

A Network Connection Protection Mechanism Using Visible Light Communication In Industrial Wireless Networks

Shih-Hao Chang

Department of Computer Science and Information Engineering

Tamkang University

E-mail : shhchang@mail.tku.edu.tw

摘要

近年來，無線網路無論在政府，企業或到家庭與個人的行動通訊上都取得廣泛的應用與驗證。這些特點使得無線網路在工業上的應用極具吸引力，並希望可以在工業通訊的建置與系統維護上的助益。然而，工業通訊中所要求的即時性主要的含義上是要對工廠控制機器中需要較快速並精準的遞送控制資料，例如在運動控制系統。在這種類型的應用中，即時性就會被在工業通訊上被認為是性能的指標以評價是否適用於工業網路上，但相對而言，無線通信系統有眾所周知的傳遞問題，如訊號衰落，多徑傳播，訊號被遮蔽和干擾的問題，而這些都會影響工業網路通訊中所要求的即時性。因此本文提出一個網路連結保護機制，使用可見光與無線網路通訊的合作機制來保持智慧工廠內通訊的正常運作，並在未來可以使用無線工業乙太網路來實作。

關鍵詞：智慧工廠、物聯網、可見光通訊、無線網路、工業通訊網路。

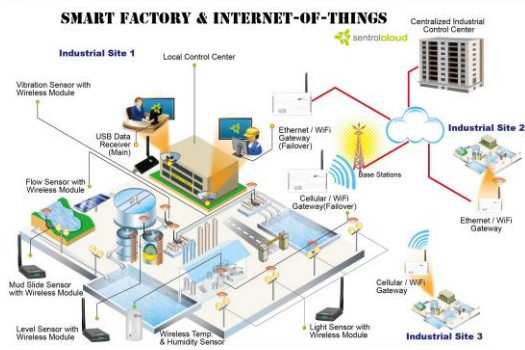
Abstract – In recent years, wireless networks and applications have achieved marvelous successes in government, enterprise, home or even personal communication systems. The desired features of wireless communications draw lots of attention to the industrial communication and expected to bring benefits such as reduce deployment and maintenance after employed. However, the industrial communication system required “real-time” communication which means the control systems in the factory are required accurate control and rapid communication, such as the industrial motion control system. In this type of application, the communication system’s performance and efficiency will be evaluated to ensure its applicable to the industrial network. However, there are a few original issues in the wireless communication, such as fading, multipath propagation and interference problems which will affect the reliability and performance of industrial communication system operation. Therefore, we proposed a network connection

protection mechanism that cooperate wireless network and visible light communication to achieve reliability and performance in industrial communication network, we will consider to implement this mechanism by using industrial wireless ethernet in the near future.

Keywords: Smart Factory, Internet-Of-Things, Visible Light Communication, Wireless Networking, Industrial Communication Network.

壹、簡介

無線網路無論在政府，企業或到家庭與個人的行動通訊上都取得廣泛的應用與驗證 [1]，這也代表了部署無線網路明顯帶來幾個重要的好處，例如傳統有線網路對某些行動通訊設備上是無法連接使用的。然而，這些特點使得無線網路在工業上的應用極具吸引力，因此被設想在近期可以透過無線網路部署或使用在獨立與混合系統（有線/無線）系統上的配置，可以帶來建置與維護系統上的助益。因此近年來，無線網路已開始部署或取代傳統網路的系統上。例如：運用 RFID，無線，行動網路和無線感測設備的日益普及率將許多現有的工業系統增強其通訊的能力和人機互動的功能，而近期很熱門的物聯網就是最好的例子。如圖一所示，使用物聯網技術的智慧工廠即整合了 RFID，無線，行動網路和無線感測設備來達成智慧工廠的遠景。



圖一：運用物聯網技術的智慧工廠示意圖

物聯網一詞最初提出來時，指的是使用物體接上可識別的通訊連接技術與射頻識別 (RFID) 技術 [5]，並且同時，物聯網的相關資料也正在迅速成長。例如，當物聯網使用於建置智慧型交通網路系統時，它可以讓交通運輸部門追蹤每個車輛的現有位置，監控其運作和預測其未來的位置和可能使用的道路，以讓車輛在城市間能更有效率的移動。然而，目前使用物聯網技術在各個領域引起更多廣泛的討論與執行[6]，例如：一些工業物聯網項目的，如農業，食品加工業，環境監測，安全監控，以及相關應用都已開始執行。

在工業控制領域中，工業通信系統主導各個工業設備中的資料傳輸，設備監視和控制工廠設備，例如：工業控制網路已長期使用在製造業，電力公司，食品加工，交通運輸，配水控制等。這些控制網路相當不同於一般傳統的企業網路，主要是工廠設備相互連接並與控制電路相通，因此工業控制網路經常需要佈線長達數公里。然而，這樣的網路連結會讓工業設備費用與維護成本大幅提高。工廠為了減少營運成本和達成最大操作效益和資料互換性，會試圖革新使用不同的網路技術，讓不同的級別的控制在不同的工業控制應用領域。不幸的是，無線通信系統有眾所周知的傳遞問題，例如訊號衰落，多徑傳播，訊號被遮蔽和干擾的問題，與無線網路有較高的傳輸誤差率 (BER) 等效應，導致傳送資料時的延遲以及隨機性的數據資料傳送。而這些現象會對工業的無線通

信系統，特別是關於即時性的問題產生負面影響。因為這些系統通常需要提供非常嚴格的時序性能，因此時序的性能會決定的它們被採用的哪一種典型的工業領域應用領域，如工廠自動化，過程控制和製造系統 [2-4]。

工業通訊中所要求的即時性主要的含義上是要對工廠控制機器中需要較快速並精準的遞送控制資料，例如在運動控制系統。在這種類型的應用中，即時性就會被在工業通訊上被認為是性能的指標以評價是否適用於工業網路上。近年來的可見光通信 (VLC) 是一種新的無線通訊的技術，它利用波長介於 400 THz 至 800 THz 之間的可見光來作為通訊媒介，其中的可見光是一個使用低成本，高效能的發光二極管 (LED)，其採用氮化鎵 (GaN) 的材料來構成 LED 白光源發射器並來。可見光的研究證明，它與無線 RF 網路訊號無互相干擾問題，因此它可以應用在高速資料傳輸速率與高頻寬的設備使用高強度光輸出來實現並提供照明。另外，因目前的工廠通訊技術大多使用有線網路連結較容易造成廠內員工因走動而導致纜線鬆脫的問題，因此可見光格外受到工業界的關注，如在工業界已經有可見光通信聯盟 [7]，並在 IEEE 的任務的潛力組 802.15.7 [8] 標準等。

可見光通訊可以在上傳連接或下載連接方向的資料傳輸 [9]，在上傳連接和下載連接可以分離在許多方面，如訊號的波長，時間，空間，有線或無線的隔離。由於時效與穩定性的問題，在工業通訊中，高頻寬的可見光通訊可能被用於下載連接的方式來實現。而原本的 Wi-Fi 可以提供一個可靠的上傳連接，其中干擾是不太可能的原因在於可見光與無線網路頻帶與傳遞介質的不同，剛好提供了一個抗干擾的網路結構。本文的結構如下：第二章描述相關的背景知識與應用，第三章介紹我們提出的網路架構與機制設計。第四章我們作個總結與未來努力方向。

貳、研究背景

在本章節中，我們將從科學文獻中先介紹與探討工業網路的核心問題，之後再針對在這領域較注重即時性的工業無線網路問題做探討。以目前的工業網路來說，主要是有特定的組件和應用，如可程式化邏輯控制器 (PLC)，監控與資料收集系統 (SCADA) 和分散式控制系統 (DCS)。工業網路主要是在與這些組件和系統之間通訊。其中，PLC 是一種具有微處理機的數位電子設備，用於自動化控制的數位邏輯控制器，可以將控制指令隨時載入記憶體內儲存與執行[1, 2, 4]。而 PLC 的網路介面通常以匯流排纜線或 RS-232 方式通訊連結，較高階的 PLC 會採用 USB 或乙太網路方式做通訊連結。而監控及資料收集 (SCADA) 系統的作用是幫助管理人員監控主要廠房或其他偏遠廠房的運作的，並收集各種不同監測儀器的訊息與資料，然後將這些訊息與資料發送到中央電腦作處理。分散控制系統 (DSC) 是一個由過程式控制級和過程監控級組成的以通信網路為紐帶的多級計算機系統，綜合了計算機 (Computer)、通訊 (Communication)、顯示 (CRT) 和控制 (Control) 等 4C 技術，其基本思想是分散控制、集中操作、分級管理、配置靈活、組態方便。然而，工業通訊網路若採用有線的連結會讓工業設備費用與維護成本大幅提高，主因包括線材本身的成本與維護線材的費用，另外工業的機械設備因為有廠牌與版本的不同因此，線材的維護成本會大幅提高。工廠為了減少營運成本和達成最大操作效益和資料互換性，會試圖革新使用不同的網路技術，例如：工業乙太網路，工業無線網路。

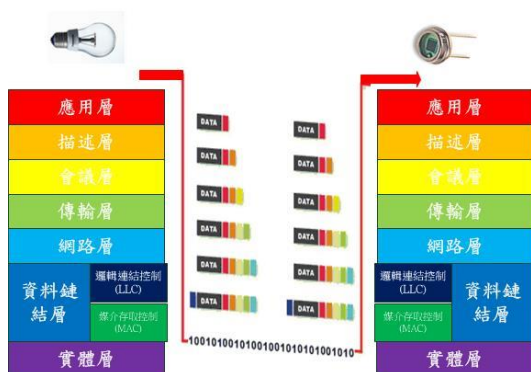
在工業無線網路方面，較知名的網路協定用來處理控制與自動化流程的包括無線高速可尋址遠程換能器 (wireless highway addressable remote transducer, HART) [10] 中，ISA100.11a[11]和 ZigBee[12]。而這些協議通常用 IEEE802.15.4 無線個人區域網路

(WPAN)。然而，這些網路協議通常使用在類似於通信系統的錯誤檢測和控制技術。因此，最普遍的情況下會在資料遺失的時候採用，特別是在資料鏈結層。然而，因為無線通信系統有眾所周知的傳遞問題，如訊號衰落，多徑傳播，訊號被遮蔽和干擾的問題，而這些都會影響工業網路通訊中所要求的即時性問題。例如在 [13] 的文獻中，作者說明了叢集式的空間來分散干擾也是解決工業無線網路的核心問題，並且通過無線網路來提供工業通訊中的即時性的要求在工業網路中是必要性的。

反觀在可見光通訊中，可見光的光譜頻寬比 RF 頻譜大且也較無限制並可以免費使用。如 [14] 的文獻中所敘述，可見光通訊可以達到比無線網路大約 1000 倍的資料傳輸密度，因為可見光的範圍是在一個緊湊的照明區域，但無線網路的 RF 射頻卻趨於分散因此較易造成干擾。因此可見光通訊可以在一個非常高的資料傳輸速率，低干擾，高帶寬的設備和高強度光輸出來實現。然而無線網路的 RF 是不可見的，使得在需要快速與穩定的工業通訊網路上安排更加複雜，然而，因為工廠內本來就需要有照明基礎設施，因此較適合在工廠的室內環境來實現。而且，在可見光通訊上有幾種常用的數位調變法，如 IEEE 802.15.7 工作小組初稿中訂定的最簡單的開關鍵入 (On Off Keying, OOK)，載波的振幅對應於兩個數位狀態之一，而 OOK 的應用之一是摩斯電碼 (Morse Code)。而以傳輸速率言，如同 [8, 9] 中所敘述可以達到 96Mbit/s。然而，可見光的傳送端是個 LED 的光源因此有光束寬度的問題，若把 LED 傳輸光源的密度增加，可能會讓接收端收到其他 LED 光源的資料而造成多路徑失真問題導致干擾而降低的傳輸的性能。也因為 LED 可見光通訊是屬於單向傳輸，所以為增加傳送的穩定與即時性，以及避免造成多路徑失真問題，我們建議使用可見光通訊與無線網路整合來提高網路的穩定度與避免干擾的問題。

參、網路架構

在這個章節先對可見光通訊的實體層與資料鏈結層先做個介紹後，我們再提出網路鏈結層的保護機制以應用在工業通訊上傳輸的穩定度。如圖二所示，我們使用開放式系統連接模型（Open System Interconnection, OSI）來示意可見光通訊的資料傳輸過程。



圖二：光通訊的網路資料傳輸示意圖

一、光通訊的實體與資料鏈結層

首先，在可見光的通訊架構中，可分為兩個部分，一個發送端的部分而另一個是接收端的部分。在發送端的部份，我們透過控制 LED 來傳送工業通訊的控制與流程訊號，而接收端的部分，是使用矽光電二極體(Photo Diode)來接收訊號。在發送端的部分，可以使用任何類型的 LED，但必須具有物理層 (PHY) 和數據鏈路層 (DLL) 才能並用於照明和通訊的功能。

在實體層方面，如圖二所示，它定義了電氣和硬體的規格設備之間的關係，即一個設備的訊號透過可見光發送到另一個接收裝置。而在 IEEE802.15.7 規範定義了 7 種顏色通道中的 VLC 物理層，而從顏色通道波段的接收功率就會直接影響到的資料的調變與解調變。其中雜訊比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 是直接與瞬間接收功率的平方成正比，而 SNR 的偏差會直接影響可見光系統的資料傳輸速率。在實體層中，有多種高資料速率的調變的方式，如 Color Code Modulation (CCM), High Hamming Weight code (HHW), On Off Keying (OOK) and

VPPM (Variable PPM)。其中 Reed Solomen codes [15] 可以用來前向錯誤碼更正並在 96 Mbit / s 的資料傳輸速率使用 OOK 或 VPPM 調變方式，然而需要特定的 120 MHz 以上的光學變動頻率實現，但以目前 LED 光學設備大部份都不支援。

在資料連結層方面，其中的資料鏈路層 (DLL) 可分為兩個子層，第一子層為無線光通訊的邏輯連結控制層 (Optical Wireless Logical Link Control, OWLLC) 和無線光通訊媒介存取控制層 (Optical Wireless Media Access Control, OWMAC)。這樣的區分原則是基於在 IEEE802.15.7 標準中所使用的架構，而且透過這樣的架構可以讓不同的網路技術之間的運作變得更加容易。

- A. 無線光通訊的邏輯連結控制層(OWLLC)：該層主要是在網路上的本地設備之間的邏輯鏈路的建立和控制，它提供網路層之上的服務並隱藏 DLL 的細節，以允許不同的技術與上層的網路能無縫合作。
- B. 無線光通訊媒介存取控制層(OWMAC)：該層主要是提供有可能使一些終端或設備的尋址功能和訊號埠接入與控制機制。實現多個終端或設備間的鏈結。該模組可提供半雙工，全雙工或廣播通訊服務。

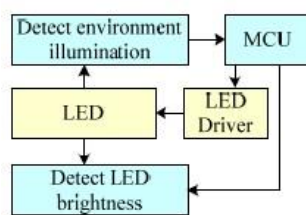
肆、機制設計

在目前的工業的環境當中，可見光通訊與無線網路訊號都有可能因為人為或天然災害因素而導致工業設備無法傳送或接收到訊息，因而導至工廠設備暫停，但這生產線上的暫停可能會造成工廠的鉅額損失。因此我們提出一個網路連結保護機制，使用無線網路來當做備用的網路以保持工廠的正常運作。因為可見光的強度是可以測量強度的資料並加上過去曾發生鏈路斷線的統計值就可以透過實體層與資料鏈結層來通知上層網路發送無線網

路訊號。因此，從實體層接收到的訊號強度，與無線光通訊的邏輯連結控制層的鏈路斷線統計值就可以了解哪些鏈路將由無線網路接管來運作，而被接管的可見光通訊封包就會選擇被丟棄。反之亦然，若無線網路訊號因為干擾而造成資料連結層的封包大多被捨棄，則可見光通訊就會被選擇接管無線網路通訊的部份。

A. 自動燈源控制機制

LED 的光輸出與電流的大小有直接關係，因此電流較小而 LED 光源也會變暗因此會影響資料傳送速率與穩定度，然而，電流過大則會造成 LED 壽命縮短。因此，在 LED 的硬體設計上，我們考慮把 LED 的硬體分成幾個部分，分別為 LED 光源，LED 環境照明的檢測驅動器與 LED 的亮度微控制器。我們使用 SMT 和低功率白光 LED 作為光源，因為那麼不僅將亮度符合我們的要求而且可達低散熱。LED 環境照明的檢測驅動器有一個可調恆流源電路，該電路既可以接受的 PWM 信號輸入來自動改變亮度。LED 的亮度的強度值作為亮度信號反饋到 MCU 確定發光或衰減的量。



圖三：自動燈源控制機制

B. 無線光通訊媒介存取層封包控制機制

我們考慮的無線光通訊媒介存取層控制機制是基於在 IEEE802.15.7 標準中，可見光的媒介存取層是有分散式協調功能 distributed coordination function (DCF)。因此，它會有要求傳送 request-to-send (RTS)，清除重送 clear-to-send (CTS)，and 資料認可 data acknowledge (ACK)

的順序。並且在得到第一個封包後到下一個傳送封包間有一個短暫訊框空間 short inter frame space (SIFS)。因此，媒介存取層的內容將會是

$$COCC = tRTS + tCTS + 3tSIFS \quad (1)$$

其中 $tRTS$ 和 $tCTS$ 是在 RTS 與 CTS 所耗損的時間。而 $tSIFS$ 指的是 SIFS 的耗損時間，因此藉由 COCC 封包接收的時間就可以了解目前在無線光通訊媒介存取層的封包存取狀況是否有延遲的現象。

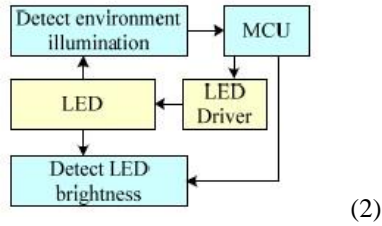
C. 貝氏定理

在概率論和統計學，貝氏定理是一種重要的條件概率的數學運算結果。當應用涉及的貝氏定理的概率就可以具有量化概率解釋。在這些解釋之一，該定理就會被直接用作特定的方法來統計推論的結果。特別的是，以概率解釋的貝氏定理會用來表達一種主觀信念的程度與解釋的證據。

1. 在貝氏定理的統計中，我們假設我們的數據資料 x_1, x_2, \dots, x_N 遵循一個 $F(X|\theta)$ 分佈，並由一些固定但未知參數 θ 決定。這推論的目的就是要做一個關於這個參數的聲明。

2. 在貝氏定理的統計中，我們認為，該參數是一個隨機變量。我們的目標是使其與分配與條件觀測數據相關聯。在進行實驗之前，我們先總結對這隨機參數 θ 的密度的分佈，與 $g(\theta)$ 的知識。

3. 一旦我們觀察到的我們認知的數據，我們會更新對這使用貝氏規則的參數，並通過一個後驗分佈的方式描述了我們的認知。



4. 正如當我們一同合作，該功能下的值就不是那麼重要，所以我們經常可以忽略很多常數量，所以可以進行推斷：

$$post(\theta|x) \propto f(x|\theta) * g(\theta) \quad (3)$$

伍、結論與未來方向

近年來，無線網路在工業上的應用極具吸引力，並希望可以在工業通訊的建置與系統維護上的助益。然而，工業通訊中所要求的即時性主要的含義上是要對工廠控制機器中需要較快速並精準的遞送控制資料。在這種類型的應用中，即時性就會被在工業通訊上被認為是性能的指標以評價是否適用於工業網路上，但相對而言，無線通信系統有眾所周知的傳遞問題，如訊號衰落，多徑傳播，訊號被遮蔽和干擾的問題，而這些都會影響工業網路通訊中所要求的即時性。因此本文提出一個網路連結保護機制，使用可見光與無線網路通訊的合作機制來保持智慧工廠內通訊的正常運作，並在未來可以使用無線工業乙太網路來實作。

參考文獻

- [1] "Industrial communication systems," in The Industrial Information Technology Handbook, R. Zurawski, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005, Sec. 3, pp. 37.1–47.16.
- [2] T. Sauter, "The continuing evolution of integration in factory automation," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 10–19, 2007.
- [3] T. Sauter and M. Lobashov, "How to access factory floor information using Internet technologies and gateways", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 7, no. 4, pp. 699–712, Nov. 2011.
- [4] J. R. Moyne and D. M. Tilbury, "The emergence of industrial control networks for manufacturing control diagnostics and safety data," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 29–47, Jan. 2007.
- [5] F. Benzi, G. Buja, and M. Felser, "Communication architectures for electrical drives," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 1, no. 1, pp. 47–53, Feb. 2005.
- [6] S. Vitturi, L. Peretti, L. Seno, M. Zigliotto, and C. Zunino, "Real-time Ethernet networks for motion control," Comput. Stand. Interfaces, vol. 33, no. 5, pp. 465–476, Sept. 2011.
- [7] Visible Light Communications Consortium. <http://www.vlcc.net/>
- [8] IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>.
- [9] D. O'Brien, H. L. Minh, L. Zeng, G. Faulkner, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won, "Indoor Visible Light Communications: Challenges and prospects", Proceedings SPIE, vol. 7091, 2008.
- [10] HART Field Communication Protocol Specification (2007)., HART Communication Foundation Std., version 7.4, revised in 2012, <http://www.hartcomm.org/>
- [11] Wireless Systems for Industrial Automation, Process Control and Related Applications, International Society of Automation (ISA) Standard ISA-100.11a, 2009.
- [12] [10] Zigbee Alliance. (2012). Zigbee 2012. <http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx>
- [13] Willig, "Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 4, no. 2, pp. 102–124, May 2008.
- [14] Pure VLC, "Visible Light Communication: An introductory guide", [online] www.purevlc.net, 2012.
- [15] Sridhar Rajagopal, Richard D. Roberts, Sang-Kyu Lim, "IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support", IEEE Communications Magazine, Vol. 50, Issue: 3, pp: 72-82, 2012.