CMOS ハイスピードラインスキャンカメラ：sprint

画像処理の高精細化が進む中で、大容量画像の取り込みの高速化に対する要求も同時に高まり続けています。この要求に応えるための鍵は、データ転送能力の更なる拡張にあります。

現在の多くのラインスキャンカメラは CCD (Charged Coupled Device) センサーを採用しています。CCD センサーは低速取り込み時には非常に高画質な画像を取得できるというメリットがありますが、高速取り込みを実現するためには様々な制約に直面することになります。

CCD センサーの場合、高速なアプリケーションではシフトレジスターの負荷が高くなるので、センサーの駆動回路もそれに対応し、高い周波数で動作する必要があります。これには膨大な電力を消費するため、センサーやカメラの電子回路の加熱を招いてしまいます。また、高速取り込みを実現するためには、CCD センサーには外部出力の増幅器を備えた出力タップの多様性が求められますが、それぞれのタップには A/D 変換器が必要となります。このため、速度を求めると CCD カメラはサイズが大きく、かつ高価になってしまいます。

これらの制約を打開するため、ラインスキャンカメラにおいて、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)センサーという新しい考え方でのアプローチがとられました。

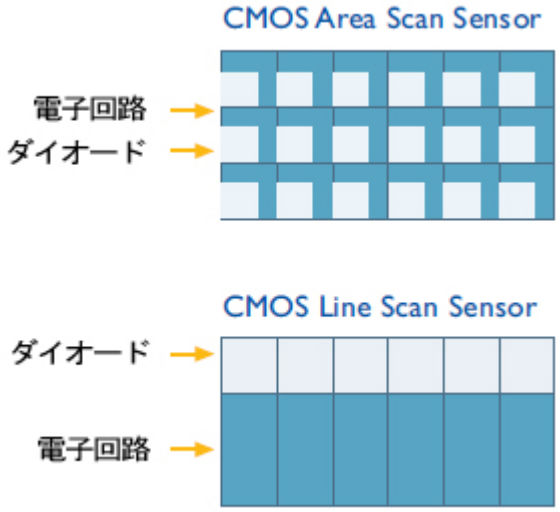
今日では、エリアスキャンカメラにおいて CMOS センサーが一つのソリューションとして確立されています。CMOS センサーは 1967 年に発明されており、ほぼ時を同じくして発明された CCD センサー(1969 年発明)とともに、約 40 年の歴史があります。1990 年代に至るまで、CMOS センサーはリソグラフィの低分解能に苦しんできました。また、画像センサー

用に CMOS の製造技術を最適化することも課題の 1 つとして顕在していました。

しかしながら、CMOS-APS (Active Pixel Sensor)技術の出現が、CMOS センサーに技術革新をもたらしました。この CMOS-APS はおよそ 10 年前に開発されたものでしたが、特に列方向に並列な A/D 変換器のアーキテクチャを持つものについて、急速に高速エリアスキャンカメラの第一選択肢となっていきました。その主な要因となったのが、非常に高速な取り込み速度、そして低価格という大きなメリットです。

CCD 技術から学んだ製造技術は、段階的に CMOS 画像センサーの製造工程へと展開されていきました。チップ製造技術の向上により、今日開発された CMOS センサーは優れた低ノイズレベルと均一性の特性を示しています。結果として、今日の CMOS センサーは、CCD 技術の優れた画質を実現しながらも、従来からの利点である低価格や高速度などを維持したものとなっています。

加えて、CMOS センサーではセンサーのフォトダイオードとチップ上の CMOS 回路を組み合わせることが可能です。これはほぼ全ての電子機器を外部から基板に付加しなければならない CCD と比較すると極めて大きな利点となります。また、CMOS センサーのオンチップ回路を用いることで、相関 2 重サンプリング回路やマルチプレクサのような混合信号回路、あるいはタイミング発生器のようなデジタル回路を使用するのに十分な容量を確保することが可能です。携帯電話業界で実証されたように、このような画像センサーへの新たな技術の融合は劇的な価格の低下をもたらし得ます。



CMOS センサーはこのような特徴からエリアスキャンカメラに適用されていきました。BASLER カメラ sprint には、ラインスキャンカメラに対して CMOS センサーが使用されていますが、ラインスキャン CMOS センサーとエリアスキャン CMOS センサーを比較することで、ある重要な違いが見えてきます。

エリアスキャンカメラでは、各画素の電子回路は各ピクセルグリッドにおいてフォトダイオードと隣り合っていなければならないため、フォトダイオードと電子回路の領域が限られています。一方ラインスキャンカメラでは、フォトダイオードは画素領域全体を占有することができ、各画素の電子回路も外側に設置することが可能です。結論として、

1. エリアカメラにおける CMOS センサーのフィルファクターは通常 10%から最大でも 70%までしか得られない一方で、ラインセンサーの場合はフィルファクター100%を得ることができる
2. エリアセンサーではスペースの制約上、CMOS 上のトランジスターを 1 ピクセルあたり 1.5～7.0 個にまで抑えなければならない一方で、ラインスキャンセンサーの場合は 1 ピクセルあたりのトランジスターの数に制約はない

という違いがあります。

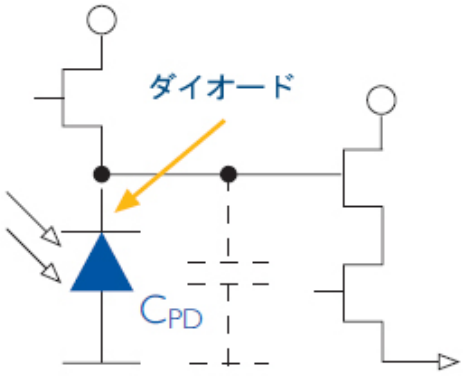
このうちの 2 では、ラインセンサーの CMOS センサー1 つ 1 つの電子回路に十分なスペースがあることを表しており、つまりはラインセンサーCMOS にはより高度な機能を搭載することが可能であることを意味しています。

例えば、アナログのゲインについて考えてみましょう。エリアセンサーでは、電気容量はフォトダイオードの接合点の容量（C_{PD}）によって決まります。高いゲインを得るためには、この電気容量の値は小さくなくてはなりませんが、全ての画素から光量子を集めるためには、C_{PD} にはある一定値以上の電気容量が必要となります。
一方ラインセンサーでは、電子回路に十分なスペースを持っているため、光量子の集積のために集積コンデンサー（C_{int}）を使用することが可能です。このため、電気容量を小さくすることができ、高感度を獲得するのに必要な条件となる高いアナログのゲインを取得することが可能です。

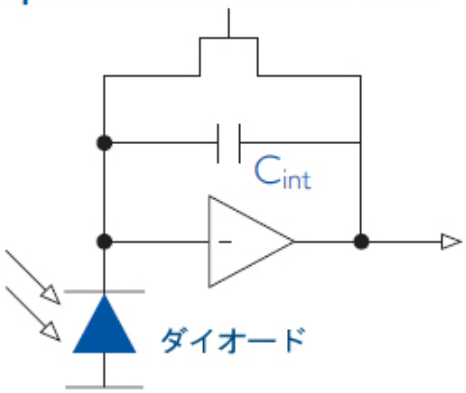
次にノイズについて考えてみましょう。センサーが読み込むノイズのうち、最も重要なものが 1/f ノイズです。1/f ノイズの大部分は相関 2 重サンプリング（CDS）を適用することよって除去することが可能です。CMOS エリアスキャンセンサーでは、1 画素中に配置することができる電子回路の大きさの限界を超えてしまうため、CDS は一般的に適用されませ

ん。一方で CMOS のラインスキャンセンサーの場合は、各画素において CDS 回路の大きさを考慮するのに十分なスペースが存在します。従って、CMOS ラインスキャンセンサーのノイズレベルは、原理上 CMOS のエリアスキャンカメラより少なく、CCD と同程度となります。

Typical CMOS Area Scan Pixel



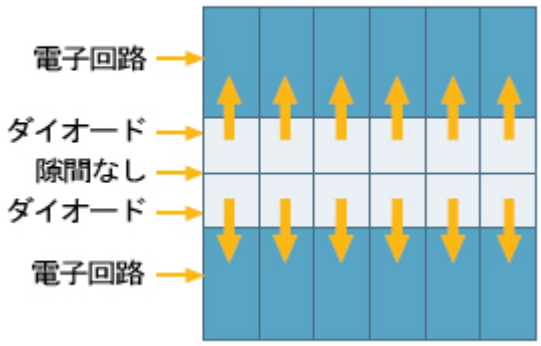
sprint Line Scan Pixel

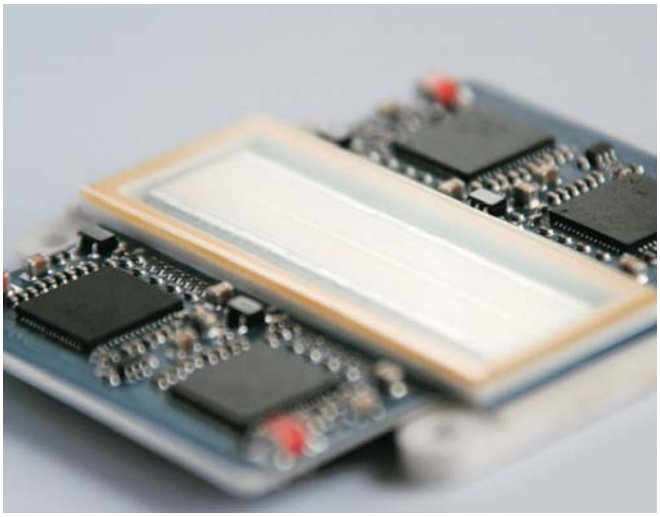


BASLER sprint シリーズには、最新 CMOS ラインスキャンセンサー技術が採用されており、前述の利点を具現化した仕様となっています。

sprint シリーズには 100%のフィルファクターを持つ非常に高感度な CMOS ラインセンサーが、ライン間の隙間なく 2 ライン並列に実装されています。sprint シリーズには 1 つのラインのみを使用する Single line モードと 2 つのラインを使用する Dual line モードが搭載されており、Single line モード時には最大 70KHz、Dual line モード時には最大 140KHz という驚異的なラインレートで動作させることが可能です。

sprint Dual Line Scan Sensor

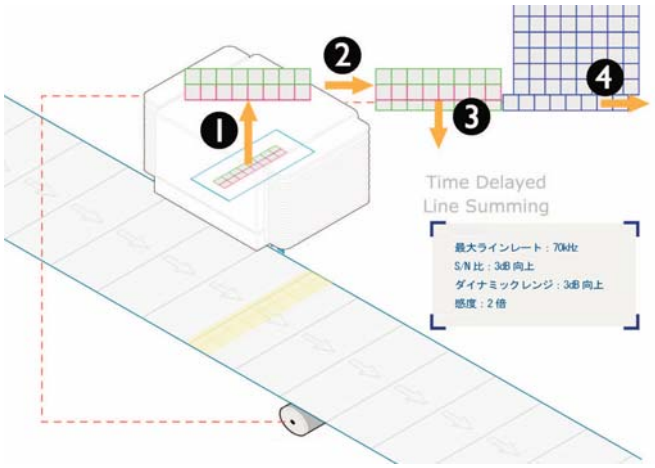




センサーが 2 列並んでいるため、まず片方のライン（ライン A）で撮影し、次にもう一方のライン（ライン B）で同じ場所を撮影するといったように、カメラの下を通過していく対象物の同じ領域を 2 度撮影することが可能です。また、それぞれのラインにおいて撮影された画像の輝度値の足し合わせ（ライン間輝度積算機能)や、平均をとる機能(ライン間輝度平均化機能)が実装されており、これにより感度を倍増させるなどのメリットを得ることが可能です。

ライン間輝度平均化機能では、読み込みノイズを減らし、カメラの全電荷量、ダイナミックレンジ、S/N 比をそれぞれ約 3dB ずつ増加させるという利点があります。これは信号レベルが一定であるのに対して、

ノイズが 1/√2 倍に削減されるためです。
また、ライン間輝度積算機能では、S/N 比と感度をともに約 3dB 向上させることが可能です。この場合ノイズは√2 倍に増加する一方、信号は 2 倍に増幅されるためです。この平均および加算する技術を適用した場合においても、1 ラインの取り込み時と同様に 70KHz のラインレートを実現することが可能です。



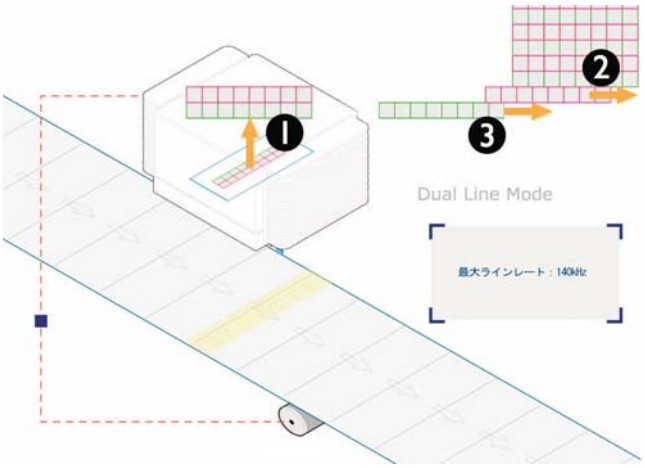
ライン間輝度積算機能

ライン間輝度積算機能では、最大 70kHz のラインレートで動作可能です。対象物が 1 ライン移動する度に 2 つのラインで撮像するため、対象物の同じ領域が 2 度撮像されることになります。

1. 2. トリガーが入力される度にそれぞれのラインによる撮像が行われます。
3. 先に撮像されたライン(赤)と次に撮像されたライン(緑)の輝度値の積算が計算されます。これらはどちらも対象物の同じ領域を撮像した情報になります。
4. 積算した情報を蓄積(青)することで画像を生成します。これにより感度が倍増し、S/N 比を向上させることが可能です。

加えて、Dual line センサーを用いることで、出力ラインレートを 2 倍にすることも可能です。この場合、入力されるトリガー信号 1 回おきに、2 ラインの画像が同時に撮影されます。各フレームは 2 ラインで構成されているため、フレームレートが 70kHz しかないにも関わらず、実際のラインレートは 140kHz となります。つまり、140kHz でトリガーを入力した場合に、カメラから 1 つのトリガー信号に対して 1 ラインの画像が出力されることと同義になります。また、撮影される画像の画質は、140kHz で 1 ラインずつ取り込んでいく場合とまったく同じになります。

Dual line モードを使用する場合には、1 つのトリガー信号が正確に 1 ラインに対応するようにトリガーを入力する必要があります。



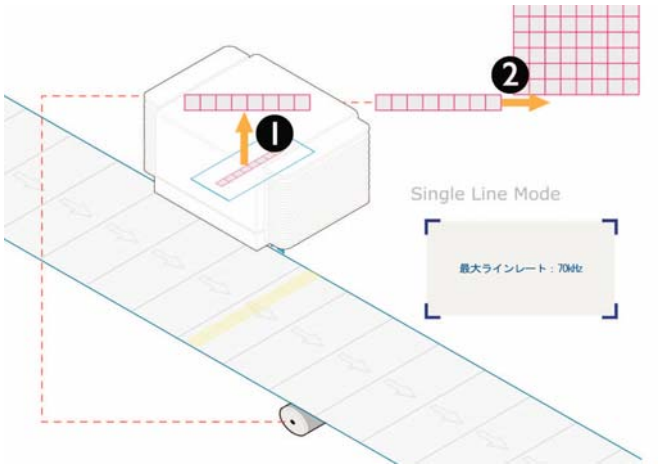
Dual Line モード

Dual Line モードでは、最大 140kHz で動作可能です。

1. 最初のトリガー入力時に 2 ラインの画像が撮像されます。トリガー信号は最大 140kHZ で入力することが可能です。
2. 第一ラインにより撮像した情報(赤)が転送されます。第 2 ラインの情報(緑)はカメラに保持されます。
3. 次のトリガー入力時に、第 2 ラインのデータ(緑)が転送されます。

3 番目のトリガー入力時に、さらに 2 ラインが撮像されます。最初のトリガー入力時から 2 ライン分対象物は移動しているため、対象物は全て 1 度のみ撮像されることになります。

アプリケーションによっては、単純に Single line モードを必要とする場合も考えられます。このモードでは、1 ラインのセンサーのみ使用され、もう一方のラインのセンサーは使用されません。最大 70kHz という非常に高いラインレートで、実際に 1 ラインのセンサーしかないカメラとして使用することが可能です。

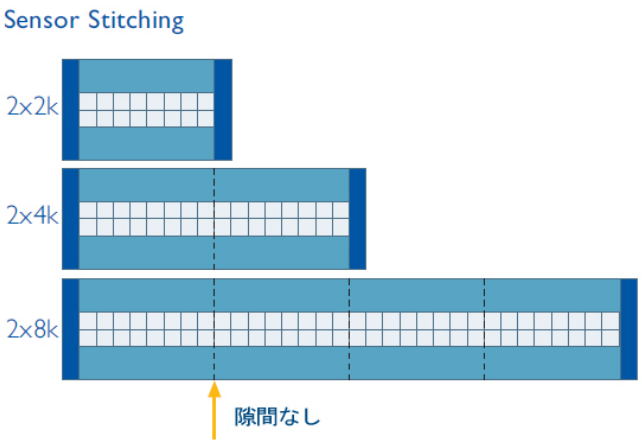


Single Line モード

1. トリガーが入力される度に対象物の 1 ラインの撮像が行われます。
2. 撮像されたラインは画像入力ボードへと転送され、それぞれのラインの情報から 2 次元の画像が生成されます。

これはラインスキャンカメラの慣例的な取り込み方法ですが、BASLER sprint シリーズでは通常の取り込み方法も提供しています。

sprint シリーズは現在、2×2000 ピクセル、2×4000 ピクセル、2×8000 ピクセルというラインナップを有しています。4k および 8k のモデルでは、ウエハーレベルにおいて 2000 ピクセル単位で結合されています。この結合部は空間的な隙間が全く無いように設計されているため、継ぎ目の無い画像を得ることが可能です。



sprint が生成する大量のデータは、今日では非常に一般的となったカメラリンクインターフェース経由でホスト PC へと転送されます。

また、sprint シリーズはノイズレベルにおいて、最先端の CCD カメラと同等以上の性能を発揮するとの評価結果も出ています。さらに空間的性能と直線性についても、CCD センサーに十分匹敵する性能が得られています。

sprint は高いラインレートを必要とするアプリケーションに最適なシリーズとなっています。高いラインレートでの取込時には露光時間が非常に短くなってしまうため、当然得られる光量子も少なくなります。そのため、明るい画像を取得するためには、高いゲインと優れた感度を持つセンサーが必要となります。 sprint シリーズでは、この高速取り込みを実現するにあたって、sprint のために設計された特殊な CMOS センサーが搭載されています。読み込みノイズが少なく、高いダイナミックレンジが実現されており、高速取り込み時においても非常に高感度かつ高精細な画像を取得することが可能です。

長期的には、ラインセンサーカメラの市場においても、既にエリアスキャンカメラの市場で行われているような CCD から CMOS への移行が予想されます。CMOS ラインスキャン技術は、マシンビジョン市場、特に高いラインレートと同時に低ノイズが求められるようなハイエンドなアプリケーションにおいて、急速に広がり重要な役割を果たすことが期待されています。

株式会社リンクス
TEL: 045-979-0731　FAX: 045-979-0732
〒225-0014
神奈川県横浜市青葉区荏田西 1-13-11
http://www.linx.jp