

測距イメージセンサ

S15452/S15453/S15454-01WT

目次

1. 特長	1
2. 構造	2
3. 動作原理	3
3-1. 間接 TOF (Time-of-Flight)	3
3-2. 外乱光除去回路	6
3-3. 距離演算	8
3-4. 電荷排出機能	12
3-5. 非破壊読み出し	13
3-6. 駆動タイミング	14
3-7. タイミングチャート	15
3-8. フレームレートの算出方法	18
4. 使い方	19
4-1. 構成例	19
4-2. 光源の選択	19
5. キャリブレーション	19
6. 入射光量の算出	21
7. 評価キット	25

測距イメージセンサは、TOF (Time-of-Flight)方式で対象物までの距離を測定するイメージセンサです。パルス変調した光源と組み合わせて使用し、発光／受光タイミングの遅延時間の信号を出力します。その信号を外付けの信号処理回路または PC で演算することによって、距離データが得られます。

1. 特長

- ・近赤外域までの広い感度波長範囲
- ・外乱光の影響を低減
- ・小型 WLP (Wafer Level Package)タイプ

[表 1-1] 製品ラインアップ

タイプ	リニア		エリア
型名	S15452-01WT	S15453-01WT	S15454-01WT
画素高さ	50 μm		50 μm
画素ピッチ	20 μm	20 μm	50 μm
画素数	64	256	96 \times 72
開口率	80%		70%
ビデオデータレート	5 MHz		10 MHz

2. 構造

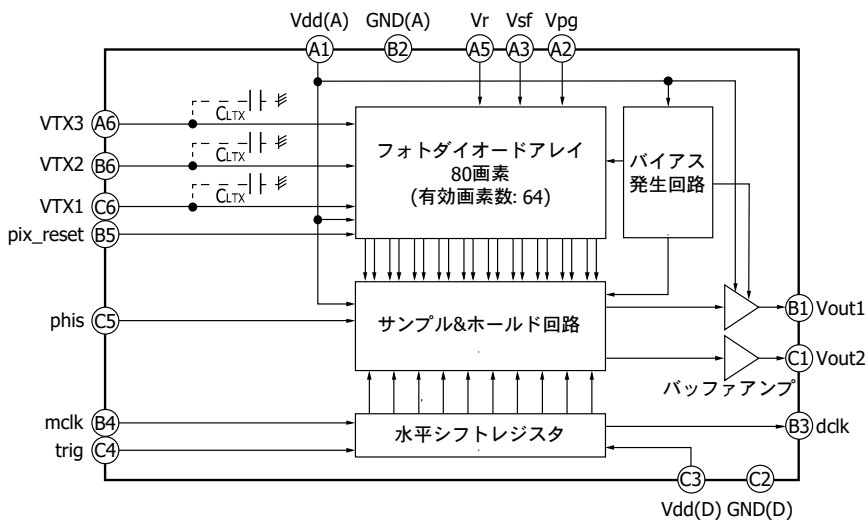
近赤外高感度タイプ測距イメージセンサは、受光部・シフトレジスタ・出力バッファアンプ・バイアス発生回路・タイミング発生回路などから構成されています。図 2-1 にブロック図を示します。測距イメージセンサは、一般的な CMOS イメージセンサとは以下の点が異なります。

- ・高速電荷転送が可能な画素構造
- ・2つの出力端子から、距離演算に必要な電圧を出力

受光部からの出力信号は、一般的な CMOS イメージセンサと同様に、サンプル&ホールド回路または列ゲインアンプ回路で必要な信号処理が行われ、シフトレジスタで順次走査されて電圧出力として読み出されます。

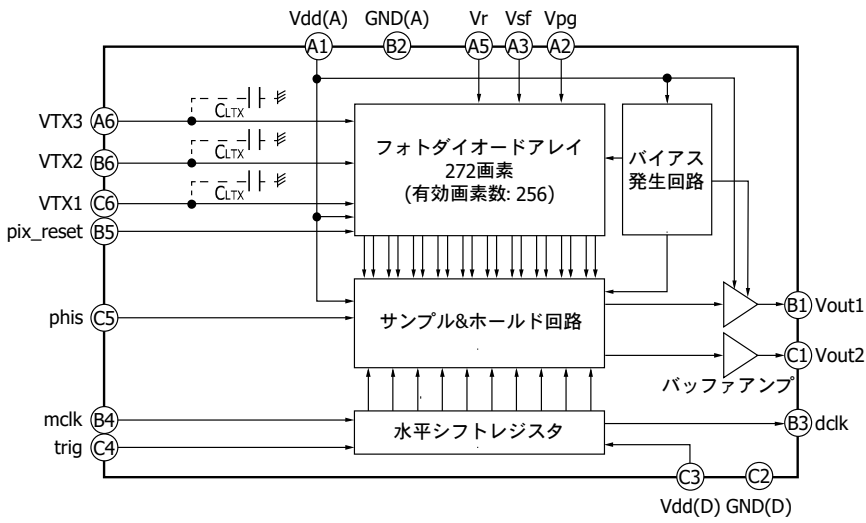
[図 2-1] ブロック図

(a) S15452-01WT



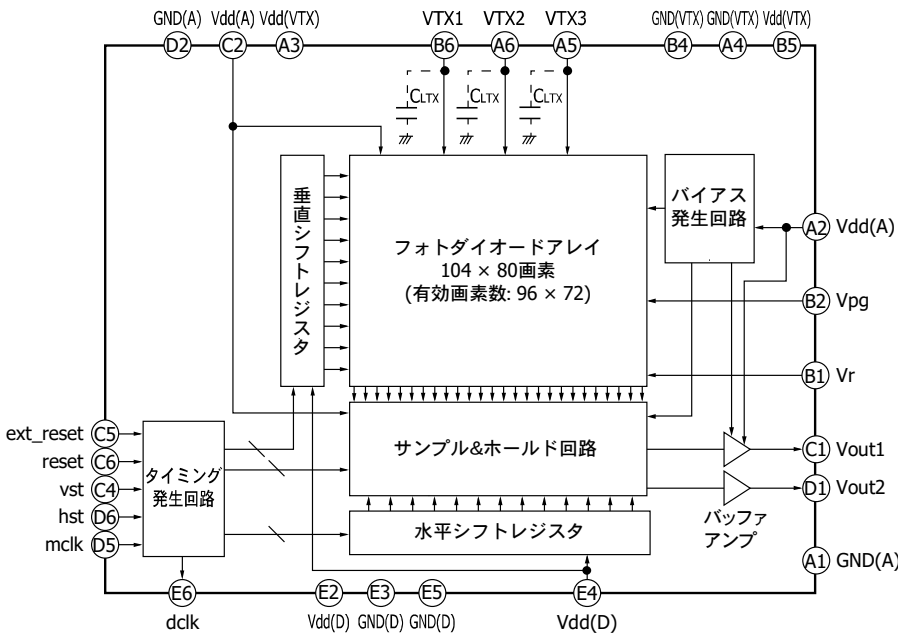
KMPDC0738JA

(b) S15453-01WT



KMPDC0742JA

(c) S15454-01WT



KMPDC0744JA

3. 動作原理

3-1. 間接 TOF (Time-of-Flight)

測距イメージセンサの受光部のタイミングチャートを図 3-1 に示します。蓄積電荷 $Q1$ および $Q2$ をそれぞれの積分容量 $Cfd1$ 、 $Cfd2$ において電荷-電圧変換した出力電圧 $Vout1$ 、 $Vout2$ は式(3-1)(3-2)で表されます。

$$Vout1 = Q1/Cfd1 = N \times Iph \times \{(T0 - Td)/Cfd1\} \dots(3-1)$$

$$Vout2 = Q2/Cfd2 = N \times Iph \times (Td/Cfd2) \dots(3-2)$$

$Cfd1$, $Cfd2$: 各出力の積分容量

N: 電荷転送クロック回数
 I_{ph}: 光電流
 T₀: 出射光のパルス幅
 T_d: 遅延時間

式(3-1)(3-2)において C_{fd1}=C_{fd2} の場合、遅延時間 T_d は式(3-3)で表されます。

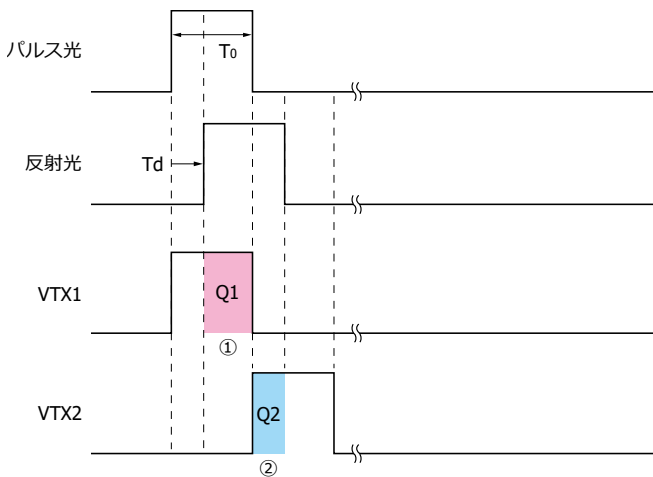
$$T_d = \{V_{out2}/(V_{out1} + V_{out2})\} \times T_0 \dots(3-3)$$

距離に応じて出力された値 V_{out1}、V_{out2} を用いて、距離 D を式(3-4)で表すことができます。

$$D = 1/2 \times c \times T_d = 1/2 \times c \times \{V_{out2}/(V_{out1} + V_{out2})\} \times T_0 \dots(3-4)$$

c: 光速 (3 × 10⁸ m/s)

[図 3-1] 受光部のタイミングチャート



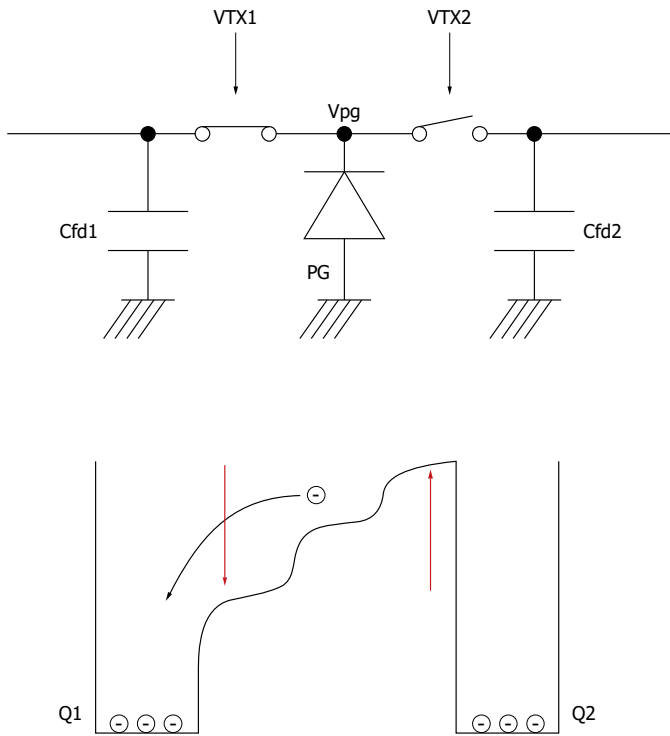
KMPDC0470JB

測距イメージセンサの受光部構造および表面ポテンシャルを図 3-2 に示します。一般的な CMOS イメージセンサは単一電源駆動が可能ですが、受光部から蓄積部へ電荷を転送するのに μs オーダーの時間が必要です。一方 CCD イメージセンサは、高速電荷転送が可能 (ns オーダー) ですが、高電圧、複数の印加電圧が必要です。

距離情報を取得するために必要な高速電荷転送 (数十 ns~) を実現するために、当社は CMOS プロセスにおいて、CCD のような高速電荷転送が可能な画素構造を開発しました。これにより、測距イメージセンサは距離測定に必要とされる高速の電荷転送が可能となりました。

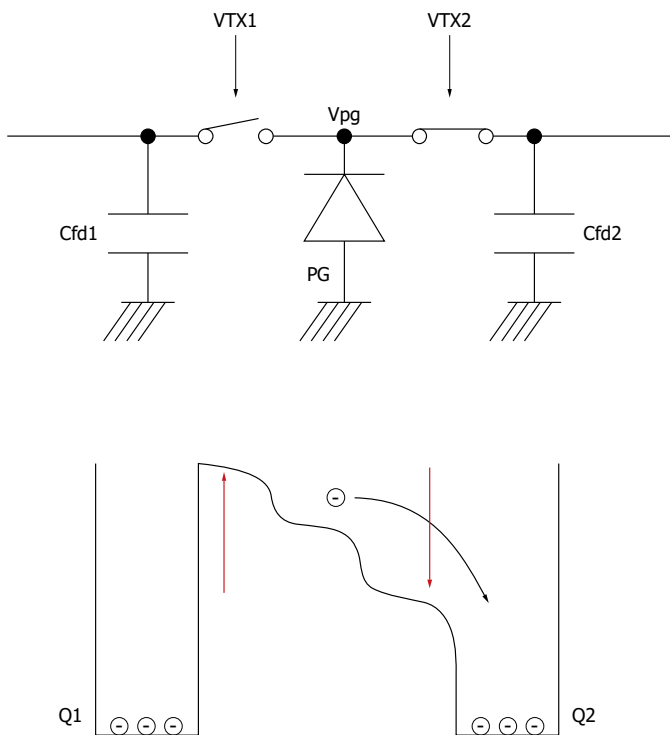
1 回のパルス発光で発生する電子数は数 e 程度です。このため、図 3-2 の動作を数千回~数万回繰り返した後に、蓄積された電荷の読み出しを行います。なお繰り返す回数は、入射光量や、必要とされる距離精度などによって変わります。

[図 3-2] 受光部構造、表面ポテンシャル
 (a) VTX1: オン, VTX2: オフ (図 3-1 ①の場合)



KMPDC0471EB

(b) VTX1: オフ, VTX2: オン (図 3-1 ②の場合)



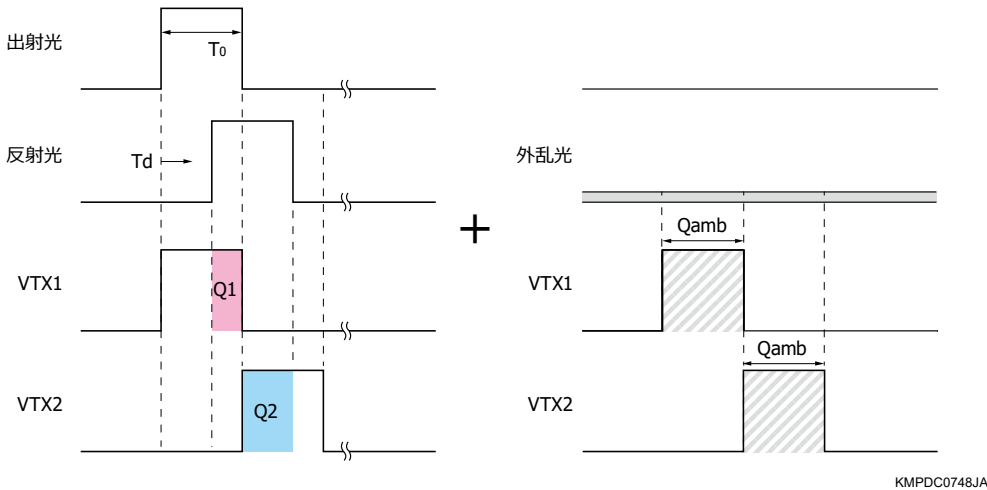
KMPDC0472EB

3-2. 外乱光除去回路

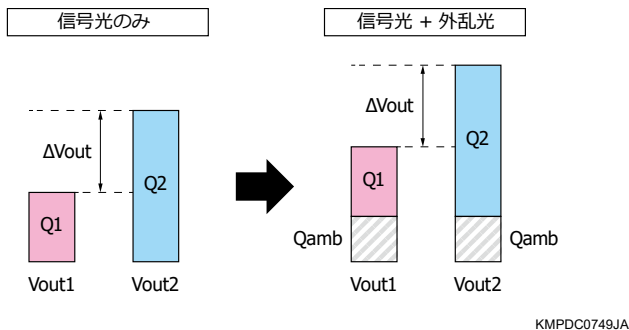
測距イメージセンサは、信号電荷 (Q1, Q2)と外乱光電荷 (Qamb)の総和を出力します[図3-3]。

出力電圧Vout1とVout2の差 ΔV_{out} により距離を計測するため、ある程度の外乱光がある場合にも測距は可能です。ただし、外乱光により発生した電荷が大きい場合には、積分容量の飽和によって信号電荷として出力できる電圧範囲が少なくなり、ダイナミックレンジが狭くなる可能性があります [図3-4]。

[図 3-3] 信号電荷と外乱光電荷



[図 3-4] 外乱光入射時における蓄積電荷量



測距イメージセンサ S15452/S15453/S15454-01WTには、外乱光が入射した場合に出力電圧が飽和することを抑制する外乱光除去回路 [図3-5]が搭載されています。外乱光除去回路の動作を図3-6に示します。積分容量 Cfd1・Cfd2のどちらかが飽和しそうになると、Cfd1・Cfd2の両方に蓄積電荷を減らす方向に同量の電流が流れます。この場合、Vout1とVout2の差分値は変わらないため、距離の測定には影響がありません。

なお外乱光除去回路は、出力電圧が飽和に近づくと自動的に機能し、オン/オフを制御することはできません。Cfd1、Cfd2における信号光による電流を I_{ac1} 、 I_{ac2} 、外乱光による電流を I_{amb} とします。 I_{ac1} 、 I_{ac2} 、 I_{amb} による電荷は区別されずに同時に蓄積されます [図 3-6]。Cfd1、Cfd2における入射光 (信号光 + 外乱光)による電流を I_{ph1} 、 I_{ph2} とします。Vout1、Vout2 が閾値を超えていない場合 [図 3-6 (a)]、Vout1 の変化量 ΔV_{out1} は式(3-5)で表され、Vout2 の変化量 ΔV_{out2} は式(3-6)で表されます。

$$\Delta V_{out1} = (Q1 + Q_{amb})/Cfd1 = N \times \{I_{ac1} \times (T_0 - T_d)\} + (I_{amb} \times T_0)/Cfd1 \dots(3-5)$$

$$\Delta V_{out2} = (Q2 + Q_{amb})/Cfd2 = N \times \{I_{ac2} \times T_d\} + (I_{amb} \times T_0)/Cfd2 \dots(3-6)$$

積分容量 Cfd1、Cfd2 が等しい場合、 ΔV_{out} は式(3-7)で表されます。

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{out1} - \Delta V_{out2} = N \times \{ \{I_{ac1} \times (T_0 - T_d)\} - (I_{ac2} \times T_d) \} / (C_{fd1} \text{ または } C_{fd2}) \dots(3-7)$$

Vout1 または Vout2 が閾値を超えた場合 [図 3-6 (b)], Iph1 と Iph2 で大きい方の電流が Cfd1 と Cfd2 に流入します。Iph1 < Iph2 の場合、Iph2 が流入します。Cfd2 では、流入および流出する電流が等しいため、Vout2 の増減は 0 で、外乱光除去回路の閾値と同じ電位になります。その時点から Cfd1 には、注入する電流の方が大きくなるため Vout1 が上昇し、Iph1 - Iph2 に相当した電荷が蓄積されます。外乱光除去回路の動作後における Vout1 の変化量 ΔVout1 は式(3-8)で表され、Vout2 の変化量 ΔVout2 は式(3-9)で表されます。

$$\begin{aligned} \Delta V_{out1} &= \{ (Q_1 + Q_{amb}) - (Q_2 + Q_{amb}) \} / C_{fd1} = (Q_1 - Q_2) / C_{fd1} \\ &= N \times \{ \{I_{ac1} \times (T_0 - T_d) + (I_{amb} \times T_0)\} - \{ (I_{ac2} \times T_d) + (I_{amb} \times T_0) \} \} / C_{fd1} \\ &= N \times \{ \{I_{ac1} \times (T_0 - T_d)\} - (I_{ac2} \times T_d) \} / C_{fd1} \end{aligned} \dots(3-8)$$

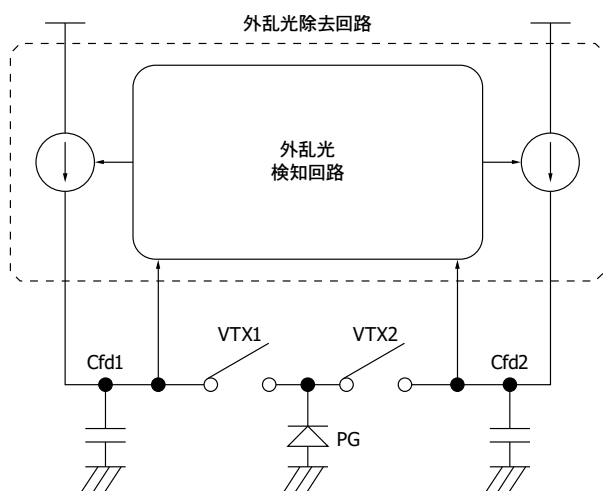
$$\Delta V_{out2} = \{ (Q_2 + Q_{amb}) - (Q_2 + Q_{amb}) \} / C_{fd2} = 0 \dots (3-9)$$

Cfd1、Cfd2 が等しい場合、ΔVout は式(3-10)で表されます。

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{out1} - \Delta V_{out2} = N \times \{ \{I_{ac1} \times (T_0 - T_d)\} - (I_{ac2} \times T_d) \} / (C_{fd1} \text{ または } C_{fd2}) \dots(3-10)$$

外乱光除去回路の動作によって、式(3-7)(3-10)では、外乱光による電荷 Qamb が減算されています。

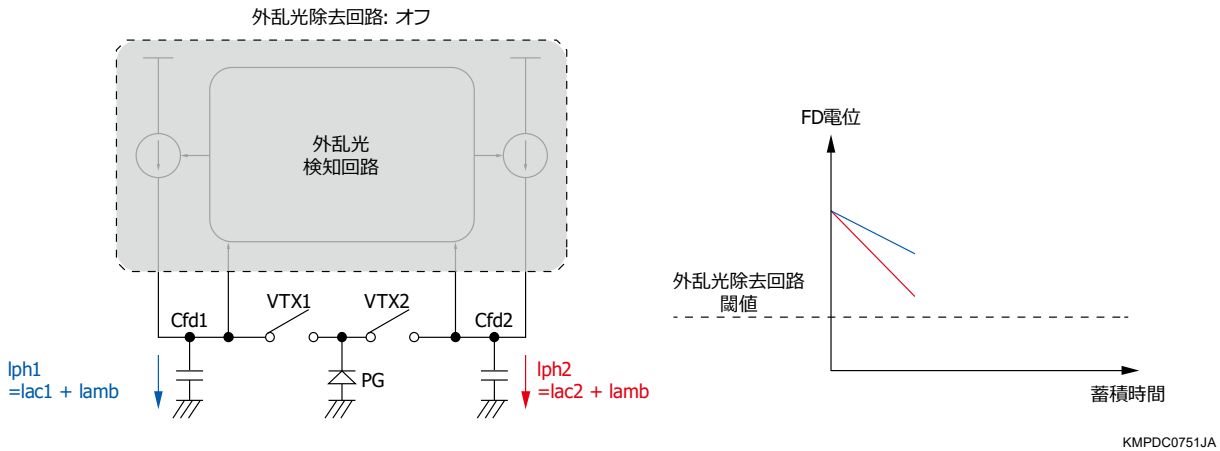
[図 3-5] 外乱光除去回路



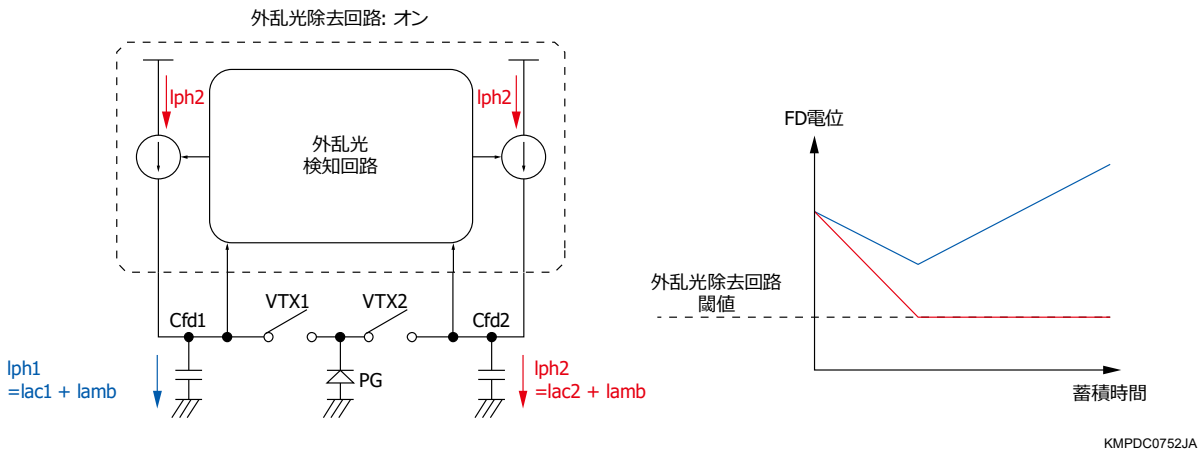
KMPDC0750JA

[図 3-6] 外乱光除去回路の動作

(a) 外乱光除去回路: 動作前



(b) 外乱光除去回路: 動作後 ($I_{ph1} < I_{ph2}$)



3-3. 距離演算

Cfd1、Cfd2 における出力電圧 V_{out1} 、 V_{out2} の差 ΔV_{out} を用いて距離を算出する方法を説明します。2つのゲート駆動タイミング (F1, F2) で4つの出力 $V_{out1}(F1)$ 、 $V_{out2}(F1)$ 、 $V_{out1}(F2)$ 、 $V_{out2}(F2)$ を用いて距離を算出します [図 3-7]。VTX1、VTX2 のパルス幅 T_1 、 T_2 を出射光のパルス幅 T_0 と同じにして、VTX1、VTX2 を交互に2回駆動します。

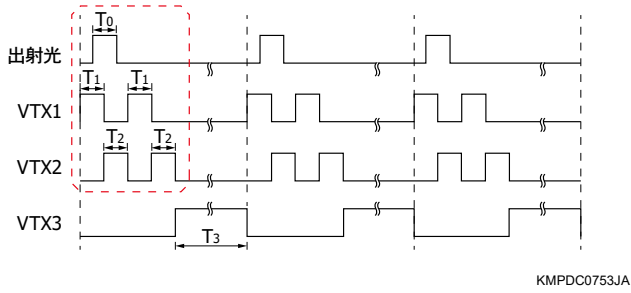
1つのゲート駆動タイミングだけでは、 V_{out1} 、 V_{out2} が同じ値の場合には $\Delta V_{out}=0$ になり、距離を算出できません。

図 3-7 の F1 には、出射光と VTX1 の駆動タイミングに $T_0/2$ の時間ズレがあります (F2 には時間ズレがありません)。ここで受光時に発生する全電荷量を1に規格化すると、 $T_0/2$ の時間ズレによって、 $\Delta V_{out}(F1)$ 、 $\Delta V_{out}(F2)$ の一方が0の場合でも、他方は1または-1となります。パルス光を用いて VTX1、VTX2 を交互に2回駆動することにより、遅延時間 $0 \sim 2T_0$ の範囲において全電荷量1を算出できます。ゲート駆動タイミング F1 および F2 の場合の、反射光の遅延時間 T_d における差信号量を図 3-8 に示し、差信号量の絶対値を図 3-9 に示します。

$|\Delta V_{out}(F1)|$ と $|\Delta V_{out}(F2)|$ を加算すると全電荷量1を算出できます。全電荷量の算出例 ($T_d=1/3T_0$ 、 $T_d=13/8T_0$) を図 3-10 に示します。全電荷量1を用いて、遅延時間 T_d を求めて距離を算出します。

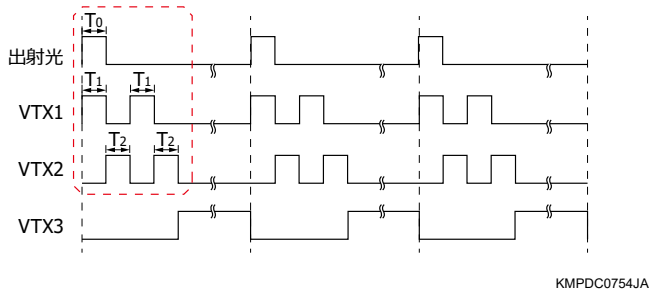
[図 3-7] ゲート駆動タイミング

(a) F1



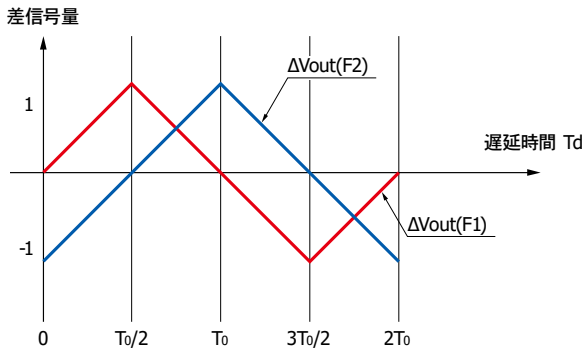
KMPDC0753JA

(b) F2



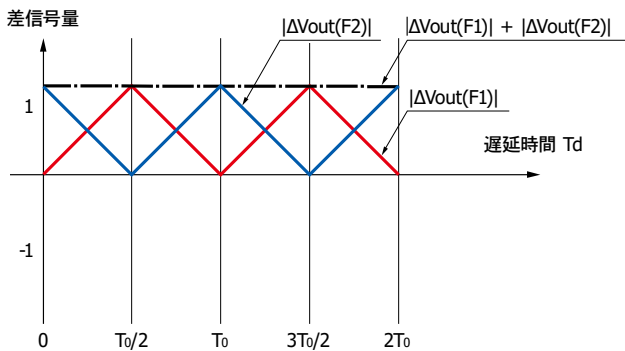
KMPDC0754JA

[図 3-8] 差信号量－遅延時間



KMPDC0755JA

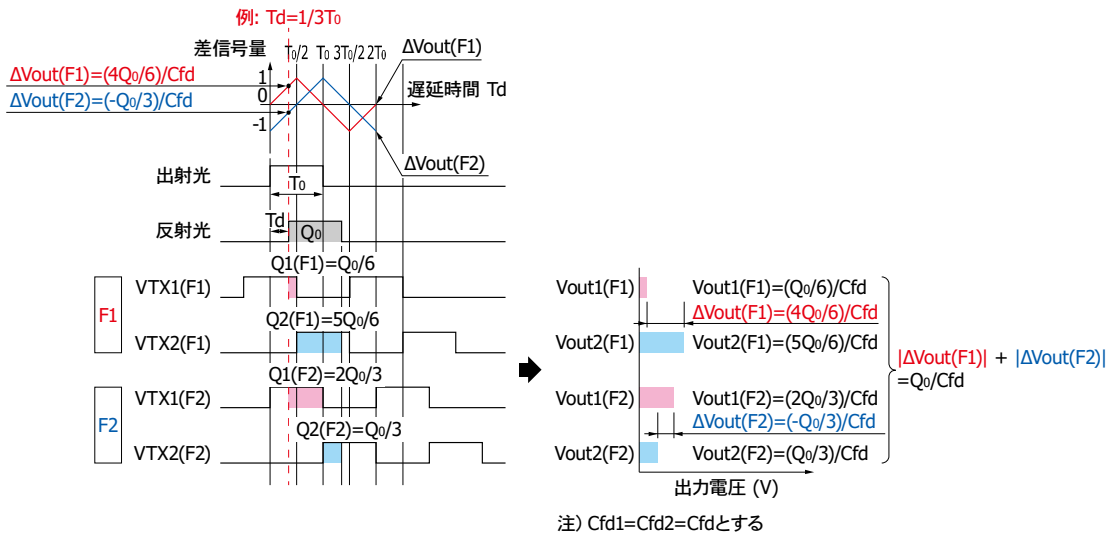
[図 3-9] 差信号量 (絶対値)－遅延時間



KMPDC0756JA

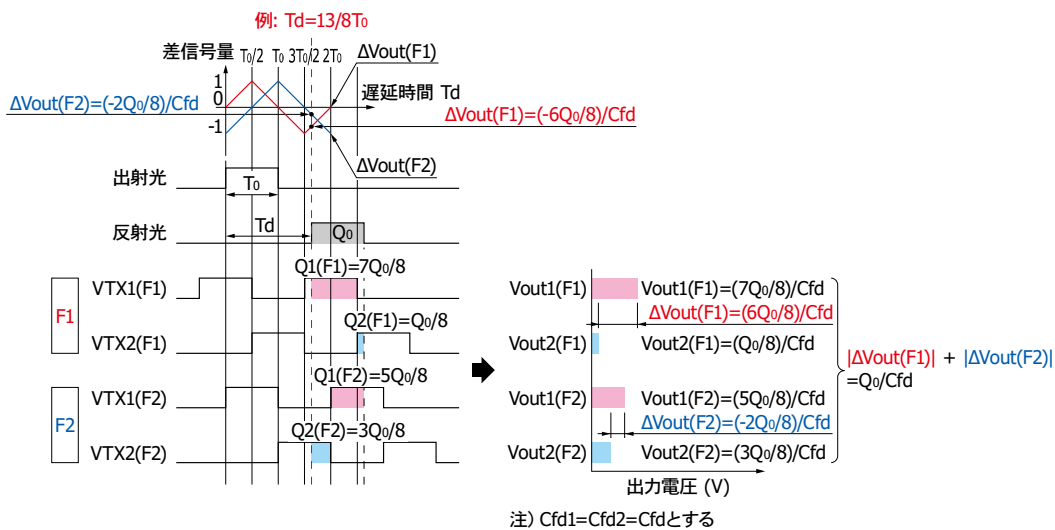
[図 3-10] 全電荷量の算出例

(a) $T_d=1/3T_0$



KMPDC0757JA

(b) $T_d=13/8T_0$



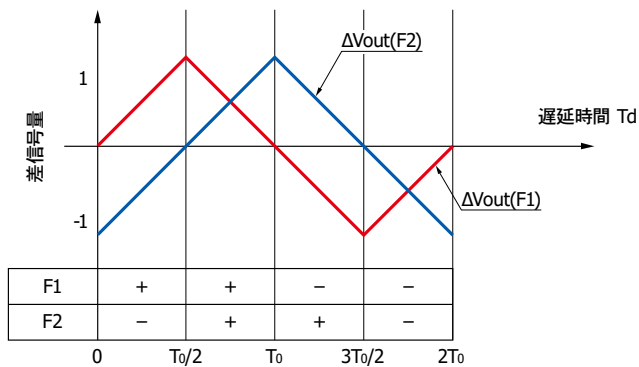
KMPDC0758JA

全電荷量と反射光による電荷量の比から距離 D を算出できます [式(3-11)]。遅延時間 0 から $2T_0$ において、電荷量が 0 から 1 へと線形に変化するように補正して、距離を算出します。

$$D = \{(\text{遅延時間 } T_d \text{ 後における電荷量})/(\text{全電荷量})\} \times CT_0 \dots(3-11)$$

$\Delta V_{out}(F1)$ の正負で受光タイミングの遅延が T_0 以上・以下を判別し、 $\Delta V_{out}(F2)$ を補正して全電荷量に対する遅延時間の変化量を求めます [図 3-11]。

[図 3-11] 差信号量の正負



KMPDC0759JA

$\Delta V_{out}(F1)$ の正負のそれぞれの場合において、 $\Delta V_{out}(F2)$ に異なる補正をして距離を算出します。 $T_d=0 \rightarrow 2T_0$ の変化に対して、 $\Delta V_{out}(F2)=0 \rightarrow 1$ となるように補正します。

(1) $\Delta V_{out}(F1)$ が正の場合

$\Delta V_{out}(F1)$ が正の場合には、遅延時間 $T_d < T_0$ です [図 3-11]。 $T_d=0 \rightarrow T_0$ の変化に対して、 $\Delta V_{out}(F2)=0 \rightarrow 0.5$ の変化になるように補正します。 $T_d < T_0$ の場合、 $\Delta V_{out}(F2)=-1 \rightarrow 1$ で、増加量は2です [図 3-11]。この増加量を0.5にするため、 $\Delta V_{out}(F2)$ に1/4の係数を掛けます。0からの変化量とするため、これに1/4のオフセットを加算します。 $\Delta V_{out}(F1)$ が正の場合の距離 D は、式(3-12)で表されます。

$$D = \left[\frac{\Delta V_{out}(F2)/4}{|\Delta V_{out}(F1)| + |\Delta V_{out}(F2)|} + 1/4 \right] \times CT_0$$

$$= \left[\frac{\Delta V_{out}(F2)}{|\Delta V_{out}(F1)| + |\Delta V_{out}(F2)|} + 1 \right] \times (CT_0/4) \quad \dots (3-12)$$

(2) $\Delta V_{out}(F1)$ が負の場合

$\Delta V_{out}(F1)$ が負の場合には、遅延時間 $T_d > T_0$ です [図 3-11]。 $T_d=T_0 \rightarrow 2T_0$ の変化に対して、 $\Delta V_{out}(F2)=0.5 \rightarrow 1$ の変化になるように補正します。遅延時間 $T_d > T_0$ の場合には $\Delta V_{out}(F2)=1 \rightarrow -1$ です [図 3-11]。これに-1の係数を掛けて傾きを逆転させると、 $\Delta V_{out}(F2)=-1 \rightarrow 1$ で、増加量は2になります。この増加量を0.5にするため、 $\Delta V_{out}(F2)$ に1/4の係数を掛けます。次に $\Delta V_{out}(F2)=0.5 \rightarrow 1$ となるように、3/4のオフセットを加算します。 $\Delta V_{out}(F1)$ が負の場合の距離 D は、式(3-13)で表されます。

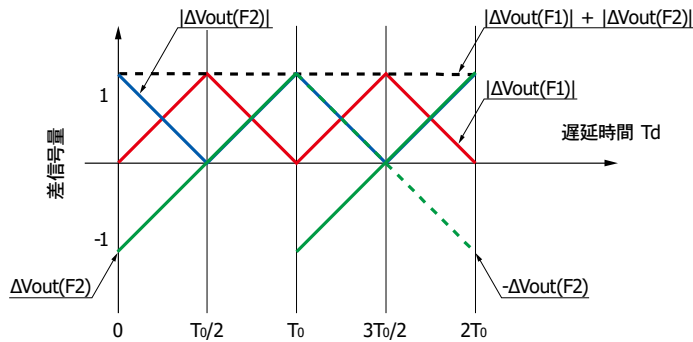
$$D = \left[\frac{-\Delta V_{out}(F2)/4}{|\Delta V_{out}(F1)| + |\Delta V_{out}(F2)|} + 3/4 \right] \times CT_0$$

$$= \left[\frac{-\Delta V_{out}(F2)}{|\Delta V_{out}(F1)| + |\Delta V_{out}(F2)|} + 3 \right] \times CT_0/4 \quad \dots (3-13)$$

(1)(2)の距離算出過程を図 3-12 に示します。

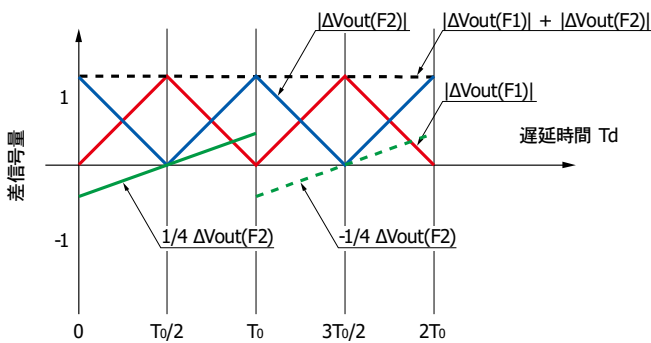
[図 3-12] 距離算出過程

(a) 傾きの正負の変更 (遅延時間 $T_d > T_0$ の場合のみ)



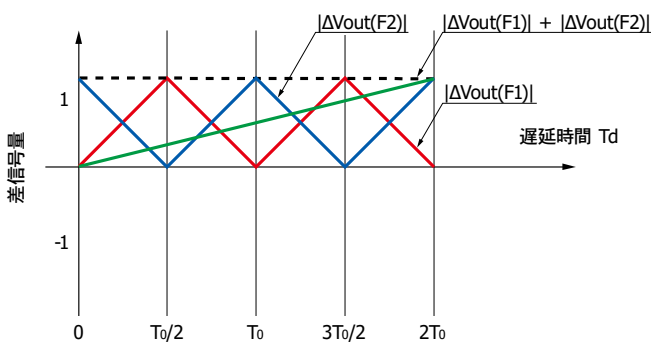
KMPDC0760JA

(b) 傾きの変更 [$\Delta V_{out}(F2)$ へ 1/4 を乗算]



KMPDC0761JA

(c) オフセットの加算 ($T_d < T_0$: 1/4, $T_d > T_0$: 3/4)



KMPDC0762JA

3-4. 電荷排出機能

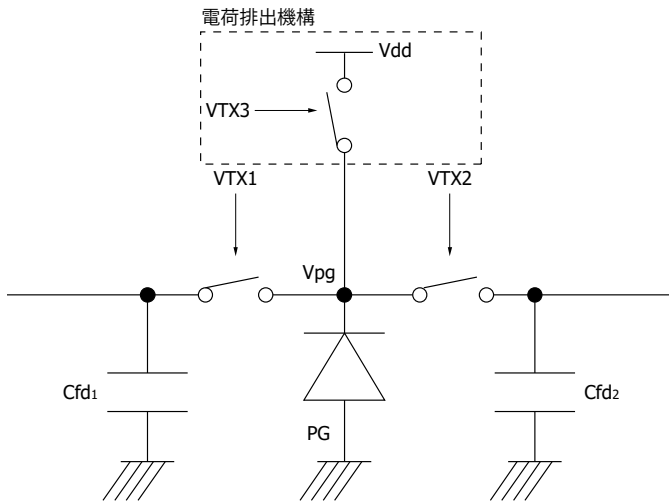
測距イメージセンサには、受光部にて発生した電荷を転送する電荷転送ゲート VTX1, VTX2 とともに、不要な電荷を排出する電荷排出ゲート VTX3 があります。VTX1=VTX2=オフ、VTX3=オンのとき、信号電荷が蓄積されずに電荷排出機能がオンになり、非発光期間における外乱光などによる不要な電荷を排出することができます。電荷排出機能により、以下が可能になります。

① 高速パルス光の検出

パルスレーザダイオードなどの高速パルス光による信号電荷を効率よく蓄積することができます。

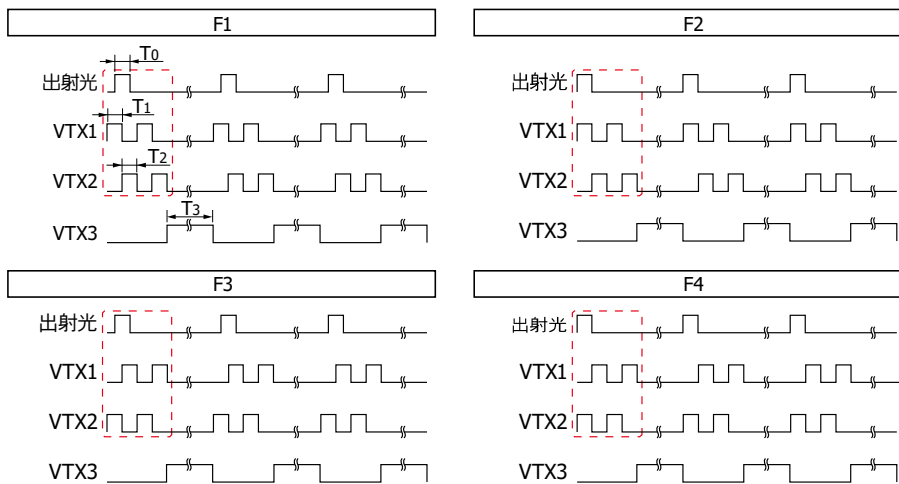
② シャッタ動作

[図 3-13] 受光部の構造



KMPDC0635JA

[図 3-14] 受光部のタイミングチャート



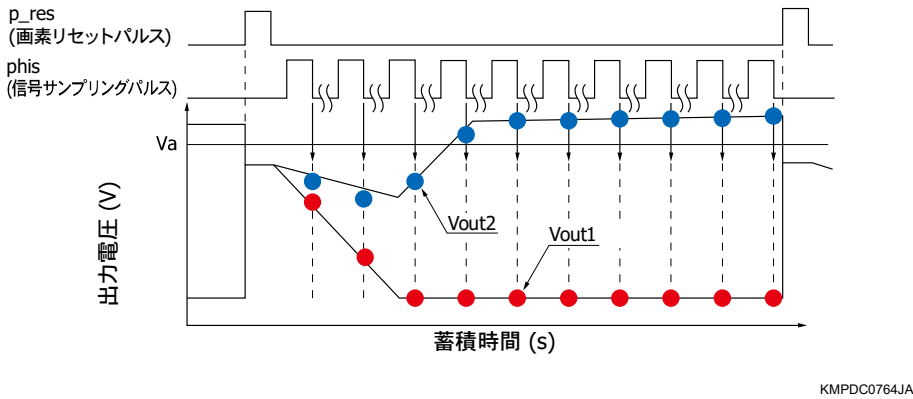
KMPDC0763JA

3-5. 非破壊読み出し

非破壊読み出しは、画素内の積分容量 $Cfd1 \cdot Cfd2$ をリセット（蓄積電荷を破壊しないで、異なる蓄積時間における電圧を出力する方法です。入射信号が強い場合は飽和しないように蓄積時間を短くし、入射信号の弱い場合は蓄積時間を長くすることにより、距離精度が高くなります。非破壊読み出しによって、異なる蓄積時間で読み出した信号の中から測距に適した大きな信号を選択でき、広いダイナミックレンジが実現できます。

図3-15に非破壊読み出しの概念図（出力電圧と蓄積時間の関係）を示します。飽和電圧よりも少し小さい値に閾値電圧 Va を設定します。 Va を超える直前の出力電圧が、高い測定精度を実現させるために最適な値です。また、蓄積時間の異なる任意の2点の差分を取るにより、 $Cfd1 \cdot Cfd2$ のリセット時に発生するノイズをキャンセルできます。なお非破壊読み出しのデメリットは、1フレームの中で複数回の読み出しを行うため、読み出し回数を増やすほどフレームレートの低くなることです。

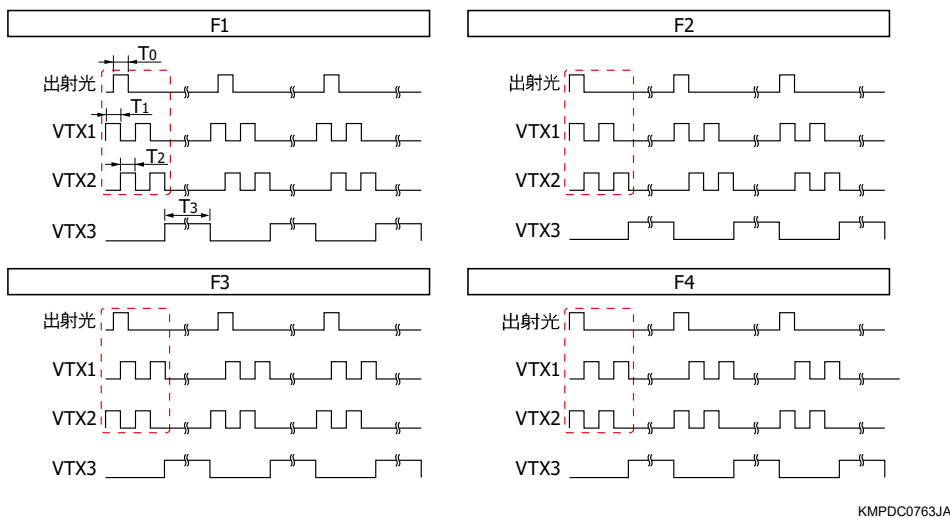
[図 3-15] 非破壊読み出しの概念図



3-6. 駆動タイミング

理想的には F1 と F2 のゲート駆動タイミングで距離測定が可能です。しかし Vout1、Vout2 には固有のばらつき成分 Verr が存在して差信号にも Verr が残ってしまい、正確に距離を算出できません。そのため F1、F2 の VTX1、VTX2 のタイミングを入れ替えた F3、F4 も用いて Verr を除去して距離を算出します [図 3-16]。

[図 3-16] タイミングチャート



F1 の VTX1 と VTX2 のタイミングを入れ替えたものが F3 で、理想的には $Vout1(F1)=Vout2(F3)$ 、 $Vout2(F1)=Vout1(F3)$ となります。Vout1、Vout2 に固有のばらつき成分 Verr1、Verr2 が存在すると、 $\Delta Vout(F1)$ は式(3-14)で表され、 $\Delta Vout(F3)$ は式(3-15)で表されます。

$$\Delta Vout(F1) = \{Vout2(F1) + Verr2\} - \{Vout1(F1) + Verr1\} \quad \cdots(3-14)$$

$$\Delta Vout(F3) = \{Vout2(F3) + Verr2\} - \{Vout1(F3) + Verr1\} \quad \cdots(3-15)$$

$Vout1(F1)=Vout2(F3)$ 、 $Vout2(F1)=Vout1(F3)$ のため、式(3-14)から式(3-15)を減算すると式(3-16)となります。F3 も用いることによって Verr1、Verr2 を除去できます。

$$\begin{aligned} & \Delta Vout(F1) - \Delta Vout(F3) \\ &= [\{Vout2(F1) + Verr2\} - \{Vout1(F1) + Verr1\}] - [\{Vout2(F3) + Verr2\} - \{Vout1(F3) + Verr1\}] \\ &= 2\{Vout2(F1) - Vout1(F1)\} \quad \cdots (3-16) \end{aligned}$$

F2 の VTX1 と VTX2 のタイミングを入れ替えたものが F4 です。F2 とともに F4 を用いることによって、Verr1、Verr2 を除去できます [式(3-17)]。

$$\begin{aligned}
 & \Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4) \\
 &= [\{V_{out2}(F2) + V_{err2}\} - \{V_{out1}(F2) + V_{err1}\}] - [\{V_{out2}(F4) + V_{err2}\} - \{V_{out1}(F4) + V_{err1}\}] \\
 &= 2\{V_{out2}(F2) - V_{out1}(F2)\} \quad \dots (3-17)
 \end{aligned}$$

式(3-18)(3-19)は、ゲート駆動タイミング F1～F4 を用いた距離算出式です。

(1) $\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)$ が正の場合

$$\begin{aligned}
 D &= [\{(\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)) / 4\} / \{|\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)| + |\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)|\} + 1/4] \times CT_0 \\
 &= [\{\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)\} / \{|\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)| + |\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)|\} + 1] \times CT_0 / 4 \\
 &\quad \dots(3-18)
 \end{aligned}$$

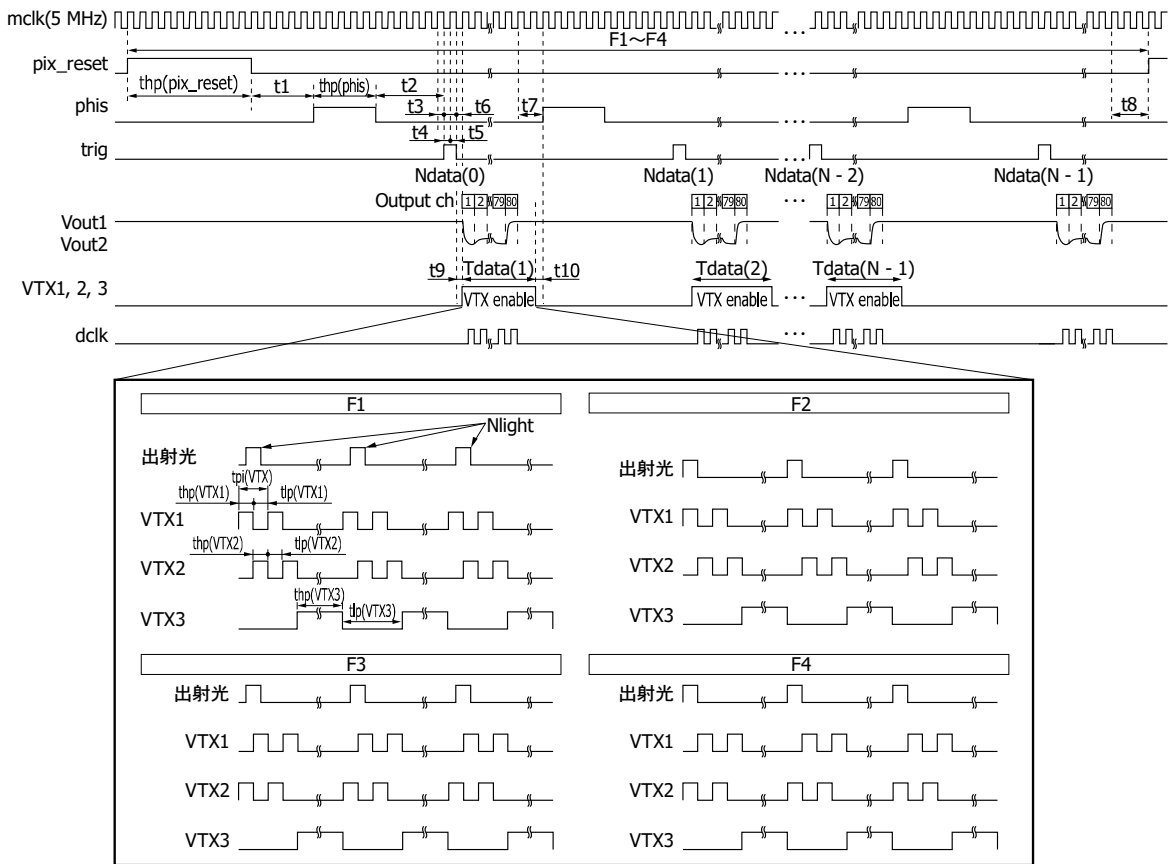
(2) $\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)$ が負の場合

$$\begin{aligned}
 D &= [\{-\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)\} / \{|\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)| + |\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)|\} + 3/4] \times CT_0 \\
 &= [-\{\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)\} / \{|\Delta V_{out}(F1) - \Delta V_{out}(F3)| + |\Delta V_{out}(F2) - \Delta V_{out}(F4)|\} + 3] \times CT_0 / 4 \\
 &\quad \dots (3-19)
 \end{aligned}$$

3-7. タイミングチャート

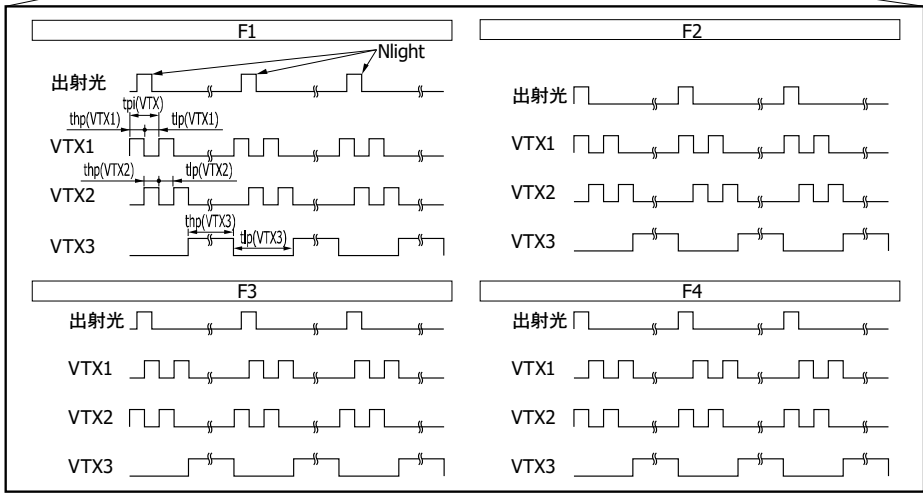
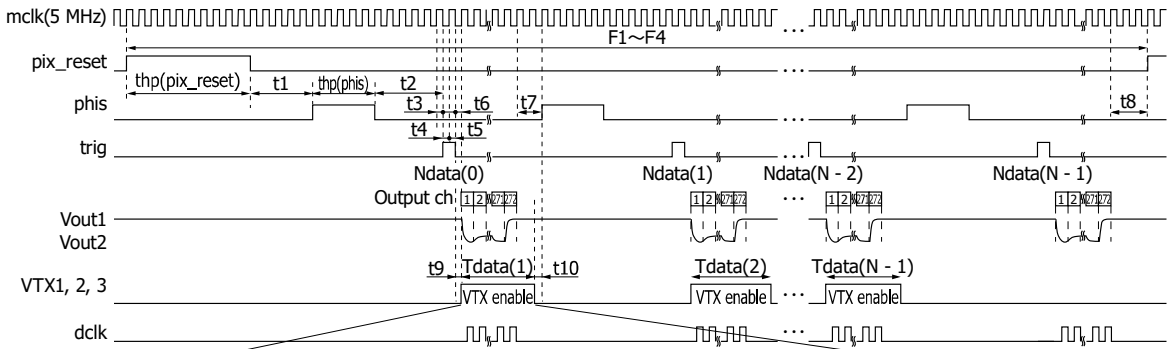
信号読み出しをしたときのタイミングチャートを図 3-17 に示します。1 回、距離を演算するとき、異なるゲートタイミングで読み出しは 4 回、行われます。F3、F4 は F1、F2 の VTX1、VTX2 のタイミングを入れ替えたゲート駆動タイミングです。

【図 3-17】 タイミングチャート
(a) リニアイメージセンサ (S15452-01WT)



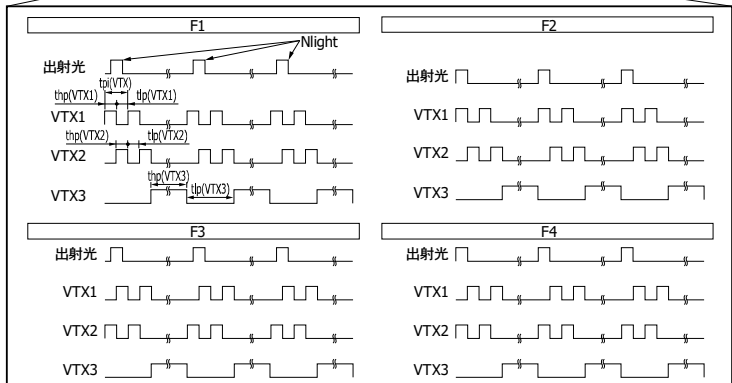
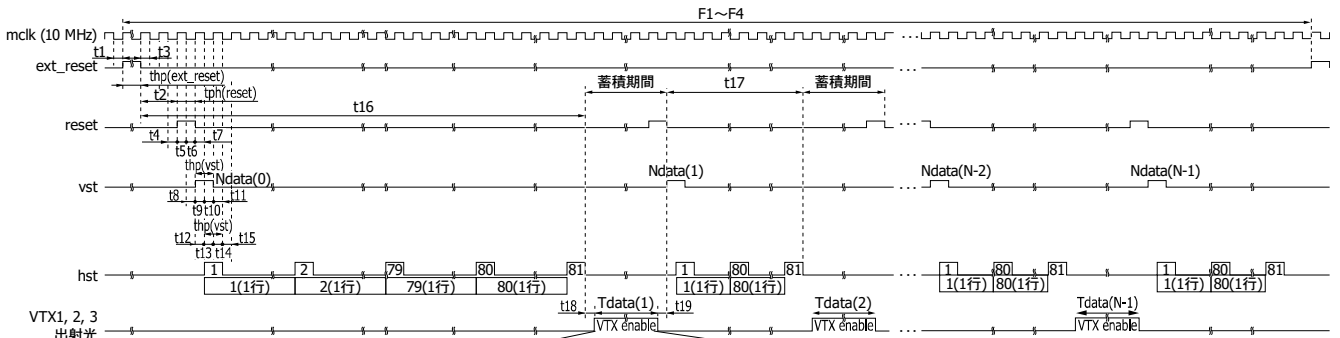
KMPDC0739JB

(b) リニアイメージセンサ (S15453-01WT)



KMPDC0743JB

(c) エリアイメージセンサ (S15454-01WT)



KMPDC0745JA

3-8. フレームレートの算出方法

$$\begin{aligned} \text{フレームレート} &= 1/(\text{4 サブフレームの時間}) \\ &= 1/(\{\text{蓄積時間} + \text{読み出し時間}\} \times 4) \quad \dots(3-20) \end{aligned}$$

必要とされる距離精度、外乱光などの使用環境によって蓄積時間の設定を変える必要があります。

[リニアイメージセンサ (S15453-01WT)]

$$\begin{aligned} \text{読み出し時間} &= \frac{1}{\text{クロックパルス周波数}} \times \text{水平画素数} \\ &= 1 \text{ クロック当たりの時間 (1 画素の読み出し時間)} \times \text{水平画素数} \dots (3-21) \end{aligned}$$

読み出し時間の算出例 (クロックパルス周波数=5 MHz, 水平画素数=272)

$$\begin{aligned} \text{読み出し時間} &= \frac{1}{5 \times 10^6 [\text{Hz}]} \times 272 \\ &= 200 [\text{ns}] \times 272 \\ &= 0.0544 [\text{ms}] \quad \dots(3-22) \end{aligned}$$

非破壊読み出しを行う場合:

$$1 \text{ サブフレームの時間} = \text{蓄積時間} + (\text{読み出し時間} \times \text{非破壊読み出し回数}) \dots (3-23)$$

[エリアイメージセンサ (S15454-01WT)]

$$\begin{aligned} \text{読み出し時間} &= \frac{1}{\text{クロックパルス周波数}} \times \text{水平タイミングクロック数} \times \text{垂直画素数} \\ &= 1 \text{ クロック当たりの時間 (1 画素の読み出し時間)} \times \text{水平タイミングクロック数} \times \text{垂直画素数} \\ &\quad \dots (3-24) \end{aligned}$$

読み出し時間の算出例 (クロックパルス周波数=10 MHz, 水平タイミングクロック数=141, 垂直画素数=80)

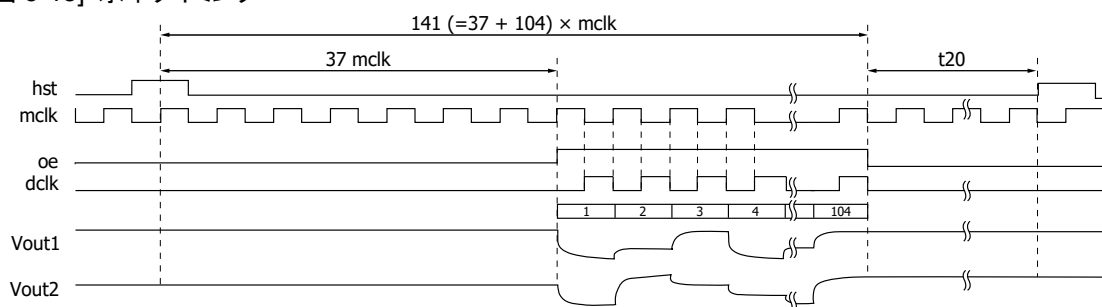
$$\begin{aligned} \text{読み出し時間} &= \frac{1}{10 \times 10^6 [\text{Hz}]} \times 141 \times 80 \\ &= 100 [\text{ns}] \times 141 \times 80 \\ &= 1.128 [\text{ms}] \end{aligned}$$

非破壊読み出しを行う場合:

$$1 \text{ サブフレームの時間} = \text{蓄積時間} + (\text{読み出し時間} \times \text{非破壊読み出し回数}) \dots (3-25)$$

リセットレベル読み出しを行わずに蓄積信号読み出しを行うことができます。この場合、ランダムノイズの増加や、受光部の感度不均一性の劣化が発生します。

[図 3-18] 水平タイミング



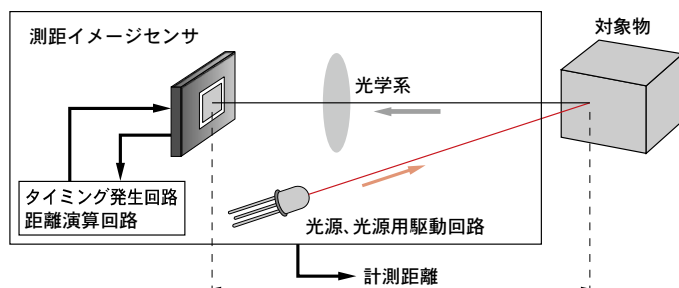
KMPDC0747EC

4. 使い方

4-1. 構成例

測距イメージセンサを使用した距離計測システムの構成例を図 4-1 に示します。測距イメージセンサ、光源および光源用駆動回路、投／受光の光学系、タイミング発生回路、距離演算回路から構成されています。距離精度は、光源の発光量や投／受光の光学系に大きく依存します。

[図 4-1] 距離計測システムの構成例



KMPDC0473JB

4-2. 光源の選択

測距イメージセンサを使用して距離計測を行う場合、測距イメージセンサの電荷転送クロックのパルス幅に合わせた光源 (LED またはパルスレーザダイオード) を選択する必要があります。また、電荷転送クロックのパルス幅および発光パルス幅を距離に応じて設定する必要があります。なお、光源には上昇／下降時間 10 ns 程度以下の応答性が必要です。測距リニアイメージセンサ S15452-01WT・S15453-01WT を使用する場合はライン状に、測距エリアイメージセンサ S15454-01WT を使用する場合はエリア状に光源を照射するため、大きな出力パワーが必要です。そのために光源を複数個配列する場合があります。光源を複数個配列する場合、複数光源を高速・高出力でドライブするための駆動回路も必要です。

5. キャリブレーション

測距イメージセンサと光源を組み合わせた後に、距離のキャリブレーションが必要です。キャリブレーションが必要な理由を以下に示します。

[キャリブレーションが必要な理由]

- ・光源の発光タイミングの遅延
- ・センサー光源間の配線による遅延
- ・光源の発光パルスの形状
- ・周辺回路

キャリブレーション方法の例を示します。

距離 D は式(5-1)(5-2)によって算出されます。

(1) $T_d \leq T_0$ の場合

$$D = \alpha \left(\frac{V_{outB}}{|V_{outA}| + |V_{outB}|} + 1 \right) \times \frac{cT_0}{4} - Dofs \quad \dots (5-1)$$

(2) $T_0 < T_d \leq 2T_0$ の場合

$$D = \alpha \left(\frac{-V_{outB}}{|V_{outA}| + |V_{outB}|} + 3 \right) \times \frac{cT_0}{4} - Dofs \quad \dots (5-2)$$

α : 傾き

c : 光速

T_0 : 発光パルス幅

Dofs: 距離オフセット

発光タイミング遅延 Light_pulse_delay、距離オフセット Dofs、傾き α を設定する必要があります。

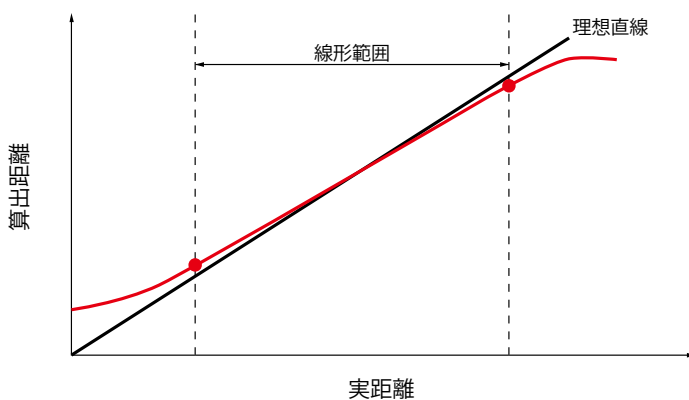
発光タイミング遅延、距離オフセット Dofs の設定

発光タイミング遅延と距離オフセットを変えることで、算出距離をシフトさせて算出距離と実距離と一致させます。

傾き α の設定

距離の線形範囲の 2 点を選択して、理想直線と同じになるように α を算出します [図 5-1]。

[図 5-1] 算出距離—実距離



KMPDC0643JA

6. 入射光量の算出

測距イメージセンサを用いたカメラモジュールを製作する場合、センサを最大限に生かすために、使用条件に合わせてパラメータを設定する必要があります。たとえば、太陽光が強い屋外では、画素の飽和を避けるために蓄積時間を短くしたり、バンドパスフィルタを使い太陽光の入射を抑えたりするなどの対策が必要です。

蓄積時間をどこまで短くすればよいか、どの程度まで太陽光を弱めるバンドパスフィルタが適しているかは、使用条件によって異なります。そこで、カメラモジュールの構成をモデル化して、簡易的に1画素当たりの入射光量（信号光、外乱光）を計算する式を用意しました。カメラモジュールの設計時に、ご利用ください。

カメラモジュールのパラメータ

測距イメージセンサを用いたカメラモジュールの主なパラメータを以下に示します。また、概念図を図 6-1 に示します。

光源からの光は、レンズによって画角 (θ_H , θ_V)で長方形に整形されてセンサに照射されるものとします。

(1) 対象物

- ・対象物までの距離 L [m]
- ・対象物の反射率 R [%]

(2) 投光部

- ・光源出力 P [W/sr]
- ・投光効率 EP [%]
- ・デューティ比 $duty$
- ・蓄積時間 $Tacc$ [s]
- ・発光素子の半値角 θ_{source} [°]
- ・投光角度 (水平, 垂直) θ_H, θ_V [°]

(3) 外乱光

- ・太陽光強度 $Pamb$ [W/m^2]
- ・バンドパスフィルタの透過波長範囲 (短波長側, 長波長側) $\lambda_{short}, \lambda_{long}$ [nm]

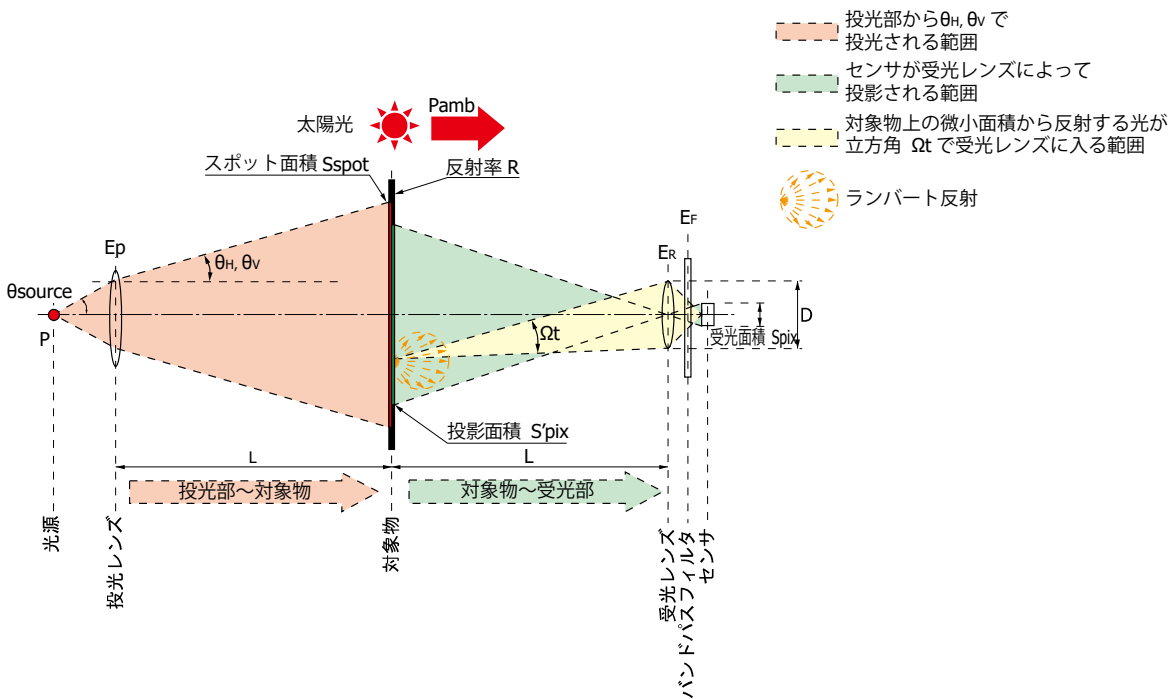
(4) 受光部

- ・受光レンズ効率 ER [%]
- ・バンドパスフィルタの信号光に対する透過率 EF [%]
- ・受光レンズ F 値
- ・受光レンズ焦点距離 f [m]

(5) 測距イメージセンサ

- ・画素サイズ (水平, 垂直) H_{pix}, V_{pix} [m] (面積 S_{pix})
- ・開口率 FF [%]
- ・受光感度 S_{sens} [A/W]
- ・画素容量 C_{fd} [F]
- ・ランダムノイズ RN [V]
- ・暗出力 V_D [V/s]

[図 6-1] 測距イメージセンサ内蔵のカメラモジュールの概念図



KMPDC0641JA

計算方法

まず、対象物上のスポット光量 P_{spot} [W/m²]を計算します [式(6-1)]。

$$P_{spot} = P \times \frac{A}{L^2} \times E_p \times \frac{1}{S_{spot}} \quad \dots(6-1)$$

P: 光源の出力 [W/sr]

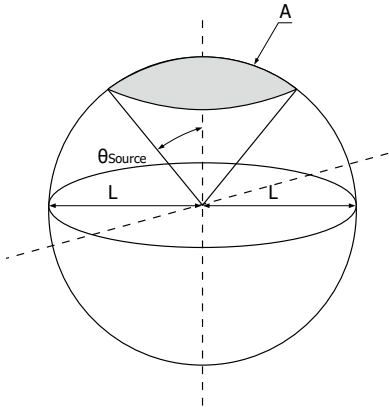
A: 半径 L の球において角度 θ_{source} で切り取った球面上の面積

$\frac{A}{L^2}$: 投光の立体角 [sr]

E_p : 投光効率 [%]

S_{spot} : 対象物上に照射されたスポット光の面積 [m²]

[図 6-2] 球面上の面積 A



KMPDC0650JA

Sspot は式 (6-2)で表されます。

$$S_{\text{spot}} = 2L \tan \theta_H \times 2L \tan \theta_V \cdots (6-2)$$

A は、式 (6-3)で表されます。

$$A = 2\pi \{1 - \cos(\theta_{\text{source}})\} \times L^2 \cdots (6-3)$$

次に、対象物上の微小面積における反射光のうちで、受光レンズに入射する角度を計算します。受光レンズの直径を D [m]とすると、対象物上のある点と受光レンズの端がなす角度 θ_R は式(6-4)で表されます。

$$\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{D}{2L}\right) \cdots (6-4)$$

θ_R を使うと、立体角 Ω_t [単位: sr]は式(6-5)で表されます。

$$\Omega_t = 4\pi \sin^2 \frac{\theta_R}{2} \cdots (6-5)$$

θ_R は、対象物上の位置によって異なりますが、ここでは一定の値に近似しています。対象物から全方向に拡散した反射光のうちで、 Ω_t の割合がレンズに入射するものとします。

測距イメージセンサが反射光を取り入れることができる対象物上の領域は、受光レンズを通して対象物に映し出される画素の投影面に当たります。画素面積 S_{pix} と対象物上の画素の投影面積 S'_{pix} は、式(6-6)の関係にあります。

$$S'_{\text{pix}} = \left(\frac{L}{f}\right)^2 S_{\text{pix}} \cdots (6-6)$$

信号光・外乱光が対象物に当たって反射し、レンズを通して1画素に入射する光量を求めます。計算の簡略化のため、対象物は完全拡散面とします。入射光量を I [W] とすると反射光量は、点光源の場合は I/π [W/sr]、太陽光のような非常に広い面光源の場合は I [W/sr] となります。1画素に入射する信号光量 P_{pix} [W] は、式(6-7)で表されます。

$$P_{\text{pix}} = P_{\text{spot}} \times R \times \frac{1}{\pi} \times \Omega t \times S'_{\text{pix}} \times E_R \times E_F(\text{sig}) \times FF \quad \dots(6-7)$$

1画素に入射する外乱光量 $P_{\text{pix(amb)}}$ [W] は、式(6-8)で表されます。

$$P_{\text{pix(amb)}} = P_{\text{amp}} \times R \times 1 \times \Omega t \times S'_{\text{pix}} \times E_R \times E_F(\text{amb}) \times FF \quad \dots(6-8)$$

$E_F(\text{sig})$: 信号光に対するバンドパスフィルタの透過率

$E_F(\text{amb})$: 外乱光に対するバンドパスフィルタの透過率

信号光による出力電圧 V_{pix} [V] は、式(6-9)で表されます。

$$V_{\text{pix}} = P_{\text{pix}} \times T_{\text{acc}} \times \text{duty} \times (S_{\text{sens}}/C_{\text{fd}}) \quad \dots(6-9)$$

T_{acc} : 蓄積時間 [s]

duty : デューティ比

S_{sens} : 受光感度 [A/W]

C_{fd} : 画素容量 [F]

外乱光による出力電圧 $V_{\text{pix(amb)}}$ [V] は、式(6-10)で表されます。2回のゲート駆動タイミングのそれぞれにおいて外乱光が入射するため、 $V_{\text{pix(amb)}}$ を2倍します。

$$V_{\text{pix(amb)}} = P_{\text{pix(amb)}} \times T_{\text{acc}} \times \text{duty} \times (S_{\text{sens}}/C_{\text{fd}}) \times 2 \quad \dots(6-10)$$

距離精度

上記によって求められた1画素に入射する信号光と外乱光の光量を用いて、カメラモジュールの距離精度を計算します。信号光により発生する1画素当たりの光電流 I_{pix} [A] は、式(6-11)で表されます。

$$I_{\text{pix}} = P_{\text{pix}} \times S_{\text{sens}} \quad \dots(6-11)$$

信号光により発生する1画素当たりの電子数 Q_{pix} [e] は、式(6-12)で表されます。

$$\begin{aligned} Q_{\text{pix}} &= I_{\text{pix}} \times T_{\text{acc}} \times \text{duty}/e \quad \dots(6-12) \\ &= P_{\text{pix}} \times S_{\text{sens}} \times T_{\text{acc}} \times \text{duty}/e \end{aligned}$$

e : 電気素量 = 1.602×10^{-19} [C]

外乱光により発生する1画素当たりの電子数 $Q_{\text{pix(amb)}}$ [e] は、上記と同様に式(6-13)で表されます。

$$Q_{\text{pix(amb)}} = P_{\text{pix(amb)}} \times S_{\text{sens}} \times T_{\text{acc}} \times \text{duty}/e \times 2 \quad \dots(6-13)$$

次にノイズ成分について説明します。光ショットノイズ N_L 、ランダムノイズ N_R 、暗電流ショットノイズ N_D の大きさは、それぞれ以下の式で表されます [単位: e]。

$$N_L = \sqrt{Q_{\text{pix}} + Q_{\text{pix}}(\text{amb})} \quad \dots(6-14)$$

$$N_R = 2 \times R_N \times C_{\text{fd}}/e \quad \dots(6-15)$$

RN: ランダムノイズ [V]

$$N_D = \sqrt{2 \times V_D \times T_{\text{acc}} \times C_{\text{fd}}/e} \quad \dots(6-16)$$

VD: 暗出力 [V/s]

トータルノイズ N [e]は式(6-17)で表されます。

$$N = \sqrt{N_L^2 + N_R^2 + N_D^2} \quad \dots(6-17)$$

信号電子数 Q_{pix} と N の比が S/N になります。

距離精度 σ [m]は式(6-18)で表されます。

$$\sigma = \frac{N}{Q_{\text{pix}}} \times \frac{cT_0}{2} \quad \dots(6-18)$$

c: 光速

T₀: 発光パルス幅

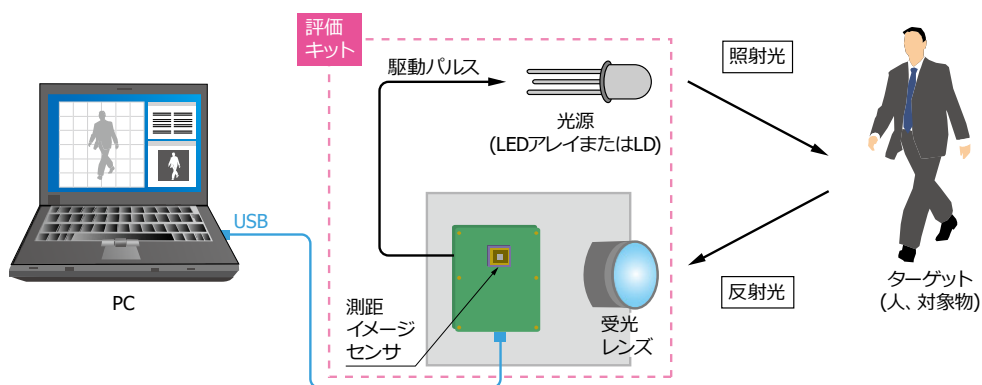
距離精度を向上させるためには入射信号量を増加させることが効果的です。また、温度が上がると暗電流ショットノイズが大きくなり距離精度が悪化しますので、測距イメージセンサの放熱設計に配慮する必要があります。

7. 評価キット

測距イメージセンサ用の評価キットを利用した構成例を図 7-1 に示します。この評価キットにおいては、FPGA によりセンサ駆動タイミング、DAC-IC によりセンサ用バイアス電圧が生成され、センサの出力信号を A/D 変換して USB 3.0 を経由して PC ヘデータを転送することができます。なお、電源電圧 5 V のみで駆動が可能です。

当社は S15452-01WT、S15453-01WT、S15454-01WT 用の評価キット (LED アレイ・受光レンズ付き)を用意しています。

[図 7-1] 評価キットを用いた距離計測の構成例



KMPDC0417JC

[図 7-2] 評価キットの例

(a) リニアイメージセンサ用



(b) エリアイメージセンサ用

