置にある、リモートヘッド設定に対しては、最適ではない可能性がある。交通監視やサラウンドビューの用途では、そのようなケースが多く存在する。長い接続距離を実現するための1つの解決策は、小型化とは引き換えになるが、MIPIセンサボードとホストプロセッサの間に追加のリピーターボードを配置することである。その他の解決策は、モバイル業界ではなく自動車業界で採

用されているもので、いわゆるFPD-Link III規格やMIPI CSI-2 A-PHY規格は、同軸または差動ペアケーブルをサポートし、最大15mの距離を接続できる。

開発コストの削減

高い開発コストは、新製品に投資する際の課題になる場合が多い。数百万ドルもの非反復費用(Non-Recurring Expense: NRE)がかかって、早く市場に投入しなければならないというプレッシャーを生む可能性がある。組み込みビジョンの場合は、モジュール性(イメージセンサを切り替える能力によって定義される)が、インテグレートにとって重要な価値を持つので、このプレッシャーはさらに高まる。幸い、センサ間に一定レベルの相互互換性を持たせることによって、NREを抑えることができる。例えば、安定した電気光学性能が得られるように同じピクセル構造を持つコンポーネントファミリーを定義したり、単一のフロント機構を共有する共通の光学的中心を持たせたり、図1に示すように、フットプリントやピン間の互換性によって、PCBアセンブリに互換性を持たせたりすることにより、評価、統合、サプライチャー

ンを高速化することができる。

現在、モジュールやボードレベルソリューションと呼ばれるものが広く提供されていることにより、組み込みビジョンシステムは、さらに高速かつ手頃な価格で開発できるようになっている。これらのターンキー製品は通常、そのまま搭載可能なセンサボードで構成されており、センサボードには、前処理チップ、機械的フロント部、レンズマウントも含まれている場合がある。これらのソリューションは、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って、エヌビディア社のJetsonやNXP社の「i.MX」ユニットなどの市販の処理ボードに直接接続可能で、中間のアダプタボードを設計または製造する必要がないという点において、メリットがある。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の設計や製造を不要にすることによって、ハードウェア開発の簡素化と迅速化を実現するだけでなく、ほとんどの場合でVideo4Linuxドライバが提供されているため、ソフトウェアの開発時間も大幅に短縮する。OEMやビジョンシステムメーカーは、イメージセンサとホストプロセッサを通信させるために割いていた数週



図2 新しいモジュール(右)は、フラットケーブルによって市販の処理ボード(左)に直接接続することが可能で、追加のボードを設計する必要はない

間分の開発時間が不要になり、ソフトウェアや全体的なシステム設計の差別化に注力することができる。光モジュールによって、ターンキー機能をさらに一歩進めることが可能である。モジュール内部にレンズも搭載することにより、光学系からドライバを経てセンサボードに至るまでのすべてを提供して、レンズのアセンブリやテストに伴う作業を不要にすることができる。

自律性の向上につながる 電力効率

バッテリー駆動の小型デバイスは、組み込みビジョンのメリットを享受することが最も明白な用途である。外部コンピュータは、どのような携帯型アプリケーションにおいても妨げになるためだ。システムの消費電力を削減するために、イメージセンサには現在、電力消費を抑えるためにシステム設計者が利用できる、さまざまな機能が搭載されている。

センサの観点からは、画像取得のフレームレートを落とすことなく、組み込みビジョンシステムの消費電力を削減するための複数の方法が存在する。最も簡単な方法は、システムレベルにおけるもので、センサのスタンバイモードとアイドルモードを(できる限り)利用することによって、センサの動的動作を最小限に抑え、センサ自体の消

費電力を低減することである。スタンバイモードは、センサのアナログ回路を停止することにより、センサの消費電力を機能モードのごく一部にまで低減することができる。アイドルモードは、消費電力を約半分にまで抑えつつ、画像取得に向けたセンサの準備をマイクロ秒単位で行うことができる。

消費電力を削減するためのもう1つの方法は、より高度なリソグラフィノードを使用してセンサを設計することである。技術ノードが微細であるほど、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動的消費電力($P_{dynamic} \propto C \times V^2$)は低くなる。従って、トランジスタの製造プロセスが10年前の180nmから110nmまで微細化したことによって、ピクセルサイズは縮小し、デジタル回路の電圧は1.8Vから1.2Vに低下した。次世代のセンサには65nmの技術ノードが採用される予定で、さらなる消費電力の削減が、組み込みビジョン用途にもたらされる見込みである。

最後に、イメージセンサを適切に選択することで、一部の条件下におけるLEDの消費電力を低減することができる。一部の組み込みビジョンには、アクティブ照明が採用されている。例えば、3Dマップの作成やモーションのフリーズ、あるいは単にコントラストを高めるために、特定波長の連続パルス

が用いられている。そのような場合に、イメージセンサは、低光量条件下での動作時のセンサのノイズを低減することによって、消費電力を抑えることができる。センサノイズを低減することにより、設計者は、電流強度を低下させるか、あるいは、組み込みビジョンシステムに搭載するLEDの数を減らすかのいずれかを選択することができる。また、別の状況として、画像取得とLEDフラッシュが外部イベントによってトリガされる場合は、適切なセンサ読み出し構造を選択することが、消費電力の大幅な削減につながる。従来のローリングシャッター方式のセンサは、フレームの露光中を通してLEDをオンにする必要があるが、グローバルシャッター方式のセンサは、フレームの一部だけ光源をオンにすることが可能である。従って、ローリングシャッター方式からグローバルシャッター方式のイメージセンサに置き換えることにより、照明コストを抑えつつ、ピクセル内相関二重サンプリングを使用すれば、顕微鏡法に用いられるCCDセンサと同程度にノイズを低く維持することができる。

特定用途向けのビジョンシステムを開発するための下準備となる オンチップ機能

上記の組み込みビジョンの概念の究

極的な延長線上にあるのは、イメージセンサのフルカスタマイズで、すべての処理機能 (SoC) を3D積層形式で搭載して、性能と消費電力を最適化することである。しかし、そのような製品の開発には莫大なコストがかかる。それはカスタムセンサだが、長い目で見れば、その統合レベルに到達するのはまったく不可能というわけではない。当社は現在、そこに至るまでの中間段階にあり、特定機能をセンサに直接組み込んで、演算負荷の軽減と処理時間の高速化を図っている。

例えば、バーコード読み取りの分野において米テレダインe2v社 (Teledyne e2v) は、各フレーム内のバーコードの位置を特定するための具体的なバーコード識別アルゴリズムを含む、センサチップに直接組み込まれた機能に関する特許を取得している。これによってISPは、データをより効率的に処理する部分に集中することができる。

これらの機能は目的が特化している場合が多く、顧客の用途を深く理解することが必要である。用途を十分に理解していれば、他のオンチップ機能を設計して、組み込みビジョンシステムを最適化することが可能である。

重量とフットプリントの削減による占有面積の最小化

組み込みビジョンシステムの重要な要件の1つは、携帯端末に搭載してバッテリー駆動エンジンを最大限に活用できるように、小さなスペースに収まること、または、軽量であることである。今日の大半の組み込みビジョンシステムに、1~5メガピクセルという限られた解像度を持つ、小さな光学フォーマットのセンサが採用されているのはそのためである。

ピクセルアレイのサイズを小さくす

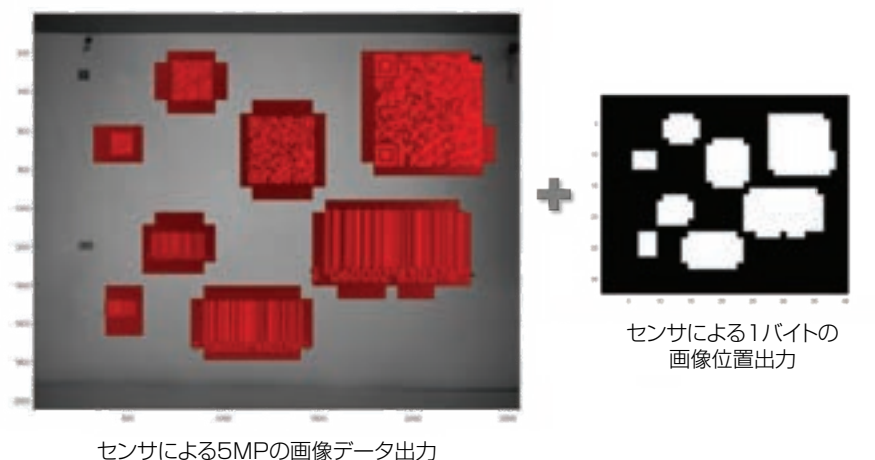


図3 テレダインe2v社の「Snappy5M」センサによる自動バーコード位置特定

ることは、イメージセンサのフットプリントと重量を減らすための最初の方法にすぎない。現在、65nmプロセスによって、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ピクセルピッチを $2.5\mu\text{m}$ にまで小さくすることが可能である。このような製造プロセスは、1/3インチ未満という携帯電話市場と同じフォーマットでフルHDのグローバルシャッターCMOSイメージセンサ、といった製品の開発につながるものである。

センサの重量とフットプリントを減らすためのもう1つの重要な技術は、パッケージサイズの縮小である。ウエハレベルパッケージは、特にモバイル、自動車、医療分野において、数年間で急速な市場成長を遂げた。産業市場で用いられる従来のCLGA (Ceramic Land Grid Array) パッケージと比べて、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、より高密度の接続が可能で、組み込みシステム用の超小型で軽量のイメージセンサを製造するという課題に対す

る、優れた解決策である。テレダインe2v社の2メガピクセルのセンサは、ウエハレベルパッケージに小さなピクセルサイズを組み合わせることによって、わずか5年でサイズを4分の1に縮小することに成功している。

今後については、新たな技術によって組み込みビジョン用のセンサのサイズをさらに縮小することができると考えている。

3D積層は、半導体部品を製造するための革新的な手法である。異なる回路ブロックを個別のウエハ上に製造し、Cu-Cu接続とシリコン貫通電極 (Through Silicon Via : TSV) によって、それらを積層して相互接続する。3D積層では、層が積み重ねられるために、デバイスのフットプリントを従来のセンサよりも小さくすることができる。3D積層のイメージセンサでは、読み出しブロックや処理ブロックをピクセルアレイや列デコーダの下に移動させることができる。従って、フットプリントは、読み出しブロックと処理ブロックの表面積分だけ小さくなる。

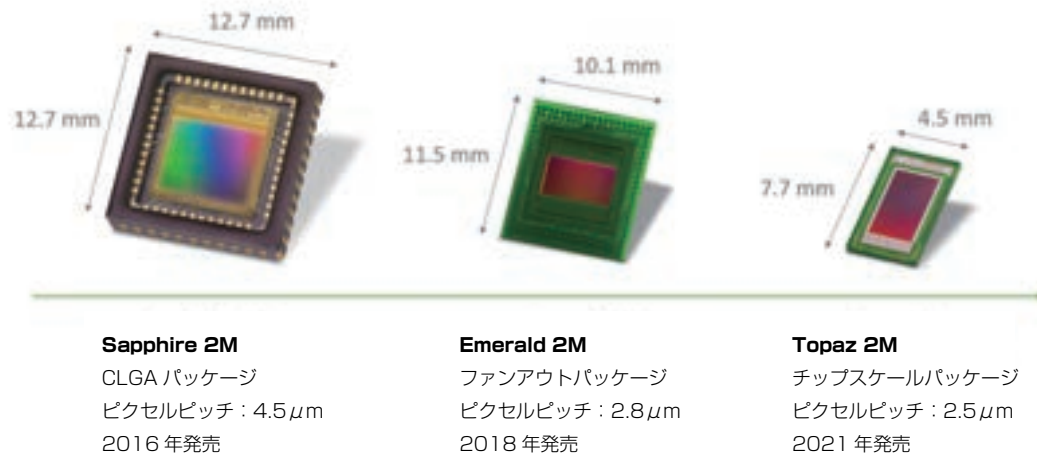


図4 2016年以降のパッケージやピクセル技術の進歩に伴う、イメージセンサのフットプリントの一般的な進化

また、センサに処理能力を追加することが可能で、それによって、画像信号プロセッサの負荷を軽減することができる。

しかし、3D積層には現在、イメージセンサ市場に広く採用されるための課題がいくつか存在する。1つめは、新しい技術であること、2つめは、製造工程が増えるためにコストが高くなることである。シリコンコストは、従来技術によるウエハの3倍以上に増加する。従って3D積層は、高い性能または非常に小さなフットプリントが求

められる組み込みビジョンシステムに、主に限定される選択肢となる。

組み込みビジョンは、「リーン」なビジョンを実現するものとみなすことができ、OEM、システムインテグレーター、標準的なカメラメーカーを含む、多くの企業がそれを利用することができる。「組み込み」は、多くの用途で用いられる一般的な用語で、単一の仕様リストでそれを定義するのは難しい。しかし、市場を促進するのは、最先端の速度や感度ではなく、サイズ、重量、消費電力、コストであることを

踏まえて、組み込みビジョンシステムを最適化するために適用できる、いくつかの規則が存在する。イメージセンサは、それらのパラメータに大きな影響を与える要素であり、組み込みビジョンシステム全体の性能の最適化につながるイメージセンサを、慎重に選択する必要がある。適切なイメージセンサを選択すれば、組み込みビジョン設計者はより自由な設計が可能となり、部品数を減少させるだけでなく、照明と光学系の両方のフットプリントを縮小することができる。しかし、イメージセンサ以上に、サイズ、重量、消費電力、コストのさらなる最適化と、開発コストと時間の大幅な削減をもたらす可能性を秘めるのが、イメージングモジュールという形で登場している、ボードレベルのターンキーソリューションである。民生市場からの手頃な価格の画像信号プロセッサが、ディープラーニングによって最適化されて、複雑さを増大させることなく提供されている。

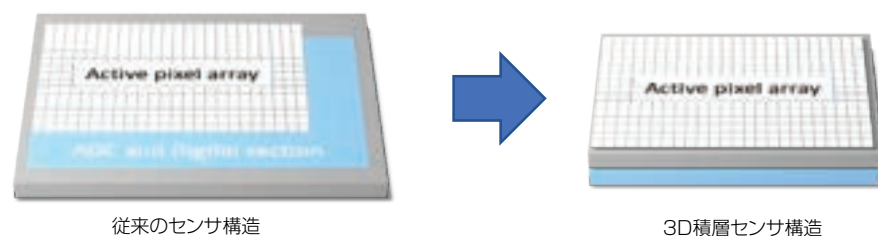


図5 3Dチップ積層技術により、ピクセルアレイとアナログ/デジタル回路を重ね、さらには特定用途の処理を行う複数の層まで追加しつつ、センサのフットプリントを縮小することが可能である

著者紹介

マリー＝シャルロット・ルクレール (Marie-Charlotte Leclerc) は、米テレダイン e2v 社 (Teledyne e2v) の製品マネージャー。

URL: www.teledyneee2v.com

VSDJ