

嵌入式自動化影像感測器訊雜比量測系統

Embedded Automatic Image Signal-to-Noise Ratio Measurement System

陳建宏、許家偉、林育全、廖泰杉

Chien-Hung Chen, Chia-Wei Hsu, Yu-Chuan Lin, Tai-Shan Liao

國研院儀器科技研究中心開發一套嵌入式自動化影像感測器訊雜比量測系統，其特點為整合嵌入式系統並可客製化設計使用者所需之影像感測器參數。嵌入式自動化影像感測器參數量測系統包括了 NI CompactRIO 嵌入式系統、積分球參數控制與光源訊號回饋顯示。NI CompactRIO 嵌入式系統可以達到獨立執行效能，並可自動控制積分球參數控制，其中包含了光源大小與入光量控制，另外也可自動回饋光源資料。透過本系統可以輕易的量測到影像感測器資料並計算出影像像素訊雜比參數，文中詳細指出相關系統設計與量測情形，以提供國內相關領域的整合與應用。

The automatic signal-to-noise ratio (SNR) measurement system was carried out in this research. The embedded system and customized design were also integrated in this system. The automatic SNR measurement system consists of a NI CompactRIO Embedded system, parameters of integrating board control, a light source feedback and a data display. The NI CompactRIO embedded system can control and measure several parameters which include light source, image data, as well as SNR data. The article also introduces the system structure, design, and measurement results that we hope providing those information for more applications in related industries.

一、前言

嵌入式技術已是現代電子系統主要發展方向之一，隨著資訊科技的發展，各項資訊科技產品逐漸微型化且隨處可用，並且整合各式 3C 商品，對嵌入式系統的需求及要求越來越多。嵌入式系統是將某種系統內嵌入實體商品，如手機、PDA、數位相框、資訊家電、GPS 導航裝置、遊樂器、先進醫

療器材等，應用領域廣泛，這類系統的特性是沒有外接的零配件，具有特定的功能、容積小、穩定性強等特點。相同的，儀器架設或設計也可透過嵌入式系統來實現，因此本研究也採用嵌入式系統作為主要控制核心，並發展出自動化 CMOS 影像感測器參數量測系統。

影像感測器之參數為使用者或應用者在選擇時最主要的依據數據，其中包含了像素穩定度 (pixel

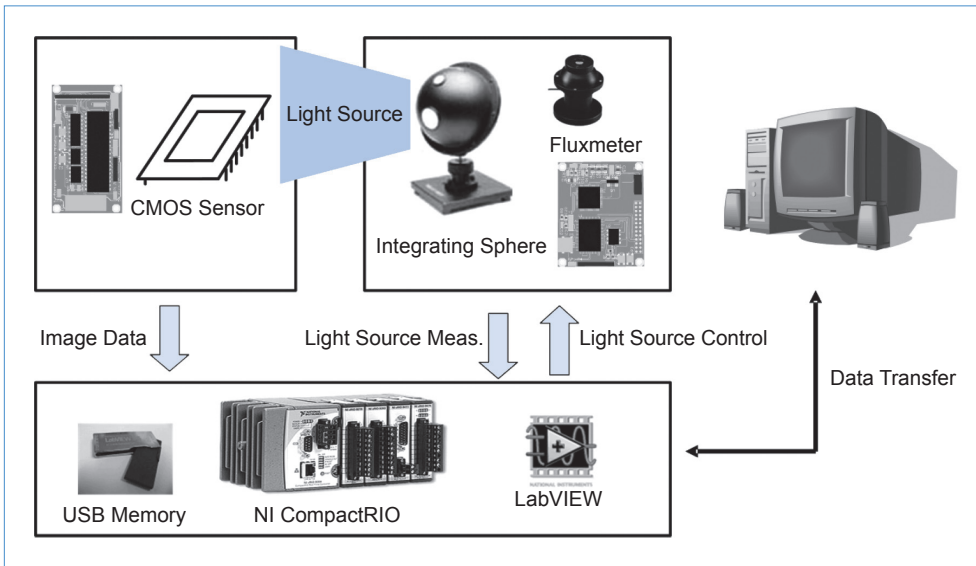


圖 1. 系統架構圖。

stability)、像素線性度 (pixel linearity)、暗電流輸出 (dark current)、雜訊浮動量 (noise floor)、訊雜比 (signal to noise ratio, SNR) 與電源耗電量 (power consumption) 等參數⁽¹⁾，這些參數在設計時與半導體製程中已經被固定，而之後需要將其參數量化以提供後續使用。量化這些參數的過程需要做一連串的實驗設計與計算，如像素穩定度的量測，需要對同一像素做反覆性的實驗^(2, 3)，訊雜比的量測就需要大量的資料並做數學上的計算⁽⁴⁻⁶⁾，或是在暗電流輸出量測，也需要相關的量測系統與裝置⁽⁷⁻¹⁰⁾。此次研究就是針對這些實驗流程做自動化設計與精簡化，並整合成嵌入系統，以達到加快實驗的速度並有效改善資料參數的計算與管理，而本次研究即針對像素訊雜比作為量測與計算的主題。

二、系統原理與設計

整體系統架構如圖 1 所示，自動化的量測系統需包含：(1) 影像感測器資料讀取、(2) 積分球光源控制、(3) 積分球光源回饋、(4) 影像感測器參數計算及 (5) 系統軟體與人機介面設計。

(1) 影像感測器資料讀取

在量測資料前最基本的就是需將影像感測器資料讀取出來，傳統的作法是利用影像擷取卡裝置

在電腦上，再對其寫程式讀取出，此方式會大大減少在設計上的便利性。而此次的方式是透過 NI CompactRIO 與高速 I/O 卡設計出通用型的影像感測器讀取系統，也增加整體系統的彈性。

(2) 積分球光源控制

因實驗參數必須記錄不同光源照度下影像感測器的輸出值，所以必須重複的控制光源照度大小，以往的方式是用人工手動方式調整，此次設計也將此動作改為自動化設定並與其他功能一起搭配控制。

(3) 積分球光源回饋

當控制完積分球光源後，必須要知道目前積分球光源輸出值，因此會架設流明計做光源的量測。過去必須用手記的方式將光源值記錄並換算成光源照度，因此這次設計也將對此改善，包含可以達到自動記錄與運算。

(4) 影像感測器參數計算

將上述在不同光源照度下重複擷取到的影像感測器資料做運算，通常的做法是將資料儲存後再透過數學運算軟體如 Matlab 等做運算。而這次目的是希望能將影像感測器資料直接透過 CompactRIO 系統與 LabVIEW 軟體擷取，並利用 LabVIEW 內部所含的數學運算單元直接做 SNR 參數運算。

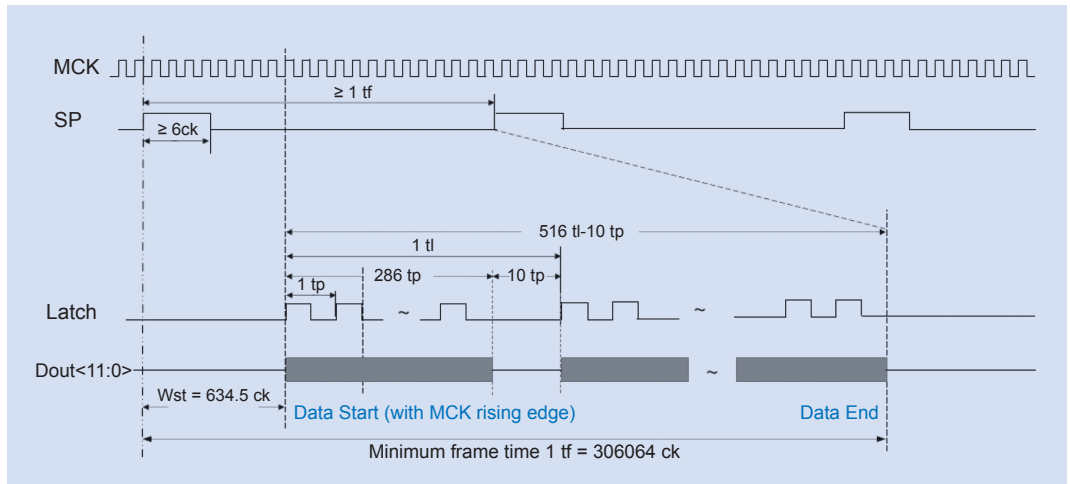


圖 2. 影像輸出時序圖。

(5) 系統軟體與人機介面設計

在此設計中利用 LabVIEW 軟體讓各硬體達到最佳效能，並設計人機介面將各所需設定之參數與擷取或分析資料做顯示，以方便使用者利用。

1. 影像感測器資料讀取

不同的影像感測器會有自己的讀出 (readout) 格式，因此使用者要使用所選定的影像感測器時，必須要熟悉其控制訊號的時序。此次設計我們利用 NI-9014 嵌入式系統並搭配 NI-9401 高速資料擷取

卡做時序的控制與讀取，並設計成通用型 CMOS 影像感測器讀取格式。在此我們使用的影像感測器為某品牌 CMOS 影像感測器，其為 512 × 256 像素，時序圖如圖 2 所示，主要頻率為 MCK，而資料擷取卡需對 SP、Latch 與 Dout 做重新排序的動作，也因為主要頻率 MCK 不可低於 1 MHz，所以資料擷取卡需要速度夠快才會保障資料不失真。此部分的程式是設計在 NI FPGA 上，而其程式流程圖如圖 3 所示，程式一開始會先等待 SP 訊號，此訊號為一個新影像起始訊號，而後開始判斷 Latch 的訊號，因為此影像感測器是以並列方式輸出資料，每一 Latch 觸發皆為一個新的像素資料輸出，而後再將 Dout 資料透過兩組 NI-9401 將其資料讀出並重新組合成 12 位元資料。此處需要用到兩組 NI-9401 的原因為其各組只有八位元輸出入，因此利用兩組 NI-9401 將資料讀出再拼湊回 12 位元值。測試結果圖稍後介紹。

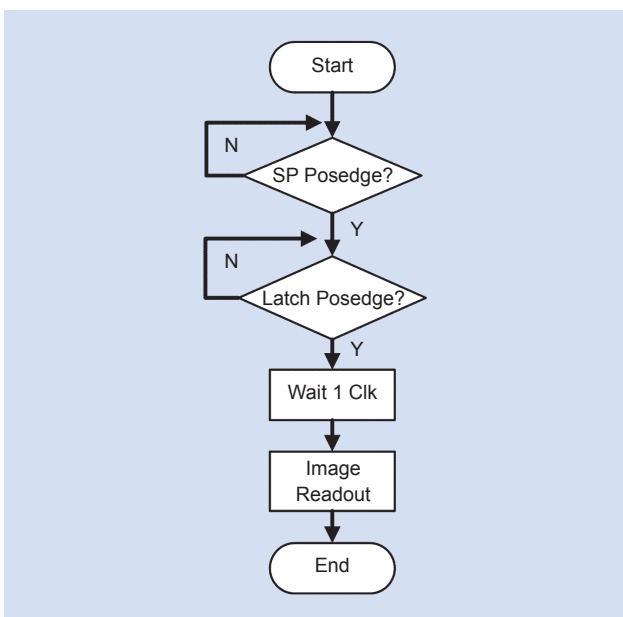


圖 3. 影像讀取時序圖。

2. 積分球光源控制

積分球之基本工作原理如圖 4 所示；光線由輸入孔入射後，光線在此球內部被均勻地反射及漫射，因此輸出孔所得到的光線為相當均勻之漫射光束。而且入射光之入射角度、空間分布及極化皆不會對輸出之光束強度及均勻度造成影響。也因為光線經過積分球內部之積分後才射出，因此積分球亦可當作光強度衰减器。其輸出強度與輸入強度比約為：光輸出孔之面積 / 積分球內部之表面積。

在影像感測器中的測試，需要透過不同的光源產生不同的色度與照度，而此次研究中所選用的積分球光源色度控制是依據電流的大小，如圖 5 所示，因此我們特別設計了一組電流控制裝置，未來也可將其設計成嵌入式系統模組，並整合到 NI CompactRIO 內以達整體化。電流控制裝置的裝置架構如圖 6 所示，其中包括了一個微控制器 (AVR ATmega8535, Atmel Company)，可以依照嵌入式系統產生不同的脈波調變訊號 (pulse width modulation, PWM)，而後到數位類比訊號轉換器，再到運算放大器控制電流輸出的大小。電流與電壓輸出要配合光源燈泡功率，必要時需加設限流器或其他限制電路。而嵌入式系統對電流控制則是透過 NI-9474 數位輸出卡控制，先將輸出電流固定為 16 階，再利用 4 位元 I/O 調整輸出的電流階數，而輸出電流範圍在 0–2 A。

3. 積分球光源回饋

積分球光源輸出後，必須要量化光源值，而在求 SNR 值時都是以光源輻射度為計算單位，因此我們除了需要量測光源，還得將其值轉換成光源輻射度。對此我們利用一台光通量計 (luminous flux meter)，外附積分球並同時量測。光通量的表示符號是 Φ ，其單位為流明 (lm)，主要代表人體肉眼感受到的功率，亦即人眼對各種波長光的反應，其物理表示式為：

$$\Phi = K \cdot \int_0^{\infty} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中， K 為光敏度、感光度，人眼對彩色的感知能

力 $K = 683.002 \text{ lm/W}$ ， λ 為波長， $V(\lambda)$ 為 λ 曲線，此為綜合人類對各不同波長光靈敏度之經驗值。

接續將求出的流明值再換算成「輻射照度值」。輻射照度為放射源向平面狀物體照射時，每單位面積所得到的放射束數量的物理量，單位為 W/m^2 。而換算公式為：

$$E_e = \frac{Lm}{A^2(m)} \quad (2)$$

光通量計與嵌入式系統的資料傳輸是利用 UART 的介面做資料傳輸，其光通量計的傳輸速度為 19200 bps。

4. 影像感測器參數計算

此研究以計算影像感測器之 SNR 參數計算為範例，SNR 常被使用在長距訊號傳輸、類比轉數位電路系統或影像訊號上等。在長距離訊號傳輸中如網路訊號，在訊號兩端算其 SNR 值，藉此評斷訊號衰減量，另一為計算 GPS 訊號中的訊號載波／雜訊 (carrier/noise)。在類比轉數位電路系統中最常見的為類比數位轉換器 (analog to digital converter)，在市售的類比數位轉換器規格書上都會標示此參數以便使用者選用，另外整體電路系統也可利用此參數來做系統穩定度的評判。影像訊號的 SNR 常被用來評估像素 (pixel) 的穩定度或是整體系統品質，此參數是為設計者在選擇時重要的依據與考量，因此本文也針對影像訊號的 SNR 進行探討。

計算 SNR 的過程當中是以統計的概念作為基礎，先對訊號源做取樣，再對樣本資料做計算。

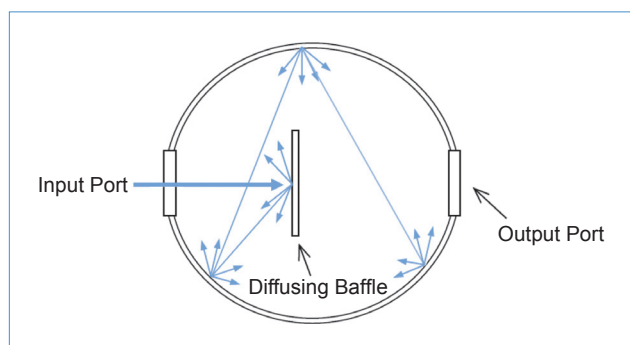


圖 4. 積分球內部架構圖。

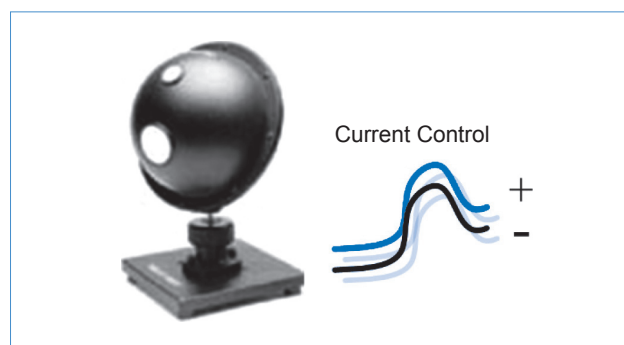


圖 5. 積分球控制。

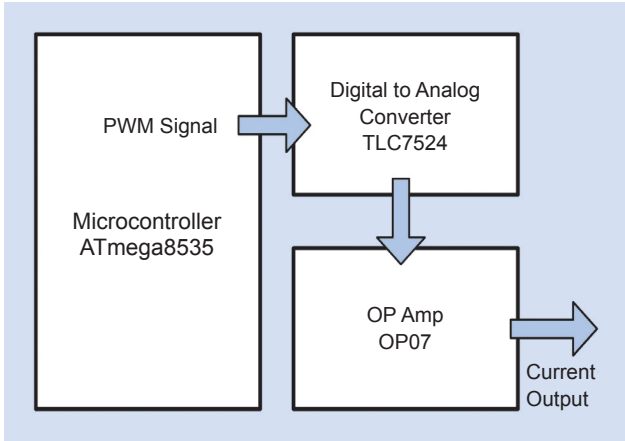


圖 6. 電流輸出控制裝置。

在工程當中 SNR 的表示法為訊號功率 (power of signal) 與雜訊功率 (power of noise) 的比例關係為：

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)^2 \quad (3)$$

公式前半段是利用功率的方式做運算，求得功率的量測過程必須要在相同的條件下進行。當訊號與雜訊是在同一阻抗下做量測時 (一般是同一時間可以得到訊號與雜訊值)，則可利用公式後半段做表示，其中通常 A 為振幅的均方根值 (root mean square, RMS)。而均方根值的算法為：

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (4)$$

因為 SNR 算出的數值會很大，所以其的單位一般使用分貝作為表示，其值為十倍對數訊號與雜訊功率比：

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right) \quad (5)$$

由 SNR 公式可知，SNR 值越大代表訊號品質越好，越小則越差。基於上述的公式，可以依序求出 SNR 值，主要的問題是在如何知道公式中訊號 (A_{signal}) 與雜訊值 (A_{noise})。在此 A_{signal} 的求法為先對同一光源重複取樣多次，再算其平均值 (mean)，

公式為：

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi \quad (6)$$

而 A_{noise} 的求法則是在資料中算其標準差 (standard deviation, STD)，公式為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2} \quad (7)$$

再依上面的 SNR 求出，利用平均值與 STD 求出其訊號與雜訊，取代求其均方根值。

取樣數的多寡是基於統計的原理，資料量必須讓資料的分布呈現為常態分布 (normal distribution)，也有人稱為高斯分布 (Gaussian distribution)，分布圖會依不同的 μ 值與 σ 值呈現位置與胖瘦的不同。取樣數大約至少要 30 筆資料以上，越高的取樣數所算出的 SNR 可靠度也就越高。

5. 系統軟體與人機介面設計

程式系統架構圖如圖 7 所示，其中以兩組有限狀態機作為架構，外圈為設定與讀取整體系統資訊，內圈為對 CMOS 影像感測器做資料處理。外圈有限狀態機主要包含了：(1) 資料初始化，(2) 光源強度訊號讀取與 (3) 積分球光源控制。內圈有限狀態機主要對 CMOS 影像感測器做讀取與訊號處理，其中執行順序為 (1) CMOS 影像感測器資料讀取，(2) 壞點記錄與修正，(3) CMOS 影像感測器資料儲存，(4) SNR 參數運算。

三、實驗過程

1. 系統資訊讀取及光源讀取與控制 (外圈有限狀態機)

程式一開始將訊號初始化，並設定 Real Time (RT) 內 DMA 空間，然後使用者設定積分球的亮度並開始執行內部有限狀態機，之後回讀出光源照度，並再依照使用者設定控制光源照度，依序重複動作。

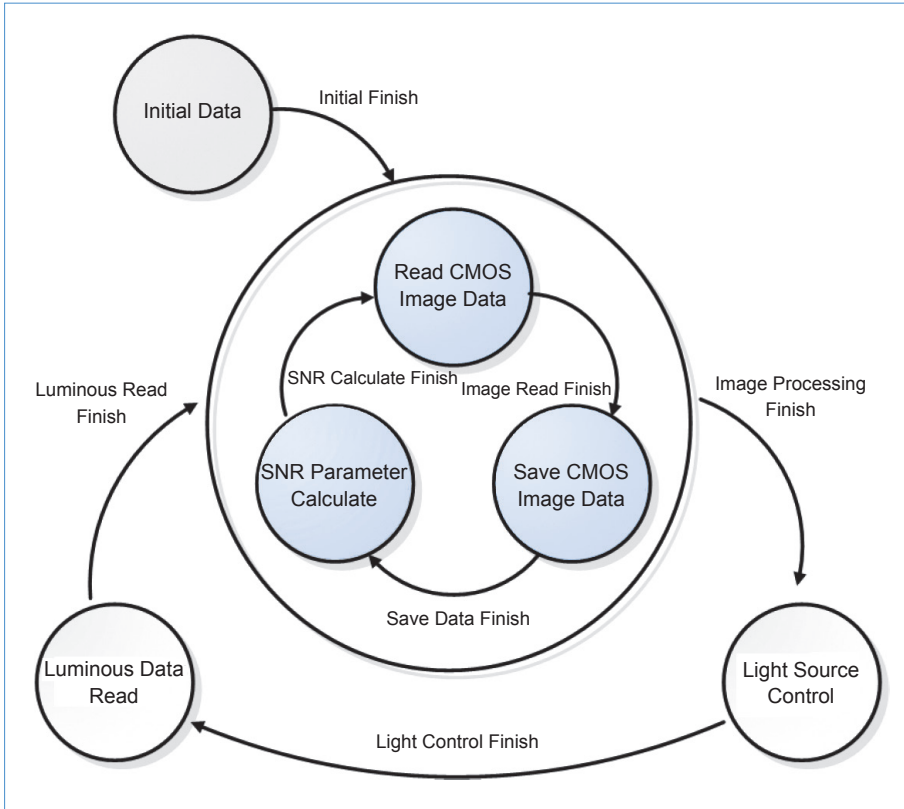


圖 7. 程式流程圖。

2. CMOS 影像感測器讀取與訊號處理 (內圈有限狀態機)

依照不同廠牌的 CMOS 影像感測器資料讀取時序設計 NI-FPGA 程式，依據 Frame、Line 與 Pixel 訊號重組影像資料，並透過 DMA 的方式快速的將資料從 FPGA 傳送回 Real Time 處理器。然後在 Real Time 處理器端將壞點做內差處理，再將影像資料儲存起來。在此我們所檢測影像感測器為 256×512 像素，並用 16 位元方式做儲存，再加上影像資料必須重複擷取，因此龐大的資料是 NI CompactRIO 內部記憶體所無法負荷的，因此我們在此利用 Real Time 處理器上的 USB 介面外接 USB 儲存裝置，來達到擴充 Real Time 處理器記憶體的效果並用來儲存影像資料。後續可再選擇是否要計算影像感測器 SNR 值。

四、結果與討論

1. CMOS 影像感測器讀取與儲存

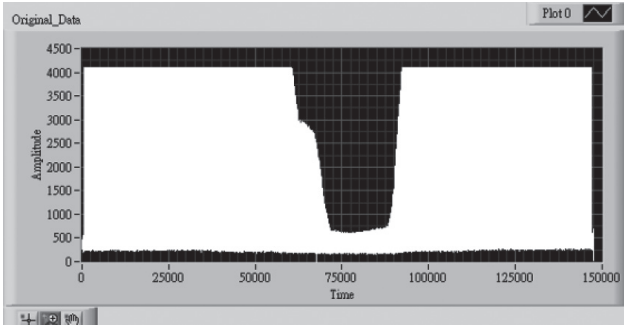
影像感測器輸出的速度為 1 MHz 與 12 bits 解

析度，因此利用兩組 NI-9401 (其中 I/O 最快速度 10 MHz) 來設計成影像擷取卡。在此利用到了客製化通訊協定特點，設計 CMOS 影像感測器的通訊協定。

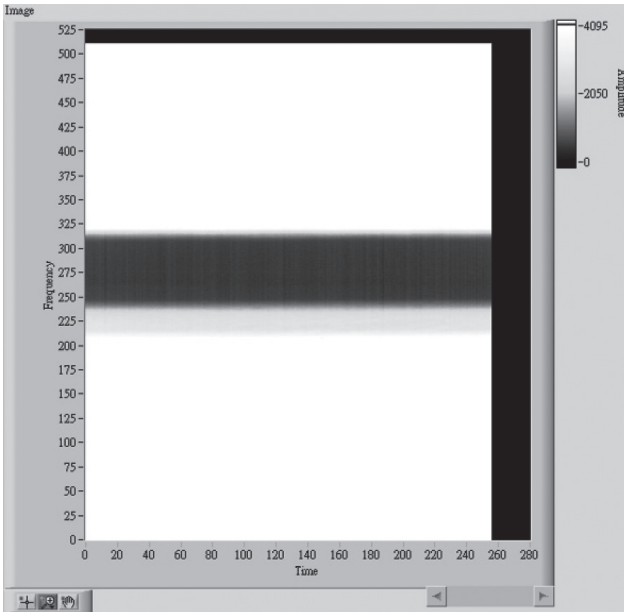
在擷取影像感測器資料後，會將其儲存至安裝在嵌入式系統上 U 槽的隨身碟並儲存成十六進制文字檔，此部分原因在於後續的 SNR 計算必須大量的重複量測資料，會佔滿嵌入式系統內部記憶體，因此外加一個 2 Gbyte 隨身碟來擴充記憶體容量，並用來儲存影像資料。CMOS 影像感測器中的數位轉類比器為 12 bits，最大值為 4095，因此我們將檔案儲存為 16 進制的格式並儲存成 txt 記事本，以便後續要將檔案讀出做分析。圖 8 為實際 CMOS 影像輸出，中間的為一隻筆做遮罩測試，其中可以得到一維與二維的資料圖。

2. 壞點記錄與補償

在擷取影像資料後，我們也利用數位訊號處理的方式將壞點去除，如圖 9 所示，此為暗狀態時擷取 CMOS 影像的資料，可以用暗狀態輸出時，點



(a)



(b)

圖 8. CMOS 影像輸出圖，(a) 一維影像輸出圖，(b) 二維影像輸出圖。

數資料大於平均值過多或是過少，都將其設為壞點。由圖中可知，可以看到有幾個像素是飽和與過低的，因此透過擷取前後各一個像素值再利用差分的方式將其壞點運算。其公式為：

$$X_{(i,j)} = \frac{\sqrt{(X_{(i-1,j-1)})^2 + (X_{(i+1,j+1)})^2}}{2} \quad (8)$$

圖 10 為壞點修正前與修正後圖，上圖為修正前，下圖為修正後，壞點數過多的影像感測器則可直接淘汰。

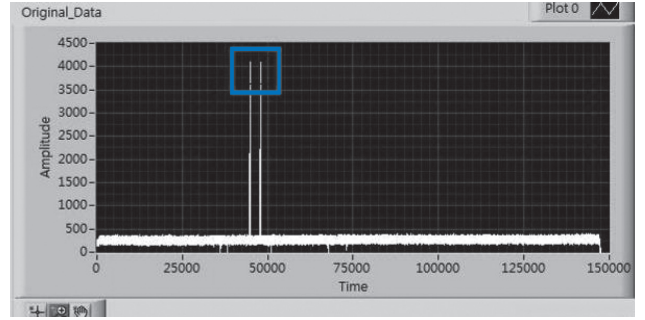


圖 9. 像素壞點。

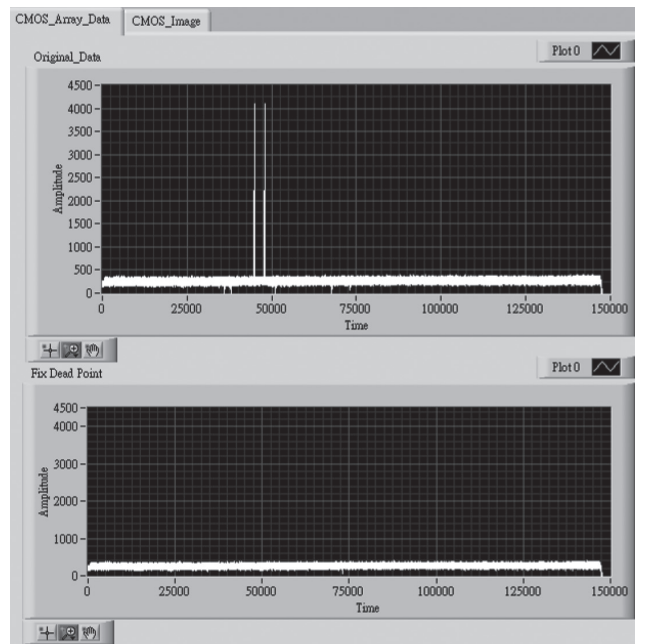


圖 10. 像素壞點修正前與修正後。

3. SNR 參數計算

在計算 CMOS 影像參數時，必須要有夠多的重複量測資料量，因此將儲存在隨身碟內的資料讀取出並處理。圖 11 顯示為各個像素值之 SNR，由圖中也可看見在六萬多點的像素 SNR 值明顯偏低(藍色框架)，因此也可透過結果來考慮此像素點是否要取用。我們在此也實際量測一影像感測器，其像素為 512×256 ，並測試不同光流光度下的 SNR 值，而表 1 為測試像素飽和度分別在 5%、50% 與 90% 的實際平均值，也間接驗證了系統可行性。

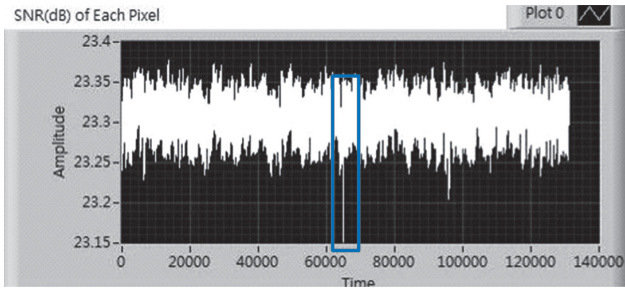


圖 11. 影像感測器每一像素之 SNR。

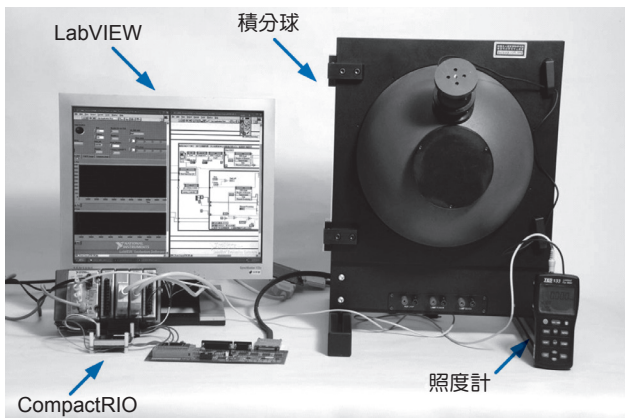


圖 12. 嵌入式系統應用於影像感測器模組 SNR 自動量測。

五、結論

傳統影像感測器 SNR 量測需要經由繁瑣的操作流程與複雜人員反覆操作，因而造成相當大的不便；另外，影像感測器的不同會有不同測試上的需求，也因此常常在實驗上需要有客製化的實驗裝置與流程。本篇研究針對這幾點缺點加以改善，設計並實現了一套整合型 SNR 影像感測器量測系統。圖 12 為實體系統圖，其中並利用了嵌入式系統與其他模組化的裝置，解決以往在 SNR 參數量測與

表 1. 不同像素飽和度之平均 SNR 值。

像素飽和度	SNR 值 (dB)
5%	40
50%	41
90%	51

計算時的不便性與複雜性，並可成功達到系統模組與客製化的需求，最後對實際的影像感測器做參數量測，並得到理想的結果。透過此篇文章可以提供一套有效的客製化影像感測器 SNR 量測系統，進而提高國內量測儀器開發與整合能力，共同促進相關產業整體之發展。

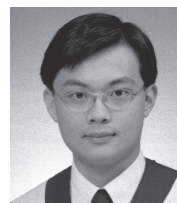
參考文獻

1. G. C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*, Bellingham, Wash, SPIE (1995).
2. M. Irani and S. Peleg, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, **53** (3), 231 (1991).
3. R. M. Weisskoff, *Magn. Reson. Med.*, **36**, 643 (1996).
4. E. Atalar and E. R. McVeigh, *Magn Reson Med.*, **38**, 852 (1997).
5. W. A. Edelstein, G. Glover, C. Hardy, and R. Redington, *Magn. Reson. Med.*, **3**, 604 (1986).
6. W. A. Edelstein, P. A. Bottomley, and L. M. Pfeifer, *Med. Phys.*, **11**, 180 (1984).
7. 陳建宏, 廖泰杉, 翁茂樵, 陳志文, *科儀新知*, **31** (1), 85 (2009).
8. C. Parks and D. Losee, *SPIE*, **5017**, 167 (2003).
9. N. S. Saks, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-1,131 (1980).
10. I. Peters, A. Kleimann, F. Polderdijk, W. Klaassens, R. Frost, and J. Bosiers, *IEDM Tech. Dig.*, 993 (2004).



陳建宏先生為國立成功大學醫學工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Chien-Hung Chen received his M.S. in biomedical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



許家偉先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Chia-Wei Hsu received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



林育全先生為國立成功大學機械工程博士候選人，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Yu-Chuan Lin is a Ph.D. candidate in the department of mechanical engineering at National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



廖泰杉先生為中原大學電子工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.