

嵌入式即時氫氣系統

Embedded real-time hydrogen sensing system

林坤緯^a 張沛乘^a 羅明敏^b 翁嘉慶^a

^a 朝陽科技大學 資訊工程系

^b 朝陽科技大學 財務金融系

台中市霧峰區吉峰東路 168 號

E-mail : kwlin@cyut.edu.tw

摘要

本研究主要將整個氫氣感測系統跨平台建構在 FPGA 上面，透過 FPGA 強大特性的優點，能將氫氣感測系統以更精準的時序分析，完成即時感測系統。本研究主要以線性內插法、二元收尋法、有限狀態機，設計出整個氫氣的辨識系統，並實現於 FPGA 上，線性內插的優點具有能夠快速的尋找出近似值且複雜度低，縮短感測系統的反應時間，能對氫氣的快速反應有卓越的成效，因此，本研究預期將可於 SOC 系統上實現。

關鍵詞：氫氣感測系統、線性內插法、二元收尋法、有限狀態機。

Abstract

The aim of this study is to construct the real-time hydrogen sensing system on FPGA. The advantage by using FPGA is more precise clock control. The Recognition is based on linear interpolation, binary search algorithm, and finite state machine through Verilog hardware description language. Finally, the hydrogen sensing system is realized on FPGA for real time detector. The linear interpolation can find out approximation of hydrogen signal quickly. The short computing time and low

computing Complexity are also the advantage of our study. Hence, the hydrogen sensing system can be expected achieve in System on Chip (SoC)

Keyword: hydrogen sensing system, linear interpolation, binary search.

1. 簡介

由於氫氣是宇宙蘊藏量最豐富且為乾淨的能源，能解決目前石油枯竭，汙染日益嚴重的問題，然而氫氣是無色、無味、無臭，且易然的氣體，當空氣中氫氣濃度在 4 - 97 vol% 會有爆炸的危險、因此，氫氣感測器亦有大量的研究與應用，目前氫氣感測器已能達到輕薄短小的境界，但是在應用上仍受到許多的限制。

本研究主要是利用 Verilog 硬體描述語言來實現線性內插法、二元收尋法、和有限狀態機已達到更具靈敏的感測電路，由於氫氣外洩容易引起窒息或是爆炸的反應，對於電路靈敏的反應更顯額外的重要，研究中使用的線性內插法具有快速尋找出偵測點的近似值能夠第一時間反映結果，再由二元搜尋法，判斷感測訊號對應的氫氣濃度值，其二分法的優點在於速度快、複雜度低，但需事先將資料排序好，並且由有限狀態機區分演算法的辨識狀態或接受狀態在以 Mealy State 和 Moore

State 區別下一個訊號的觸發，最後透過 FPGA 的 LCD Module 呈現動態和靜態數值的結果，如表 1 所示：

表 1:十組靜態值

十組靜態值	PPM 值	Current 值
1	0	0.7176
2	5	0.7960
3	15	0.10167
4	50	0.26247
5	100	0.31673
6	200	0.35279
7	500	0.38887
8	1000	0.41439
9	5000	0.46020
10	10000	0.47052

2. 文獻回顧與探討

2.1 線性內插法(linear interpolation)

本文所使用的線性內插法是採用參考文獻[1]所提供的方法，在本文中我們使用線性內插法的計算步驟如下：

Step1. 假設我們已經得知偵測的濃度值 (x_0, y_0) 與 (x_1, y_1) 如圖 1 所示，如要得到 (x_0, x_1) 區間內某一位置 x 再直線上的值，可將公式看成：

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (1)$$

Step2. 假設方程式兩邊的值為 α ，那麼這個值就是差值係數，可將公式等效為：

$$\alpha = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad \text{or} \quad \alpha = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} \quad (2)$$

Step3. 在代數上也可以表示為：

$$y = (1 - \alpha)y_0 + \alpha y_1 \quad \text{or} \quad (3)$$

$$y = y_0 + \alpha(y_1 - y_0) \quad (4)$$

這樣透過 α 就可以直接得到 y 值，即使 x 不在 x_0 到 x_1 之間並且 α 也不是介於 0 到 1 之間，公式也是成立的。

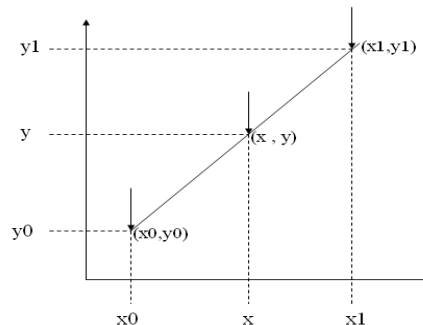


圖 1 linear interpolation

2.2 二元搜尋法(binary search)

本研究中將由線性內插取得的數據值，再由二分法將資料分割成兩等份，比較鍵值跟中間值的大小，可確定要找的資料在前半部或是後半部，如圖 2 所示:[2]

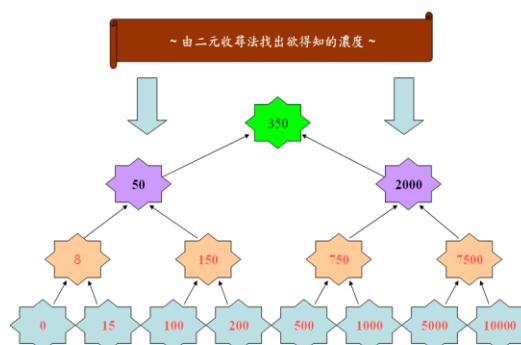


圖 2 binary search

在二分法最多只需比較為：

$$\lceil \log_2 n \rceil + 1 \quad \text{or} \quad (5)$$

$$\lceil \log_2(n+1) \rceil \quad (6)$$

在時間的複雜度為：

$$O(\log n) \quad (7)$$

在公式(5)和(6)是利用每次搜尋數值減為一半，加快氫氣感測系統對應到相關

的濃度值的搜尋速度，其前置處理需經過資料排序，再加入其演算法處理，將可達到資料處理速度。

2.3 有限狀態機(Finite State Machine)

本文中使用的有限狀態機當作處理的運算的核心，在演算法中主要是扮演「辨識狀態」和「運算狀態」來區分程式該執行的步驟，如圖 3 所示：

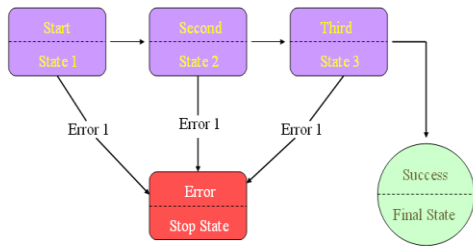


圖 3 Accept machine and identify machine

在圖 3 中我們可以看到一開始的狀態機如果符合下一個狀態的程序，待第一個狀態機執行完就會進入到第二個狀態機，以此類推[3]，但是如果「辨識」或「計算」結果與第二個狀態機不相符合的話，會直接跳到 Error 這個狀態並且強制結束，在本研究中就是利用相似的狀態機來建構模型，並且區分不同區塊來辨識狀態機的判斷。

有限狀態機裡總共區分為 Mealy Machine 和 Moore Machine，所謂的『Mealy Machine』是將目前狀態 S 與輸入訊號 I 組合而成[4]，如圖 4 所示：

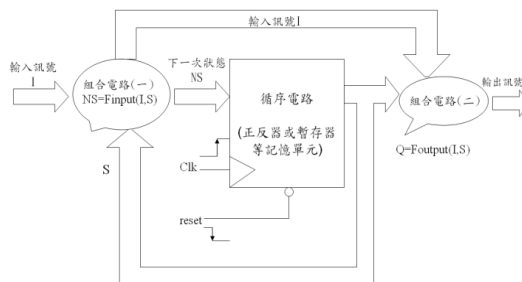


圖 4 Mealy Finite State Machine

如果輸入訊號 I 為非同步(亦即不與 Clock 脈衝同步變化)的話，則其輸出訊號比較有可能產生突波(Glitch)的現象，而本研究使用 Melay FSM 在於對照輸入訊號與輸出訊號的不同藉此觸發下一個狀態的開始，亦即在最後一次的狀態機，如有輸入訊號值不同於上一個輸入訊號的值時，藉此從新觸發新的有限狀態機。

而另外一個『Moore Machine』輸出訊號是由目前狀態 S 相關的暫存器電路彼此組合而成，如圖 5 所示：

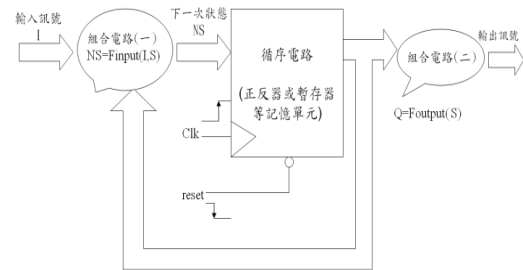


圖 5 Moore Finite State Machine

至於在 Moore FSM 在本研究上的應用，是用來架構和支撐 Sensing System 的核心，利用上一次的狀態來判斷與計算輸入訊號的數值，藉此觸發下一個狀態或是返回到其他狀態，由於 Moore FSM 其輸出訊號全是來自於與狀態暫存器同步的電路，因此不會有非同步的突波產生，從應用的觀點來看、Melay FSM 比較會符合研究的相關應用，但是從設計方面來看 Moore FSM 會比 Mealy FSM 還要更加穩定。

3.系統架構設計

氫氣感測系統主要是利用 FPGA 的 GPIO 外接腳對外擴充其類比/數位轉換電路，並連接到訊號產生器所得到的類比訊號做為轉換數據的來源，如圖 6 所示，其模擬的數值有分為動態和靜態數值，一開

始先用以知的數據模擬出靜態值，待模擬成功後，再將靜態值改為一連續訊號的動態值

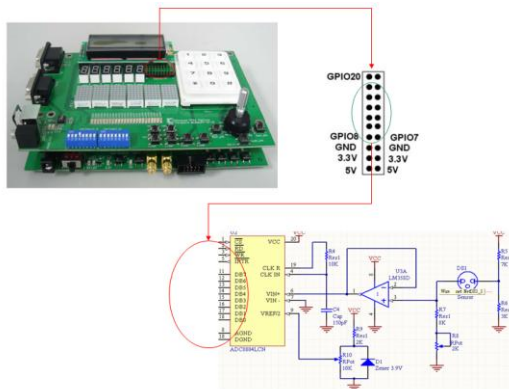


圖 6 Hydrogen sensing system based on FPGA

在實驗初，先將 GPIO 的接腳和 ADC0804 的接腳相互連接，透過 QuartusII 軟體模擬靜態和動態數值時，可將所撰寫的 Verilog 的語言轉化為 RTL 如圖 7 所示：

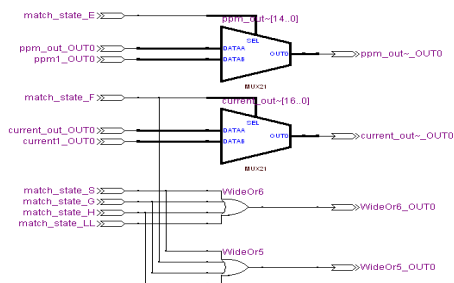


圖 7 Hydrogen sensing system of RTL diagram

在靜態電路模擬時，是將從訊號產生器透過類比/數位轉換器(ADC0804)所讀到的數值，再經由線性內插法計算其數值位於哪一個旗標，算出旗標位於哪一個預設的判斷值後，程式會用二元收尋法判斷當下旗標最接近於哪一個預設數值，並顯示於 LCD Module 上或是發送 signal 給其他元件，如圖 8 所示：

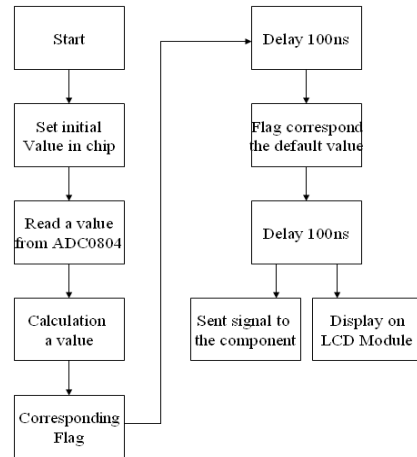


圖 8 Static state flowchart

在動態的部份，動態是將讀入的數值經過線性內插法運算過直接顯示在 LCD Module 上面，其流程圖如圖 9 所示：

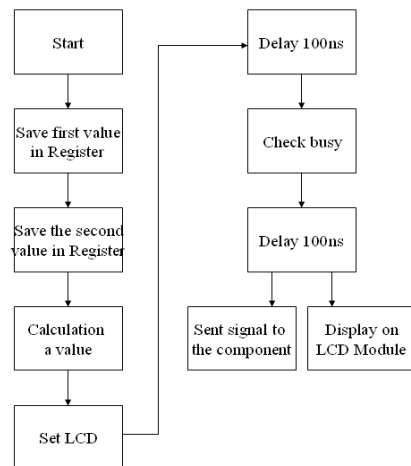


圖 9 dynamic state flowchart

靜/動態模擬不同處為靜態是將運算過的數值，對應到內建最相近的值並且顯示於 LCD Module 上，但是動態模擬是分別用暫存器儲存前兩個數值，在由這兩個數值去做線性內插法取得中間值，

4.實驗結果

如下圖 11 為 Modelsim 靜態電路數據模擬圖，由圖中可看出大約在 29600ns，其內插演算法開始

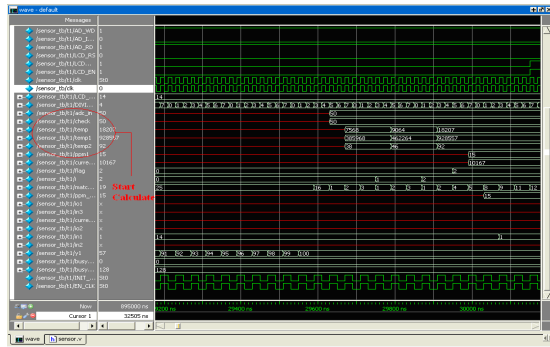


圖 11 Modelsim Static 30000ns simulation

圖 12 為一輸入訊號數值完整運算完並且顯示於 LCD Module 的完成時間約為 199200ns。

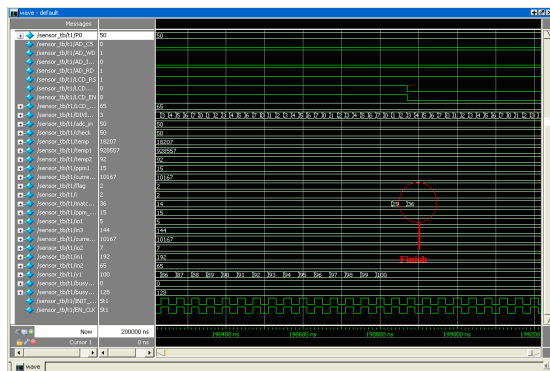


圖 12 Finish simulation at 199200ns

圖 13、14、15 為 Modelsim 不考慮任何電路延遲時間，亦即把所有的 Delay time、Set LCD、Checkbusy...等去掉直接模擬數值所顯示的十組靜態顯示結果。

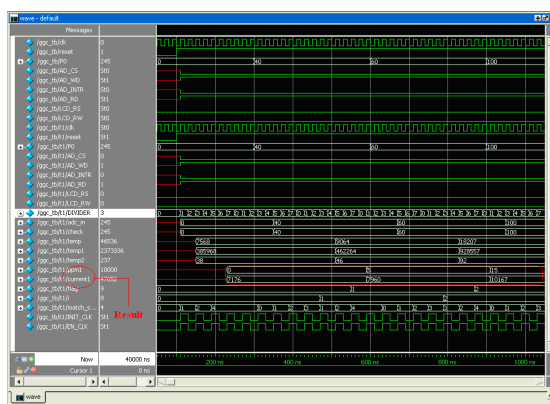


圖 13 Static state simulation result at 0,5,15 PPM H₂/air, respectively

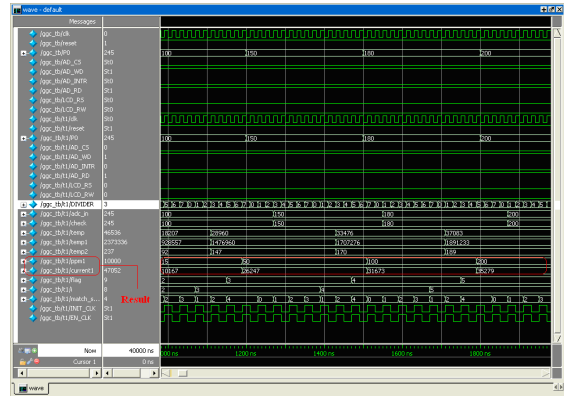


圖 14 Static state simulation result at 50,100,200 PPM H₂/air, respectively

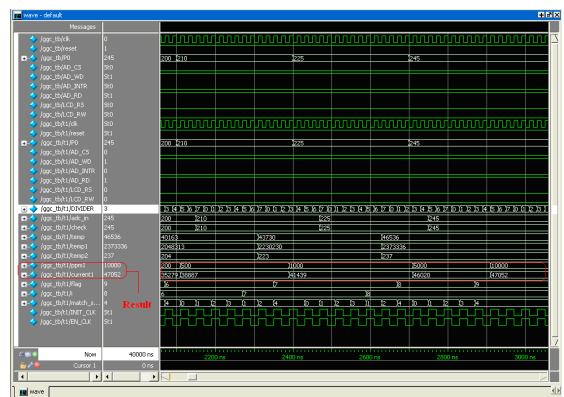


圖 15 Static state simulation result at 500,1000,5000,10000 PPM H₂/air, respectively

在動態模擬結果部份，如圖 16 所示，為一連續的動態數值輸入，由圖中我們可看到 P0 不斷的輸入訊號給，而氫氣濃度與相對應電流值，由圖 16 可以看到氫氣濃度值為 0 的時候電流值為 0.7012。

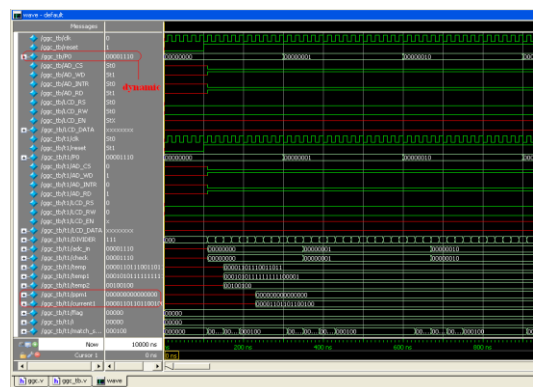


圖 16 dynamic state simulation result at 0 PPM H₂/air, respectively

而圖 17 在 4200ns 時，氫氣濃度值為 16、電流值為 0.8036。

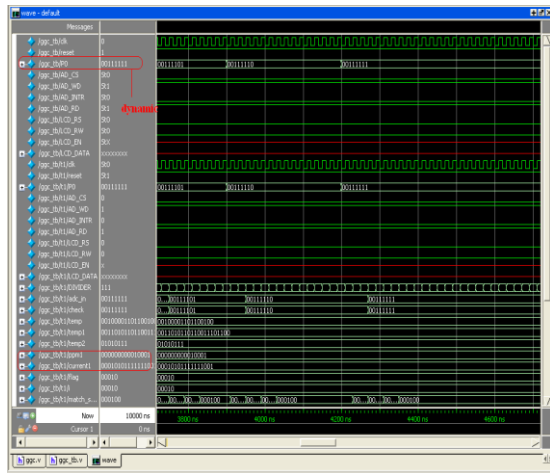


圖 17 dynamic state simulation result at 16 PPM H_2 /air, respectively

由圖 18 可以看到利用 Quartus II 將所設計程式轉換為完整的 RTL 電路圖

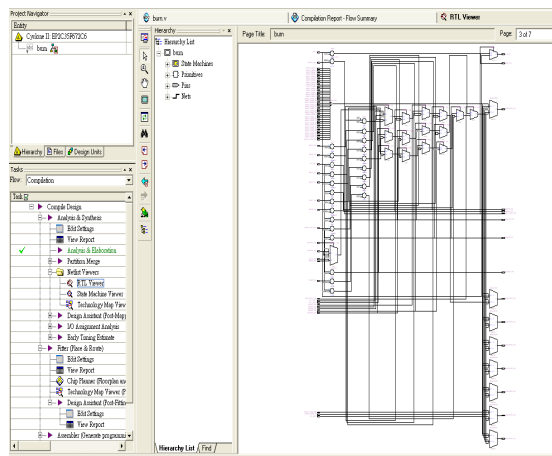


圖 18 RTL viewer of Quartus II

由圖 19、20 中可以看到最後將整個電路實現到 FPGA 板結果。

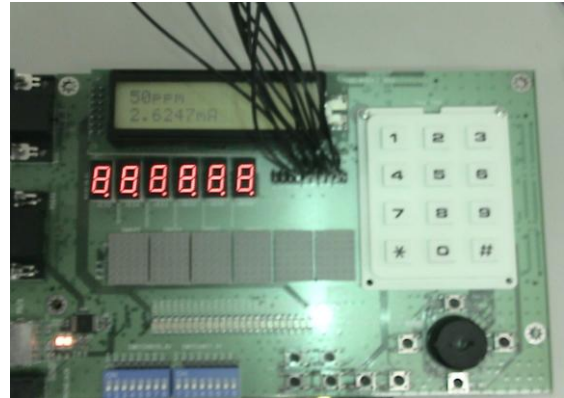


圖 19 Experiment result show on FPGA at 50 PPM H_2 /air

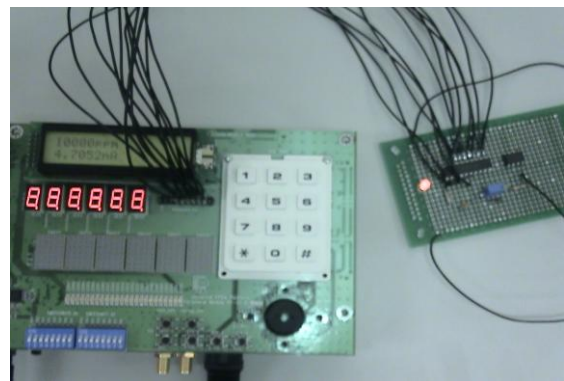


圖 20 Experiment result show on FPGA at 10000 PPM H_2 /air

5. 結論與未來展望

本論文主要是利用線性內插法、二元收尋法、和有限狀態機來建置氫氣感測系統，並使用上述演算法的特性，來提升感測系統的靈敏度，以達到快速反應的氫氣的電路，其反應時間為 199ms，用程式複雜度低相關特性來達到節省能源效用，而有限狀態機扮演著電路核心角色，利用狀態機的結構，持續偵測輸入訊號，且會依不同的輸入訊號有不同的數值反應結果。

未來整個電路將可整合於一顆單晶片(SOC)上面，以達到更小的電路面積、

更低功耗、更具高靈敏度的反應。

參考文獻

- [1]林偉文推薦，蔡文彬、許全福翻譯，**數值方法工程上的應用**，麥格羅希爾國際股份有限公司、2005.
- [2]王正一、蕭富貴，**資料結構使用 C 語言**，台科大圖書股份有限公司、2003.
- [3]林灶生、劉紹漢，Verilog FPGA 晶片設計，全華科技圖書股份有限公司、2005.
- [4]鄭羽伸，Verilog 數位電路設計範例寶典，儒林圖書有限公司、2006.
- [5]Si Mahmoud Karabernou, Faycal Terranti, “Real-time FPGA implementation of Hough Transform using gradient and CORDIC algorithm”, *Fusion Engineering and Design* , Vol 23, pp.1009-1017, 2005.
- [6]G.A. Naylor, “An FPGA based control unit for synchronization of laser Thomson scattering measurements to plasma events on MAST”, *Fusion Engineering and Design*, Vol 85, pp 280-285, 2010.