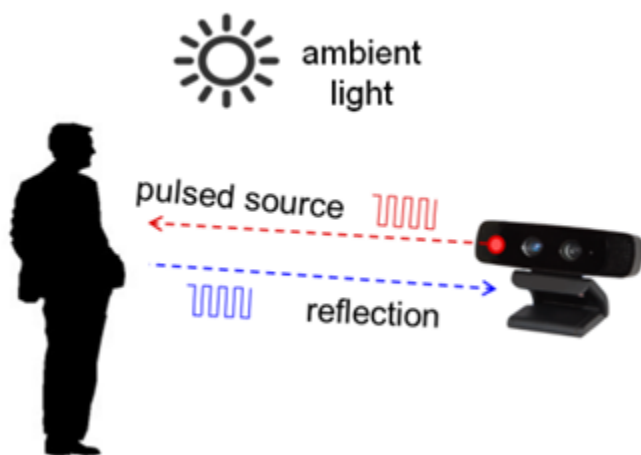


TOF--TOF相機技術原理深入解析與分享 - IT閱讀

其他 · 發表 2018-10-06

脈沖 ado info style 測量 分享圖片 lan 設定 不同

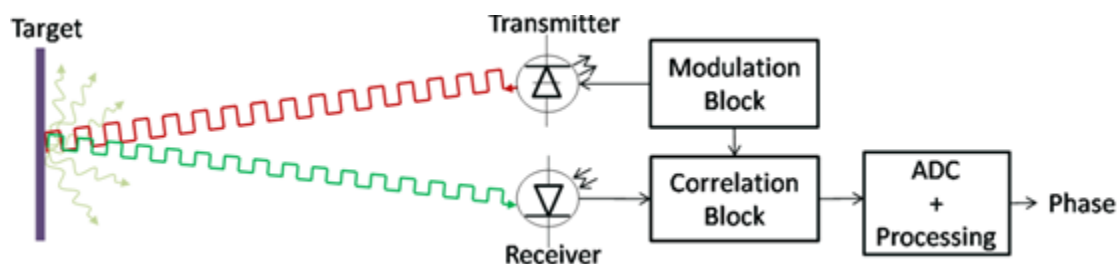
TOF介紹



TOF, 即time of flight, 直譯過來就是飛行時間。TOF的原理與他的名稱對應, 即, 測量光在空間中飛行的時間, 通過換算成距離, 就可以測得攝像頭與物體的距離。通常, TOF攝像頭組成有一個發射模塊, 一個接收模塊。發射模塊可以是LED、激光等發射元件, 它將發射例如850nm的調制紅外光, 物體經過反射後, 由接收模塊接收到反射的紅外光。由於發射和接收的都是調制波, TOF攝像頭可以計算發射和接收的相位差, 通過換算得到深度值, 即攝像頭與物體的深度距離。

TOF-單點測距原理

一個簡易的單點TOF系統組成如下圖：



它由一個發射二極管、接收二極管、調制模塊, 解調模塊、處理器幾部分組成。調制模塊負責調制發射的紅外調制波, 通過發射二極管將信號發射出去; 解調模塊負責對接受二極管接收到的反射紅外波解調; 處理器中包含ADC和數據處理, ADC是為了將

模擬信號轉化為數字信號，具體是什麼模擬信號下文將會詳細講述；數據處理為了將測得的相位差換算成深度信息。

TOF-多點測距原理

目前，一個完整的TOF系統組成如下圖：

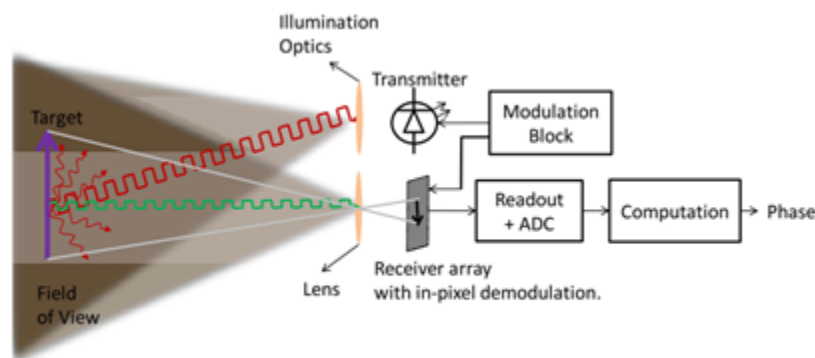


Figure 2-2. ToF Camera

它和傳統RGB攝像頭的組成結構基本相似。

它與點單的TOF系統比較區別在於，測量範圍不是一個點，它是一個面，因此，接收模塊變成了點陣的光敏傳感器，通常使用的是CMOS傳感器；在傳感器前面、和發射二極管前面多了光學鏡片，一個是為了紅外波的輻射範圍、一個是為了濾除850nm以外的光線，就是說，要保證進入傳感器的光線只是850nm的，這樣才能保證測量的準確度。

因為相位差即代表物體的與攝像頭的距離，即深度，由於每個點的相位差不同，所以才能組成有關物體整幅深度圖像。

TOF傳感器工作原理

目前，TOF傳感器工作原理中主要有兩種，基於脈沖波（pulse base）的技術原理、基於連

續調制波（CW）的技術原理。

在這之前，需要知道解調模塊是如何工作的，如何讀取感光傳感器上面的電荷量。以單點像素的讀取測量為例：

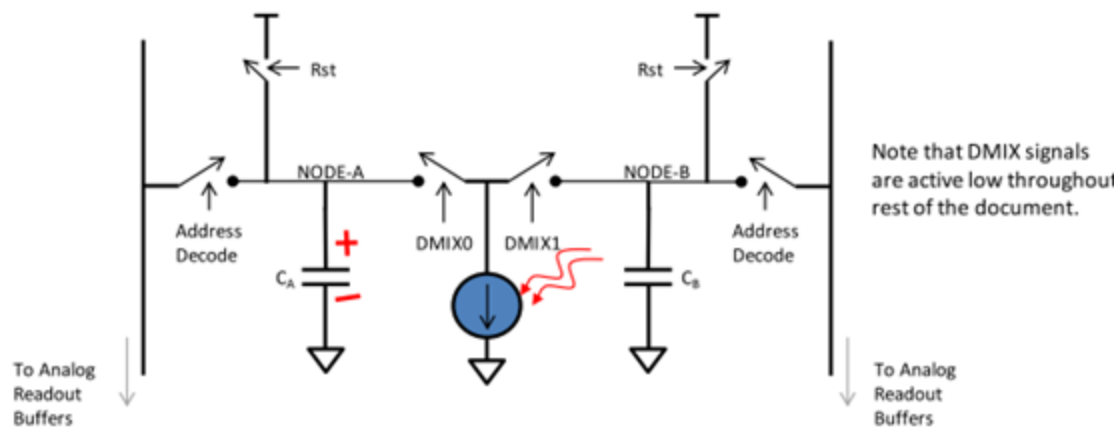


Figure 3-1. Simplest Pixel Form

整個讀取測量過程主要分為4個步驟：



分別是，Reset;Integration;Readout;Deadtime

Reset：在上圖中看到，Rst開關，在測量電荷量之前，需要將Rst開關閉合，讓電容CA與CB充電，充好點之後斷開。

Integration：Integration period, DMIX0和DMIX1是由解調模塊控制的開關，什麼時候開關，與調制和解調的頻率有關。當光子被感光元件(藍色圓圈箭頭)接收時，並且當DMIX0閉合時，這時候，充好電的電容CA就會和感光元件釋放出來的電子中和，電容CA放電，直到中和完畢，最後得到的電容電平代表著接受光子數量和時間的電平。

Readout：中和完畢之後，Address Decode 開關打開，讀取電容上的電平。

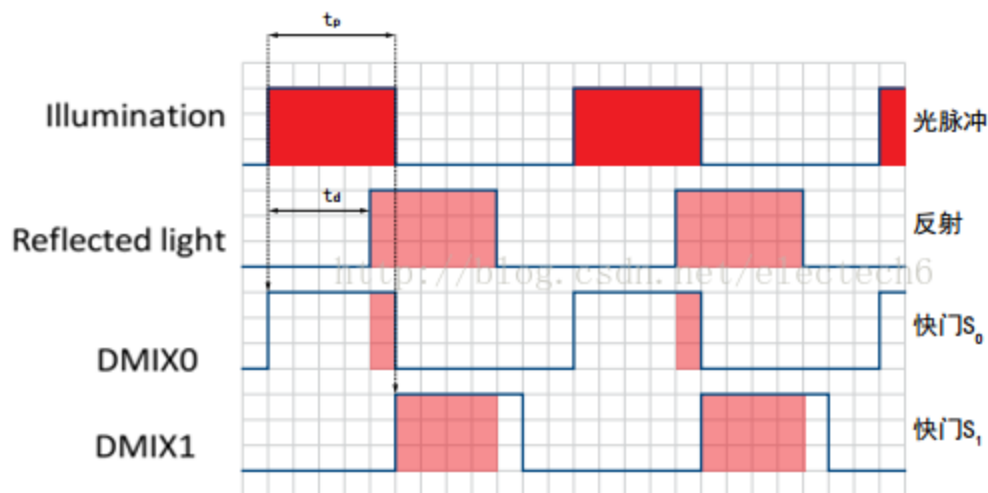
Deadtime：死區時間

從以上四個環節來看，Integration Time 是最重要的。

關於，為什麼還會有DMIX1，下面將會解釋到。

基於脈沖波（paulse base）的技術原理

發射模塊發射矩形脈沖波，物體發射後具有相位差的脈沖波，測量相位差的方法如下圖：



發射脈沖可以設定一個頻率 f ，並且開啟兩個反向的窗口，DMIX0與DMIX1用來接收光子的數量，一個窗口的頻率和相位是與發射脈沖是一致的，另外一個是與DMIX1反向，並且相位差為 180° 。

在兩個窗口打開的時候，也就是高電平的時候，並且這時候存在物體反射過來的脈沖波，這時候兩個不同窗口在各自的時間內收集電荷。在圖上已經用紅色上色表示。假設DMIX0收集到的電荷量為 Q_0 ，DMIX1收集到的電荷量為 Q_1 。 Q_0 與 Q_1 相加的這部分就是有反射脈沖時間內收集的電荷量。

t_d 表示相位差存在的時間，為了計算 t_d ，可以通過計算 Q_1 在反射脈沖所占的時間，為了計算 Q_1 這部分的時間，我們可以讀取DMIX0與DMIX1窗口上的電平，也就是 Q_0 加 Q_1 與 Q_1 的比值，再乘上發射電平高電平的時間。因此，可以通過式子計算相位差 d ：

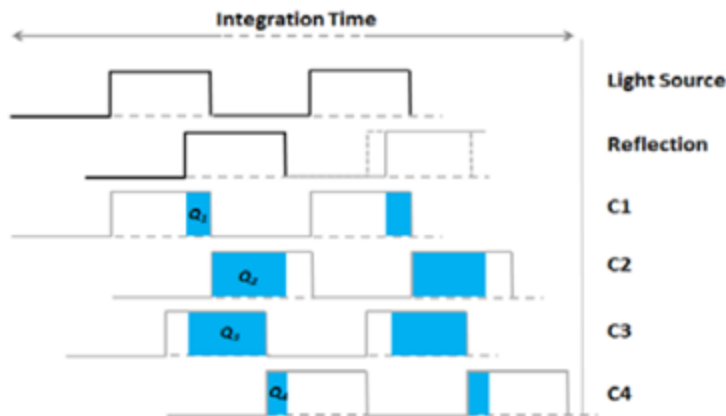
$$d = \frac{1}{2} C t_p \frac{Q_1}{Q_0 + Q_1}$$

d 相位差， C - 光速 t_p 發射脈沖高電平。

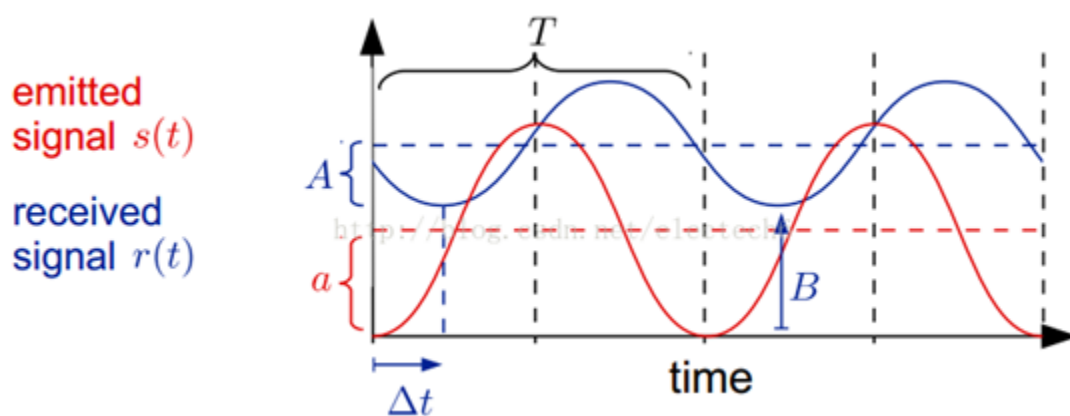
註：以上的整個過程稱為IntegrationTime

基於連續調制波（CW）的技術原理

連續調制波在脈沖波的基礎上而來，連續調制波通常是連續正弦波調制，與脈沖不同的是，連續調制波開啟了4個窗口分別是C1-C4.如下圖所示。



由於連續調制波通常是連續正弦波調制，可以將調制波看成是正弦波如下圖所示。



連續正弦波調制測量方法，推導過程如下。序號1-9對應下圖的公式1-8。

1. 假設發射的正弦信號 $s(t)$ 振幅是 a ，調制頻率是 f
2. 經過時延 Δt 後接收到的信號為接收 $r(t)$ ，衰減後的振幅為 A ，強度偏移（由環境光引起）為 B
3. 四個採樣時間間隔相等，均為 $T/4$
4. 根據上述採樣時間可以列出四個方程組
5. 從而可以計算出發射和接收的正弦信號的相位偏移 $\Delta\phi$
6. 據此可以根據（6）中公式計算物體和深度相機的距離 d
7. 接收信號的衰減後的振幅 A 的計算結果
8. 接收信號強度偏移 B 的計算結果，反映了環境光

$$\textcircled{1} s(t) = a \cdot (1 + \sin(2\pi ft))$$

$$\begin{aligned}\textcircled{2} r(t) &= A \cdot (1 + \sin(2\pi f(t - \Delta t))) + B \\ &= A \cdot (1 + \sin(2\pi ft - \Delta\varphi)) + B\end{aligned}$$

$$\textcircled{3} t_0 = 0, t_1 = \frac{1}{4}T, t_2 = \frac{1}{2}T, t_3 = \frac{3}{4}T$$

$$\textcircled{4} r_i = r(t_i) = A \cdot \sin(\underbrace{2\pi f(t_i - \Delta t)}_{\frac{i\pi}{2} - \Delta\varphi}) + (A + B), i = 0, \dots, 3$$

<http://blog.csdn.net/electech6>

$$\textcircled{5} \Delta\varphi = 2\pi f\Delta t = \text{atan2}(r_2 - r_0, r_1 - r_3)$$

$$\textcircled{6} d = \frac{c}{4\pi f} \Delta\varphi$$

$$\textcircled{7} A = \frac{1}{2} \sqrt{(r_0 - r_2)^2 + (r_1 - r_3)^2}$$

$$\textcircled{8} B = \frac{1}{4}(r_0 + r_1 + r_2 + r_3) - A$$

更加詳細的推導過程如下：

Handwritten derivation of the phase difference $\Delta\varphi$ and distance d from TOF measurements:

$$\begin{aligned}r_2 - r_0 &= A \sin(\pi - \Delta\varphi) - A \sin(-\Delta\varphi) \\ &= A(\sin \Delta\varphi + \sin \Delta\varphi) \\ &= 2A \sin \Delta\varphi \\ r_1 - r_3 &= A(\sin(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi) - \sin(\frac{3\pi}{2} - \Delta\varphi)) \\ &= 2A \cos \Delta\varphi\end{aligned}$$

設 $Q = r_2 - r_0$; $I = r_1 - r_3$

轉座坐标系:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right) = 2\pi f \Delta t$$

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} = \frac{c}{4\pi f} \Delta\varphi$$

其實兩種基於不同原理的計算相位的方法差不多，連續調制波相對複雜。關於如何推到，更多的是數學的部分，最後計算 d 公式中，其實表示的含義是一樣的，只是符號不同罷了。

兩種基於不同測量方法的優缺點分析

基於脈沖波（pulse base）的技術原理

優點：

1. 因為不用計算振幅和環境光，測量方法簡單，響應較快，可以提高相機的幀率

缺點：

1. 由於沒有抵消環境光對測量的影響，所以將會受到環境光的影響
2. 相對於CW的方案，測量精度較低，但也不會低到離譜

基於連續調制波（CW）的技術原理

優點：

1. 相位偏移（公式5）中的 $(r_2 - r_0)$ 和 $(r_1 - r_3)$ 相對於脈沖調試法消除了由於測量器件或者環境光引起的固定偏差。連續調制波使用多個測量窗口， $(Q_3 - Q_4)$ 及 $(Q_1 - Q_2)$ 可以減掉測量中的共同成分（復位電壓，環境光，電容增益等）及其中的偏差。
2. 可以根據接收信號的振幅A和強度偏移B來間接的估算深度測量結果的精確程度（方差）。
3. 不要求光源必須是短時高強度脈沖，可以采用不同類型的光源，運用不同的調制方法

缺點：

1. 需要多次採樣，測量時間較長，限制了相機的幀率
2. 因為采集和計算量大，導致在相同成本的產品中，深度分辨率降低

參考文獻：

1. <https://blog.csdn.net/electech6/article/details/78349107>
2. TI documents

TOF--TOF相機技術原理深入解析與分享