


國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

無線網路控制系統

之訊息估測與網路流量監控



Message Estimator and Traffic Monitor
for Wireless Network Control System

研究生：張哲維

指導教授：徐保羅 博士

中華民國九十八年七月

無線網路控制系統
之訊息估測與網路流量監控
Message Estimator and Traffic Monitor
for Wireless Network Control System

研究生：張哲維

Student：Che-Wei Chang

指導教授：徐保羅 博士

Advisor：Dr. Pau-Lo Hsu



A Thesis
Submitted to Department of Electrical and Control Engineering
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao-Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Electrical and Control Engineering
July 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

無線網路控制系統之訊息估測與網路流量監控

研究生：張哲維

指導教授：徐保羅 博士

國立交通大學 電機與控制工程學系

摘要

網路控制系統特有的資料遺失、時間延遲對於系統效能有很大的影響。本論文提出利用訊息估測與網路流量管制的設計，可使用在以無線網路作為傳輸媒介的網路控制系統。本論文在輸出回授端採用時間觸發，具有高取樣頻率、閉迴路即時控制的優點。再透過實驗探討網路延遲時間、資料遺失率與取樣週期的關係，找出系統最佳取樣週期，作為網路遠端控制的設計。

在訊息估測方面，本研究分析不同的估測法則和網路傳輸環境對系統效能的影響，根據所使用的網路特性，選擇泰勒估測器，而在網路壅塞時，利用智慧訊息估測 (Intelligent message estimator)，結合泰勒估測、最小平方法與沿用前筆資料，成功解決在泰勒錯誤估測的問題，實驗結果顯示，以泰勒估測處理可降低輸出誤差約 30.1%，而在網路壅塞時，以 IME 估測可降低輸出誤差約 74.7%。

最後在網路流量監控方面，本論文針對當網路負載過大導致系統不穩定的問題，提出根據目前網路流量所成的資料遺失率來做取樣頻率的調整，實現於網路遠端監控系統，藉此降低資料遺失率約 10~15%，以提升系統控制效能與穩定度與容忍網路環境的穩健性。

Message Estimator and Traffic Monitor for Wireless Network Control System

Student : Che-Wei Chang

Advisor : Dr. Pau-Lo Hsu

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The data dropout and time delay in the network control system (NCS) affect its control performance greatly. In this thesis, the message estimator and the traffic monitor designed for the wireless network control system (WiNCS) are proposed. Instead of the event-trigger NCS, the output feedback signal is sent by the time trigger and the received node implemented with a message estimator to compensate for the lost data. Different estimators in the WiNCS have been discussed and results indicate that the Taylor estimator is chosen with easy implementation on a light-traffic network communication. However, with a heavy network load, the intelligent message estimator (IME) is suitable to cope with the unstable problem in the Taylor estimator. Experiment results show that the Taylor estimator reduced the output error 30.1 % with a light network load, and the IME reduced the output error 74.7% with a heavy network load. Finally, when the network traffic is too heavy to the feedback estimator, the sampling time was adjusted according to the data dropout rate, obtained from the network traffic monitor, to further decrease the dropout rate almost 10~15% to achieve a robust NCS under different environments.

誌謝

能夠完成本論文，要感謝在這段歲月所有幫助我、支持我的人，首先要感謝指導教授徐保羅 博士不厭其煩的教導，不時地導正我的研究方向與方法，在我屢遭瓶頸與挫折時，適時地鼓勵我，引領我至正確的道路，順利取得碩士學位。在此，獻上我最誠摯的敬意與感謝。同時誠摯地感謝口試委員王伯群 博士、連豐力 博士和蕭得聖 博士在論文上面的指正，給予切要且寶貴的建議，讓本論文可以更加完善。

感謝博士班謝鎮洲學長、幸琮政學長、賴建良學長、黃煒生學長給我的意見和幫助，特別是同為網路組的鎮洲學長與建良學長，沒有你們在最後時刻為我勞心勞力的付出，是不會有本論文的誕生，以及實驗室的同學正忠、任斌、子強、煒智、孟哲，學弟士文、子期、旻慶在學業上的互相切磋與指教，生活上的分享與協助。特別感謝高中同學吳國維在口試前的禱告，平復我緊張的心情。

最後，最要感謝的是我的家人，爸爸、媽媽、妹妹、弟弟，在這段歲月裡，包容我的任性，作為我的支柱，在徬徨無助時，帶給我希望，在軟弱無力時，給予我堅強，這個家是最好的避風港。能夠將本論文獻給我的父親 張鳳宜先生、母親 黃秀真女士，是我的榮幸與驕傲。感謝你們的付出與無聲的關懷，讓我可以專心在研究和學業上面。

再次感謝所有支持和幫助過我的家人及朋友，希望這份喜悅可以與你們一同分享，你們的關懷是我前進的力量，在此只能以簡單的一句話道盡我心中無限的感激，「謝謝你們大家」。

目 錄

中文摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目 錄.....	iii
表 目 錄.....	v
圖 目 錄.....	vi
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 研究背景與發展概況.....	2
1-3 問題描述.....	4
1-4 研究方法.....	4
1-5 論文架構.....	5
第二章 整合有線與無線的網路控制系統.....	6
2-1 CAN (Controller Area Network).....	6
2-1-1 CAN 網路協定簡介.....	6
2-1-2 CAN 通訊協定.....	7
2-1-3 CAN 訊息封包格式.....	10
2-2 IEEE 802.11.....	15
2-2-1 IEEE802.11 的網路架構與運作機制.....	16
2-2-2 IEEE802.11 的操作模式.....	18
2-2-3 TCP/IP 通訊協定.....	18
2-3 整合有線與無線的網路控制系統.....	20
2-3-1 網路實驗平台.....	20
2-3-2 TCP/IP 與 CAN 封包轉換.....	21
第三章 時間觸發為基礎的無線網路控制系統.....	24
3-1 網路控制系統簡介.....	24
3-2 取樣週期、時間延遲、資料遺失探討.....	25
3-2-1 時間延遲.....	25
3-2-2 資料遺失.....	27
3-3 時間觸發為基礎的無線網路控制系統.....	29
3-4 無線網路控制系統實驗.....	30
3-4-1 網路延遲時間量測方法.....	30
3-4-2 資料遺失率測定方法.....	31
3-4-3 網路控制系統的延遲時間實驗.....	32
3-4-4 網路控制系統的資料遺失率實驗.....	34
3-4-5 網路控制系統的控制效能探討與實驗.....	36

第四章 回授訊息估測	39
4-1 回授估測	39
4-2 估測器介紹	40
4-2-1 泰勒估測	40
4-2-2 最小平方法估測	42
4-2-3 估測器的選擇	43
4-3 回授估測控制效能實驗	44
4-4 智慧訊息估測器(Intelligent message estimator, IME)	49
4-5 智慧訊息估測實驗	52
第五章 網路流量監控	57
5-1 網路環境對資料遺失率之影響	57
5-2 網路流量監控	59
5-2-1 Mode 1 以網路流量作切換指標	60
5-2-2 Mode 2 以網路流量與誤差作切換指標	62
5-3 切換取樣頻率之模擬與實驗	64
第六章 結論與未來發展	70
6-1 結論	70
6-2 未來發展	71
參考文獻	72



表 目 錄

表 3.1	IEEE 802.11 + CAN 的平均延遲時間(單位： ms)32
表 3.2	IEEE 802.11 + CAN 處理後的平均延遲時間與標準差(單位： ms)33
表 3.3	IEEE 802.11 + CAN 的平均資料遺失率(單位： $\%$)35
表 4.1	各種估測法則的優缺點比較43
表 5.1	不同切換法則下，平均遺失率與平均輸出誤差之比較65
表 5.2	不同取樣週期模式下，平均遺失率與平均輸出誤差之比較67



圖 目 錄

圖 2.1	CAN-OSI 網路模型.....	8
圖 2.2	節點優先權仲裁.....	10
圖 2.3	標準 CAN 資料欄框格式.....	11
圖 2.4	擴展 CAN 資料欄框格式.....	11
圖 2.5	擴展 CAN 遙控欄框	13
圖 2.6	Wireless network-OSI 網路模型.....	16
圖 2.7	IEEE 802.11 家族與 OSI 模型的關係.....	17
圖 2.8	實驗系統架構圖.....	20
圖 2.9	(a)實驗控制平台 (b)Panasonic AC Motor	21
圖 2.10	Server 架構圖	22
圖 2.11	封包轉換圖	23
圖 3.1	網路控制系統方塊圖	25
圖 3.2	延遲時間對系統影響圖(delay time = 200 ms).....	26
圖 3.3	延遲時間對系統影響圖(delay time = 1000 ms).....	26
圖 3.4	(a)事件觸發(event-trigger)示意圖 (b)時間觸發(time-trigger)示意圖	27
圖 3.5	資料遺失示意圖.....	28
圖 3.6	時間觸發為基礎的網路控制系統方塊圖	29
圖 3.7	延遲時間計算	30
圖 3.8	Buffer 存取示意圖	31
圖 3.9	IEEE 802.11+CAN 的平均延遲時間與取樣週期關係圖.....	34
圖 3.10	IEEE 802.11+CAN 的平均資料遺失率與取樣週期關係圖	35
圖 3.11	延遲時間對馬達位置控制影響實驗圖	38
圖 3.12	不同取樣週期下，網路控制系統的輸出誤差	38
圖 4.1	不同時間延遲、估測方式的取樣結果圖	39
圖 4.2	網路延遲時間量測與取樣時間	44

圖 4.3	(a)控制命令端估測與(b)回授命令端估測的輸出響應模擬結果	45
圖 4.4	加入回授估測的系統方塊圖	46
圖 4.5	延遲時間對馬達位置控制影響實驗圖 (a)未加入輸出回授估測 (b) 加入輸出回授估測.....	47
圖 4.6	網路控制系統的輸出誤差加入回授估測的比較	48
圖 4.7	不同頻率之控制命令下估測器對輸出誤差之改善	49
圖 4.8	不同的平均 DQ 值在相同資料遺失率(a)資料遺失分散 (b)資料遺失密集	50
圖 4.9	泰勒估測器與 one-delay 估測在不同平均 DQ 值的輸出誤差模擬.....	51
圖 4.10	IME 實現架構圖	52
圖 4.11	不同估測器在網路使用量為輕載下的模擬結果 (a)未加估測器 (b)泰勒估測器 (c) IME 估測.....	53
圖 4.12	不同估測器在網路使用量為重載下的模擬結果 (a)未加估測器 (b)泰勒估測器 (c) IME 估測.....	54
圖 4.13	(a)沒有加入估測、(b)泰勒估測與(c)IME 的實驗輸出響應比較	55
圖 4.14	不同估測器，不同取樣週期，平均輸出誤差之實驗結果	56
圖 5.1	無線網路使用量示意圖	57
圖 5.2	無線網路傳輸環境對資料遺失率之影響	58
圖 5.3	網路環境、取樣頻率對系統輸出誤差之影響	59
圖 5.4	網路控制系統加入流量監控之方塊圖	60
圖 5.5	監控網路流量與切換取樣時間機制的程式流程圖	61
圖 5.6	網路控制系統加入流量監控與誤差監控之方塊圖	63
圖 5.7	監控網路流量與誤差之切換取樣時間機制程式流程圖.....	63
圖 5.8	(a)未加切換取樣週期機制、(b)加入切換取樣週期機制(mode 1)與(c) mode 2 之輸出響應模擬.....	64
圖 5.9	(a)無切換機制與(b)有切換機制之輸出響應實驗比較以及(c)系統取樣	

週期68

圖 5.10 網路使用量在輕載與重載下，不同取樣週期模式之輸出誤差69



第一章 緒論

1-1 研究動機

近年來將運算、通訊和控制單元，透過網路作整合，以方便系統的建立與管理，進而提高系統的整合度與便利性，乃是控制系統的一大趨勢。也因為網路化的日益普及化，各種應用於不同領域的網路協定也因應而生，常見於工業應用的協定如：WorldFIP、Profibus、SERCOS、CAN 等；其他如 Ethernet、無線網路等協定，也廣泛使用於各種應用上，特別是無線網路已是未來網路通訊的發展重點。

利用網路做為運算、通訊和控制單元的媒介，可以在遙遠的距離內控制與監控特定的系統，如果使用無線網路，更可以節省佈線的複雜度與成本，且具有高機動性，所以網路控制系統具有節省配線、系統擴充性增加、減少安裝和維護成本、方便監控等優點。但也有許多所要面臨的問題，首先便是網路傳輸所帶來的影響(time delay)、網路引起的訊息傳遞延遲與訊息遺失(data dropout)、訊息排程、節點間的時脈不同步。這些種種問題，任何一個均可能讓控制效能降低，甚至讓受控體變成不可控的狀況。

為了研究這些問題對網路控制系統的影響，本研究針對訊息遺失所造成的控制效能低落甚至導致系統不穩定的問題，提出以時間觸發(time trigger)作為網路封包傳輸依據，在針對未能及時接收到的輸出回授訊號作估測補償，藉此提高控制效能，再以 wireless network 做為控制系統之間的通訊網路，針對馬達作位置控制實驗，分析探討回授估測對控制系統效能的影響。根據實驗結果，針對網路流量壅塞所引起的高資料遺失率(data dropout rate)，讓連續遺失資料封包的筆數遠大於估測器的階數的問題，試圖建立一套可監控網路傳輸量與調整取樣頻率的架構，避免網路負載過大時，仍有大量資料流入網路，導致資料遺失率過大，並加以驗證。監控網路傳輸流量的架構可以提升穩定度與容忍網路環境的穩健性，而良好輸出回授估測，可以提高系統控制效能。

1-2 研究背景與發展概況

隨著網路的蓬勃發展，加上近年來最熱門的領域-無線網路的研究，讓許多學者與研究人員紛紛投入網路通訊這領域，讓網路概念的延伸與應用處處可見，更可以將網路的概念應用在控制理論上，因此網路控制系統的想法便因應而生，而針對網路控制系統所相關的研究課題與問題也紛紛提出[1]。一般網路控制系統，雖然有網路化的優點，但往往需要犧牲一點控制效能，以下針對一些足以影響控制系統效能的問題，整理後可歸類成下列幾項：

- 網路傳輸所造成的延遲(time delay)[2-6]

一般的理想控制系統，訊號在傳輸時，其傳輸時所花費的時間極小，通常可以忽略不計，但當控制系統利用網路做為傳輸介面時，由於網路先天上的頻寬限制與網路通訊協定限制下，造成訊號有一段不可忽略的傳輸延遲時間。所以在系統的等效模型中，需加入一個時間延遲項，而此時間延遲會造成系統的相位象限(phase margin)下降，導致系統不穩定，現在在此方面，已有相關理論解決延遲時間對系統造成的不良影響。

- 網路引起的訊息遺失(data dropout)[7-9]

網路在傳輸的過程中，有可能會發生封包遺失的情形，一般來說，大部分的網路通訊協定都有防止與解決封包遺失的機制，通常是避免資料封包碰撞(collision)以及封包遺失後等候節點再一次重傳，資料封包的遺失，會造成控制系統的命令遺失，等候節點再一次重傳的時間會增加延遲時間，有人提出使用泰勒展開法來估測遺失的命令[9]，使得系統不會因為命令遺失而造成系統控制效果不佳。

- 訊息排程(network scheduling)[10,11]

在網路排程方面，[11]提出 adjustable priority scheme 的排程方法，藉由累積 CAN 網路上訊息一段時間的傳輸狀況後，逐漸調整訊息優先權，經由此方法改變網路的排程可以有效的提昇網路傳輸的效率。

● 節點間的時脈不同步(jitter)[12,13]

在系統取樣週期較小的架構下，時脈漂移造成節點間的時脈不同步，將導致大量的系統資料遺失量，由此可知，時脈同步對於網路系統是不可忽略的因素。關於網路時脈同步的方式，可由系統架構、網路協定等層面解決，以系統架構來說，可利用額外的硬體接線作為同步線路，以此作為節點執行的基準；在網路協定層面，以 CAN bus 為例，透過同步物件的傳送，提供整體網路的基準時脈。這兩類作法各有其優缺點，前者為獨立於原本網路架構之外的作法，可免除網路傳輸的干擾，且經由硬體線路可達到極高的準確度，但正因為是獨立於網路之外，所以必須在系統建構時加以考量，若要應用於已建立的系統之上，就必須重新規劃系統架構；後者則是基於原先的網路協定所衍生的方式，主要優勢在於可經由軟體規範達成而不需改變系統架構，所以，實做上的可行性較高且提高系統維護的便利性，但由於是透過網路封包傳遞的方式，傳輸狀況的影響就無法忽略，傳輸速率、延遲時間和封包碰撞等等因素，都可能影響其效果而必須納入考量，以 CAN bus 為例，由於封包碰撞可由 CAN 的重傳機制避免，而將主要考量放在傳輸延遲上，因此，賦予同步物件極高的網路優先權，降低傳輸的等待時間，便於同步物件順利傳送，以達到較好的同步效果。

● 取樣週期(sampling period)[14,15]

在數位控制系統下，控制效能會隨著取樣週期變小而變好，但將網路加入控制系統當中，取樣週期則不可以小於某個極限值，如果小於該極限值，反而控制效能會下降，主要原因是因為當取樣週期變小的情況下，所要傳輸的資料量變多，而當網路的頻寬不足以傳輸這些資料量時，便會造成網路塞車、負載量增大，所需要傳輸的資料，必須等待網路允許通過，方可傳輸，造成傳輸時間延遲，甚至資料損失，導致控制效能下降。[16,17] 提出利用動態調整取樣頻率的方法，當網路負載大時，取樣週期下降，減

少傳輸資料量，[18]提出以動態調整取樣頻率為基礎，其適應性控制器的設計。

- QoS(quality of service)[19]

此因素會直接影響到網路控制系統的控制效能，其特性主要受訊息傳輸延遲時間、訊息遺失率、訊息來源的正確性所影響，並非一個可量化的參數。

1-3 問題描述

1. 一般網路控制系統其輸出回授是以事件觸發作為傳輸判斷，用於多半用在低精確度控制，但其無法及時回授感測器資料，而採用時間觸發，會產生資料遺失率過高，導致控制效能下降的問題。
2. 無線網路控制系統其特性受無線網路環境的影響，如何找出網路延遲時間、資料遺失率與取樣週期的關係，藉此決定控制系統的取樣週期。
3. 無線網路控制系統是以無線網路作為傳輸媒介，網路負載受外在環境影響，所以在網路環境壅塞的情況，會有系統不穩定的問題。

1-4 研究方法

1. 本研究在輸出回授端採用時間觸發，即每一固定取樣週期回傳回授訊號給控制端做處理，相較於事件觸發，具有高取樣頻率且閉迴路即時控制的優點。
2. 本研究在接收回授資料端加入估測器，以補償未能即時接收的資料，讓系統維持閉迴路控制，且經由估測器可以獲得接近於真實輸出訊號的資料，以減少輸出誤差。
3. 本研究以實驗的方法，探討網路延遲時間、資料遺失率與取樣週期的關係，找出最佳取樣週期，作為網路遠端監控設計。

4. 本研究對無線網路流量作監控，根據網路流量來做取樣頻率的調整，藉此降低資料遺失率，以提升系統控制效能與穩定度。

1-5 論文架構

本論文共分為六章，第一章旨在說明研究動機與目的、研究背景與發展概況回顧、敘述所面臨的相關問題、本論文的研究方法、以及論文架構。第二章先對 CAN、IEEE 802.11 加以說明，包括通訊協定以及訊息封包格式，並介紹 CAN 與 IEEE 802.11 整合與人機介面。第三章則先介紹網路控制系統，分析實驗環境，在不同的傳輸條件下進行實驗，探討取樣週期、時間延遲、資料遺失的關係，歸納出影響網路系統的相關因素。第四章則為說明回授估測器，包括回授估測架構、估測器的介紹與選擇，以實驗驗證其可行性，再說明為何使用智慧訊息估測(Intelligent message estimate)以及其相關實驗結果。第五章則為網路流量監控說明，包含如何決定系統最佳取樣頻率，切換取樣週期機制的設計與程式架構以及相關實驗結果。第六章則為本論文的結論以及未來的發展方向。

第二章 整合有線與無線的網路控制系統

本章先介紹 CAN 的通訊協定與資料傳輸格式、無線網路 IEEE802.11 的網路架構與工作方式、TCP/IP 通訊協定，最後再說明整合 CAN 與 IEEE802.11 的實驗平台。

2-1 CAN (Controller Area Network) [20]

2-1-1 CAN 網路協定簡介

CAN 全名為 Controller Area Network，起源於 1980 年代後期，由德國 Robert Bosch 公司所制定的一種具有高度安全且支援即時分散式控制的通訊協定，最高傳輸速度可達 1M bit per second (bps)。到 1990 年代其通訊協定逐漸成型，相關的 IC 元件紛紛被推出，才被廣泛地應用於工業界。CAN 原先是應用在汽車電子系統，用來連接汽車內防鎖死煞車系統(ABS)或是引擎控制與感測單元等的電子元件，以簡化車內複雜的硬體配線；但由於 CAN 提供可靠快速的資料傳遞，適合用在即時系統(real-time system)且價格低廉，因此，發展至今也被廣泛運用在各類的控制系統上。目前 CAN 已成為國際標準規格 (ISO11898)，CAN 在場域匯流排 (field bus) 的應用已有 Honeywell 的 SDS 及 Allen-Bradley 的 DeviceNet[20]。

CAN 根據其傳輸協定，具有以下特點：

- 資料訊息具有優先權 (priority)
- 優先權的仲裁 (arbitration) 為非破壞性
- 彈性的架構
- 採用廣播的方式 (multicast)，做時序同步的動作
- 任一節點皆可主動發出訊息 (multimaster)
- 未傳送成功的訊息會自動重新傳送
- 錯誤檢查

接下來，2-1-2 節將介紹 CAN 的通訊協定，2-1-3 節介紹 CAN 的訊息封包格式與錯誤處理機制。

2-1-2 CAN 通訊協定

CAN 通訊協定方面，我們分成以下三部分介紹：網路架構、傳輸方式、網路仲裁。

CAN 網路架構：

CAN 網路架構，可分為 CAN 對象層(the CAN-object layer)、CAN 傳輸層(the CAN-transfer layer)、實體層(the physical layer)。

對象層的功能為：

- 尋找被發送的訊息
- 從傳輸層中挑選所需的訊息
- 提供應用層所需的硬體介面

傳輸層主要是定義通訊協定，其功能為：

- 控制訊息欄框的結構
- 訊息的仲裁
- 錯誤偵測
- 錯誤標定
- 故障界定
- 發送、接收訊息的時機

實體層則是電子訊號的傳遞與硬體接線。

若由 ISO/OSI 網路模型，將 CAN 的通訊協定加以歸類，其通訊協定僅包含 OSI 模型中的資料連結層(Data Link Layer)和實體層(Physical Layer)兩個部份，圖 2.1 為 CAN 在 OSI 定義下，各個部份的功能與定義。

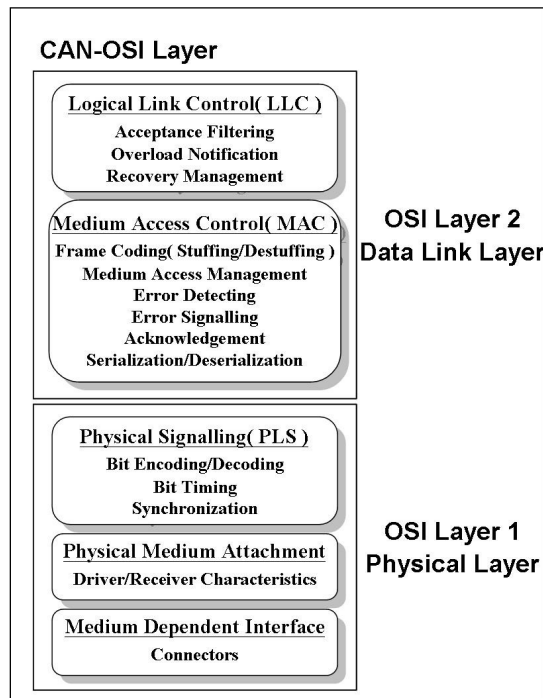


圖 2.1 CAN-OSI 網路模型

CAN 傳輸方式：

這部份針對 CAN Bus 在網路傳輸方式進行說明：

- 傳輸速率(bit rate)

在系統中其傳輸速度是固定的，規格書中最高傳輸速率可達 1Mbps，在 40m 以內的傳輸距離，隨著距離增長，可達到的傳輸速率也跟著下降，例如距離拉長到 400m 時，只能用 100kbps 的最高速率傳輸。

- 傳送節點(transmitter)和接收節點(receiver)

當任一節點取得網路使用權，並進行資料傳送時，此一節點稱為傳送節點，網路中其餘節點稱為接收節點。

- 傳送節點對網路的偵測

傳送節點在進行資料傳送的同時，也偵測網路上出現的位元值是否與所送出的相同。

- 網路存取方式

由於 CAN 採用多重節點隨機存取(random access)網路，訊息封包碰撞(collision)的情形在所難免，因此，CAN 採用的解決方法是 CSMA/CD +AMP (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection and Arbitration on Message Priority)，每個節點進行傳輸之前，先進行網路監聽，確定網路閒置後才開始傳輸，但並無法完全避免碰撞的問題，一旦碰撞發生將進入優先權仲裁(Priority Arbitration)，決定網路使用權，優先權較低者喪失網路使用權後，在下次網路閒置時，自動重新訊息的傳遞。這樣的機制決定了網路媒介的存取行為和網路封包的傳輸次序，因此，接著對此仲裁機制進行詳細介紹。

- 網路使用權的仲裁機制(Arbitration)

匯流排空間時，任何節點均可發送和接收資料，但當有兩個以上節點要傳送訊息時，網路上便發生封包碰撞的情形，此時便進入仲裁階段，仲裁的方式是將每個節點發送的訊息封包識別碼(identifier)，逐一進行位元比對，而當上述的兩種位元值同時被發送時，位元為 0 的為 dominant 位元，具有較高優先權，所以會被保留下來，位元為 1 的為 recessive 位元其優先權較低，將不會出現，因此，當所有發送節點對自己發送的位元值和網路線上的位元值比照時，如果線上的值和自己發送的相同，則繼續發送訊息，而如果發送訊息為 recessive 訊號，而線上為 dominant 訊號時，則此發送節點失去仲裁權，必須退出發送狀態，等下次網路閒置時再重新發送，以圖 2.2 為例，節點 1 和節點 3 先後失去仲裁權，節點 2 在此仲裁取得優先權，所以可繼續訊息的傳輸。由此可看出當識別碼越小，則擁有越高的優先權。

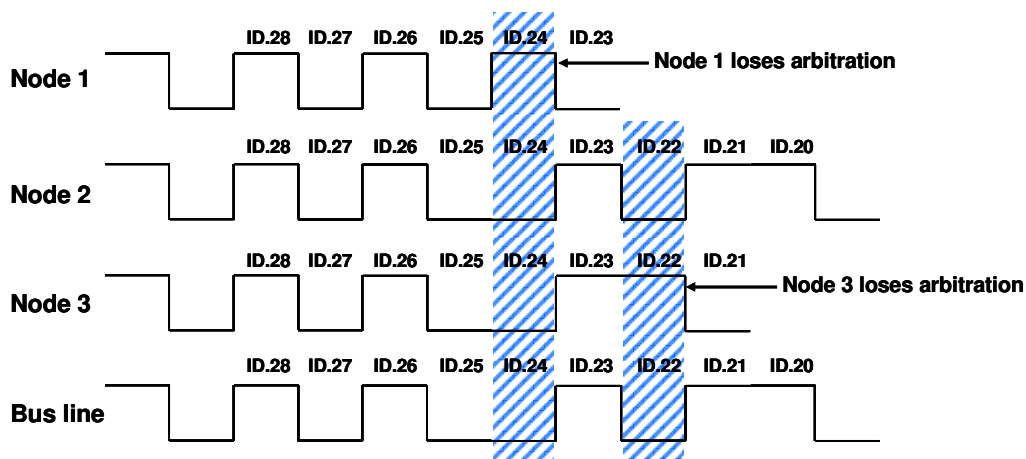


圖 2.2 節點優先權仲裁

2-1-3 CAN 訊息封包格式

關於 CAN 的封包格式，由 CAN 2.0A 和 CAN 2.0B 兩種規格所定義，兩者主要的差異在於訊息識別碼(Identifier)長度不同，前者定義的是 11 位元識別碼，為標準 CAN 格式；後者則是 29 位元識別碼，為擴展的 CAN 格式，此節所介紹 CAN 的各種欄框(Frame)格式，除了識別碼的定義之外，其餘的定義皆適用於兩種規格，而 CAN 的封包格式可分為資料欄框(data frame)、遙控欄框(remote frame)、錯誤欄框(Error Frame)和過載欄框(overload frame)。另外，兩個資料(或遙控)欄框或是資料欄框和遙控欄框之間都需欄框間隔(interframe spacing)加以區分。

在說明欄框前，先介紹 CAN 的填充/編碼(bit stuffing/coding)傳輸方式：當發送節點在傳送資料或遙控欄框的時候，若是傳送五個連續且相同位準的位元，則需在第五個位元之後加入一個相反位準的位元。接收節點在接收時會自動將這填充進來的位元給刪除，以得真正的訊息。錯誤欄框及過載欄框並不會經過位元填充的動作，而是以固定格式發送，因此，位元填充只適用於資料欄框與遙控欄框的部份區段：欄框起始、仲裁區、控制區、資料區和循環多餘碼區，各區段的意義將在接下來的部份說明，下面就分別說明各類欄框：

- 資料欄框(Data Frame)

當節點有資料要傳輸的時候，可透過資料欄框將資料發送到網路，所以，其訊息長度是所有欄框中最大的，也是格式最為複雜的，下圖是標準 CAN 的資料欄框格式(standard data frame)，圖是擴展 CAN 的資料欄框格式(extended data frame)，兩者的差異僅在識別碼的長度，因此，底下就以擴展格式為例，說明各段的意義：

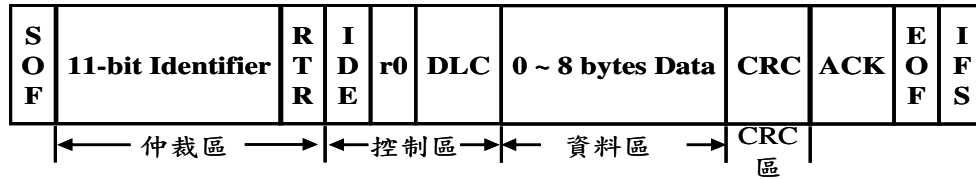


圖 2.3 標準 CAN 資料欄框格式

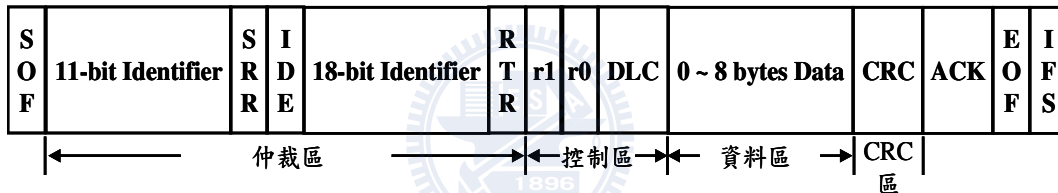


圖 2.4 擴展 CAN 資料欄框格式

- SOF(Start of Frame)

欄框起始，資料欄框及遙控欄框的起始，由 1 個 dominant bit 組成，當網路閒置的時候，藉由此位元的傳送，開始新的資料(遙控)欄框傳輸。

- Identifier

識別碼，用來決定訊息優先權並區分不同的資料(或遙控)欄框，識別碼越小的時候仲裁優先權越高，在標準 CAN 中識別碼為 11 bits，在擴展 CAN 中識別碼為 29 bits。

- RTR(Remote Transmission Request)

遙控傳輸請求，RTR 為 dominant bit 時，表示此欄框為資料欄框，當 RTR 為 recessive bit 的時，表示此欄框為遙控欄框。

- SRR(Substitute Remote Request)

替代遙控請求，在擴展 CAN 中用來取代標準 CAN 中的 RTR 位置，為一 recessive bit，當標準 CAN 和擴展 CAN 起衝突時，由於 SRR 為 recessive bit，根據 CAN 的仲裁方式，標準 CAN 的優先權大於擴展 CAN。

- IDE(Identifier Extension)

當此位元為 dominant 時，此訊息的識別碼為標準 CAN 的識別碼，當此位元為 recessive 時，此訊息的識別碼為擴展 CAN 的識別碼。

- r0, r1

保留位元，必須為 dominant bit。

- DLC(Data Length Code)

傳送資料的長度，由 4 個位元所組成。

- Data

欲傳送資料的存放地方，最少可傳送 0 個位元組，最多可傳送 8 個位元組。

- CRC(Cyclic Redundancy Check)

循環冗餘檢查，用來確認傳送資料是否正確，由 15 個位元組成。

- ACK(Acknowledgement Filed)

確認區，由 2 個位元組成，分別為 ACK Slot 和 ACK 確認邊界，一開始訊息送出去的時候都是 recessive bits，當匯流排上面有任何一個節點成功接受訊息，則將 ACK Slot 的 recessive bit 改成 dominant bit，如此一來，發送端可以藉由偵測 ACK Slot 來判斷訊息是否有正確被接收。

- EOF(End of Frame)

欄框終止，由 7 個 recessive bit 所組成，表示一個資料欄框的結束。

- IFS(Inter-frame Space)

欄框間隔，由 3 個位元組成，其用途主要是用來區隔資料欄框或是遙控欄框，以提供節點處理資料的時間。

- 遙控欄框(Remote Frame)

用來請求其他節點傳送所需要的資料，結構和資料欄框相似，但是有兩點不同的地方，第一點是遙控欄框 RTR 為 recessive bit，另外一點是遙控欄框是不帶任何資料的，其餘的格式皆與資料欄框相同，圖 2.5 為一擴展遙控欄框，值得注意的是，雖然資料長度被忽略，但仍應設定欲接收的資料長度。

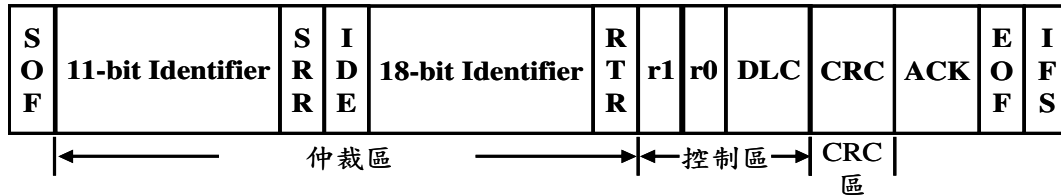


圖 2.5 擴展 CAN 遙控欄框

- 錯誤欄框(Error Frame)

當節點偵測到錯誤發生時，便以錯誤欄框通知各個節點，錯誤欄框由兩個部份所組成，第一個部份是錯誤旗標(error flag)，第二個部份為錯誤邊界(error delimiter)。錯誤旗標(error flag)有兩種形式，一種是由連續 6 個 dominant bit 所組成的主動錯誤旗標，另一種則是由 6 個 recessive bit 所組成的被動錯誤旗標，兩者的差異將在下節詳細說明。錯誤邊界(error delimiter)由 8 個 recessive bits 組成，當完成錯誤旗標的傳輸後，節點開始偵測網路線上的值，直到偵測到由 dominant bit 轉為 recessive bit 的過渡(transition)為止，表示此時所有主動反應錯誤節點都完成錯誤旗標的傳送，而開始發送錯誤邊界。當所有節點偵測到 8 個 recessive bit 之後，錯誤欄框即傳送完成。若在錯誤欄框期間又發生新的錯誤，則各節點會重新發出新的錯誤欄框。

- 過載欄框(Overload Frame)

過載欄框由過載旗標(overload flag)和過載邊界(overload delimiter)所組成，其格式跟錯誤欄相似，過載旗標由 6 個 dominant bit 所組成，過載邊界由

8 個 recessive bit 所組成，主要是為了替接收節點爭取處理資料的時間，節點會在三個情況下發出過載欄框：

1. 當接收端在下筆資料欄框或遙控欄框進來之前，需要一個延遲時間的時候。
2. 當節點在欄框間隔期間，偵測到 dominant bit 的時候
3. 當節點在錯誤邊界及過載邊界的第 8 個位元，偵測到 dominant bit 的時候。

CAN 錯誤處理機制：

CAN 對於錯誤的處理方式，是其提供可靠穩定傳輸的重要因素，主要可分為兩大類：錯誤偵測和錯誤頻繁節點的排除，前者經由檢驗訊息封包的各項細節，判斷其正確性，一旦發現錯誤便利用錯誤欄框的發送，使錯誤的訊息封包重傳；對於錯誤發生頻率過高的節點，則經由後者減少其對於網路的使用權，甚至禁止對網路的存取。



CAN 錯誤排除方式：

根據 CAN 的規範，將 CAN 網路中的所有節點，分成下列三種可能的工作狀態，單一節點只能處在其中一種狀態，而當錯誤發生時，隨著狀態的不同，所發送的錯誤欄框也有所不同。

- 主動反應錯誤(Error Active)

主動反應錯誤的節點可正常參與網路通訊，且在偵測到錯誤時，發送的是主動式錯誤旗標。

- 被動反應錯誤(Error Passive)

被動反應錯誤的節點可參與網路通訊，但在偵測到錯誤時，發送的是被動錯誤旗標。此外，此類節點在傳輸完一個欄框後，除了傳送欄框間隔，還必須額外送出 8 個 recessive bit，才能進行下一筆傳輸，此 8 個 recessive bit

稱為暫停傳輸(suspend transmission)，若在暫停傳輸期間，其他節點開始進行傳輸，則被動反應錯誤節點轉為接收節點。藉由暫停傳輸的方式，可有效減少此類節點對於網路的存取。

● 離線(Bus Off)

顧名思義，離線的節點不允許參與任何網路通訊，所有訊號輸出的部份全部停止，此類節點便不會對網路造成任何影響。

上列三種狀態的區分，在於節點錯誤次數的多寡。每個 CAN 節點都具有一個傳送錯誤計數器(transmission error counter)和一個接收錯誤計數器(receive error counter)，當節點偵測到錯誤，其對應的計數器便遞增，反之，節點完成一次傳輸或接收動作，對應的計數器便遞減。

2-2 IEEE 802.11[21]

無線網路相較於有線網路，主要有四個特色：

1. 網路的目的位址(address)不同於目的地點(location)

有線網路位置通常相當於一個地點，而無線網路隨主機的移動，不像有線具有定點的特性。

2. 網路架構的設計須考慮傳輸媒介

無線網路與有線網路的實體層有很大不同，

- 傳輸的兩點距離是有限制的，因為傳輸的訊號會隨距離而衰減。
- 使用共用的傳輸媒介。
- 訊號在傳輸過程不受保護，容易受外在環境所干擾。
- 傳輸媒介為開放式，安全性較差。
- 網路拓樸結構不固定。

3. 無線網路與其他網路的網路層不同

無線網路須要能與其他區域網路層作聯絡，所以無線網路的媒介存取

層(MAC Layer)具有移動性與可靠性，與其他網路的媒介存取層不同。

2-2-1 IEEE802.11 的網路架構與運作機制

若由ISO/OSI網路模型，將無線網路IEEE802的通訊協定加以歸類，其通訊協定包含了OSI模型最底下兩層，實體層 (Physical Layer, PHY Layer)及資料連結層 (Data Link Layer)及第三層(網路層)的部份，其中的媒體存取控制層(Media Access Control Layer, MAC Layer)屬於資料連結層(Data Link Layer)部分，圖2.6為無線網路IEEE802在OSI定義下，各個部份的功能與定義。

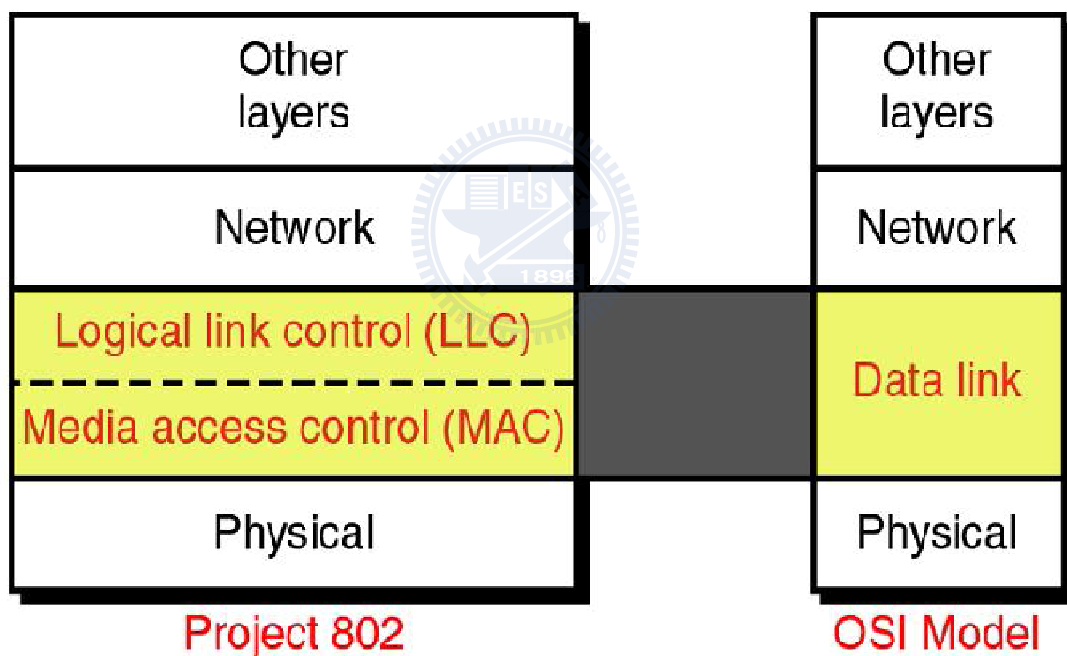


圖 2.6 Wireless network-OSI 網路模型

圖 2.7 為 IEEE 802 規格家族系列，在 OSI 七層架構中的相對關係圖，最初在制定 802.11 規格時包含 802.11 的媒體存取控制層(MAC Layer)與三種不同實體層(PHY Layer)的調變技術：跳頻展頻(FHSS)、直接序列展頻(DSSS)和紅外線(Infrared)，後來由於頻寬的需求逐漸增加，因應所需發展出不同規格技術，

如 802.11a、802.11b。此外為了改善與解決無線網路的其他問題，更多的規格因而被開發。IEEE802 主要規範 OSI 模型最底下兩層分別為實體層(PHY Layer)和資料連結層(Data Link Layer)。只要是 802 系列的網路，必具備上述兩種元件，其中 MAC 用以決定如何存取媒介與傳送資料的規則，至於傳送與接收的細節，交由 PHY 負責處理。

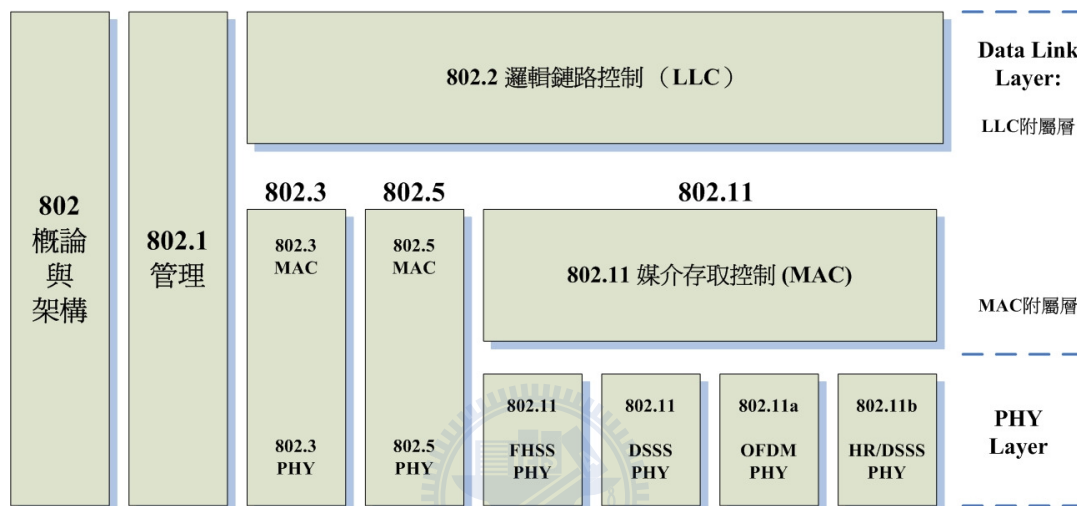


圖 2.7 IEEE 802.11 家族與 OSI 模型的關係

802.11 規格的關鍵在於媒體存取控制層(MAC)，MAC 層位於實體層之上，針對不可靠且易受外界干擾的無線網路提供可靠的資料傳送功能，具公平分享的特點，對所傳送的資料提供保護，負責核心的訊框封裝作業(Core Framing Operation)，以及與相連接的骨幹網路做必要的互動。至於實體層(PHY)，則可能提供不同的傳輸速度且負責將來自 MAC 層的訊息位元資料經過調變(Modulation)後，經由電磁波傳送出去。

802.11 採取載波感應多重存取機制來控制傳輸媒體的存取，不過由於底層媒體不同，而 802.11 無法達到碰撞偵測的要求，為了避免封包碰撞浪費傳輸資源，因此 802.11 轉而使用載波感應多重存取/碰撞避免(carrier sense multiple access network with collision avoidance; CSMA/CA)，然而和 Ethernet 一樣，802.11

採用不具中樞控制功能的分散式存取機制，因而每部 802.11 工作站存取媒介的方式都一樣，主要差異在於所使用的底層媒介不同而已。

2-2-2 IEEE802.11 的操作模式

IEEE 802.11 提供兩種操作模式：(1) Ad-hoc 模式，(2) Infrastructure 模式，以下為兩種模式的介紹。

- Ad-hoc 模式：

使用此模式建立的網路，通常是因應各種特殊需求所建立的特設網路(ad-hoc network)，由於此網路具有點對點的性質(peer-to-peer)，所以又稱為點對點網路，具有便利性和移動性，不必像 infrastructure network，必須事先架設基礎設備，即可提供工作站之間的傳輸。

- Infrastructure 模式：

使用此模式建立的網路，必須使用基地台(access point；AP)負責傳輸範圍內的所有工作站通訊行為，通訊行為包括兩個步驟，首先由起始對話的工作站將訊框傳遞給基地台，然後再由基地台將此訊框傳送到目的地的工作站，如此意味著所有的通訊都必須透過基地台運作。

在本論文中提到的 Client 端利用無線網路控制馬達的例子時，我們選用的模式為 Ad-hoc 點對點的模式。

2-2-3 TCP/IP 通訊協定

TCP/IP 主要是用來連結網路上的電腦主機，作為網路傳輸資料的標準協定，是一套完整的通訊協定，他的名稱來自於其中兩個最重要的協定：傳輸控制協定(transmission control protocol，TCP)及網際網路協定(internet protocol,

IP)。

TCP/IP 是一種階層式的協定，這裡所謂的階層式是指每一個較高的協定是由一個或多個較低分層協定所支援。這裡我們主要介紹網路層的網際網路協定(IP)和傳輸層的傳輸控制層協定(TCP)。

網際網路協定(IP)

IP 是 TCP/IP 使用的傳輸機制，是一種非可靠性、非預接式的資料封包協定，只提供盡量傳送的服務。所謂盡量傳送是指 IP 沒有提供錯誤檢查或追蹤，IP 假設他的底層是不可靠的而盡力將資料傳送到目的地，但不保證是否傳到目的地。IP 以資料封包方式傳遞，而各個資料封包分別傳送，資料封包在傳輸過程可以經過不同的路徑，可以不按順序到達，也可以被重複，當資料封包達目的時，也沒有方法將資料封包調整回原來的順序。然而 IP 的限制不應被視為缺點，IP 提供骨幹傳輸的功能，且讓使用者自由加入所需要的功能，因而獲得較高的效率。

TCP 提供完整的傳輸服務給所需的應用程式，在應用層與網路層之間提供應用程式和網路運作的中介服務。TCP 在傳輸層中提供了流量控制和錯誤控制的機制，TCP 使用滑動窗口(sliding window)的協定來做流量控制，使用回應封包、計時(time-out)、重送的機制來做錯誤控制。TCP 為應用程式提供連線的機制，應用程式能夠以資料流方式傳送訊息給傳輸層，在傳送端的傳輸層負責與接收者建立一個連線後，將資料拆成可傳送的單元並給予序號，再將傳送單元一個一個傳送出去。接收端的傳輸層等待這些資料的到來，然後加以檢查，並將沒有錯誤的資料以資料流的方式傳給接收端的應用程式，等全部資料完成後，TCP 要關掉剛剛使用的連線。所以 TCP/IP 是一種連線導向，具可靠的傳輸協定

2-3 整合 CAN 與 IEEE 802.11 的網路控制系統

2-3-1 網路實驗平台

圖 2.8 為這次實驗的系統架構圖，此架構由三個部份所組成，第一個部份為德州儀器(TI)所開發的 F2812 DSP 和 Panasonic AC 伺服馬達所組成，第二部份為一台電腦和 USB CAN 所組成的 Server 端，Server 端是連結 CAN 網路和無線網路的溝通橋樑，具有閘道器(gateway)的功用，並且具有簡單的管理功能，第三部份為負責網路控制的電腦。DSP 跟 Server 端的 USBCAN 之間的聯繫是透過 CAN 來連結，Server 端和負責遠端控制的 Client 端中間透過無線網路來連結，資料傳輸的協定則是使用 TCP/IP。整個控制迴路為位置迴路控制。

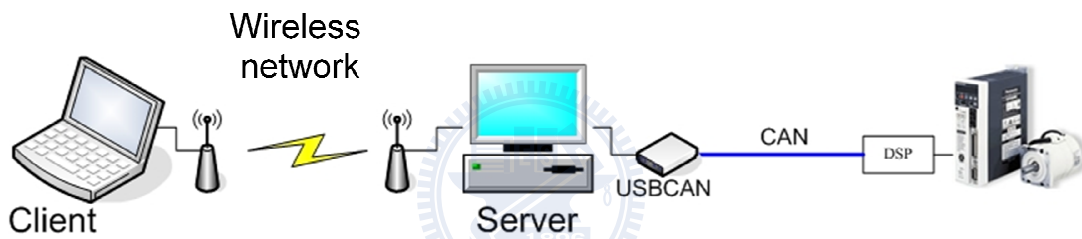
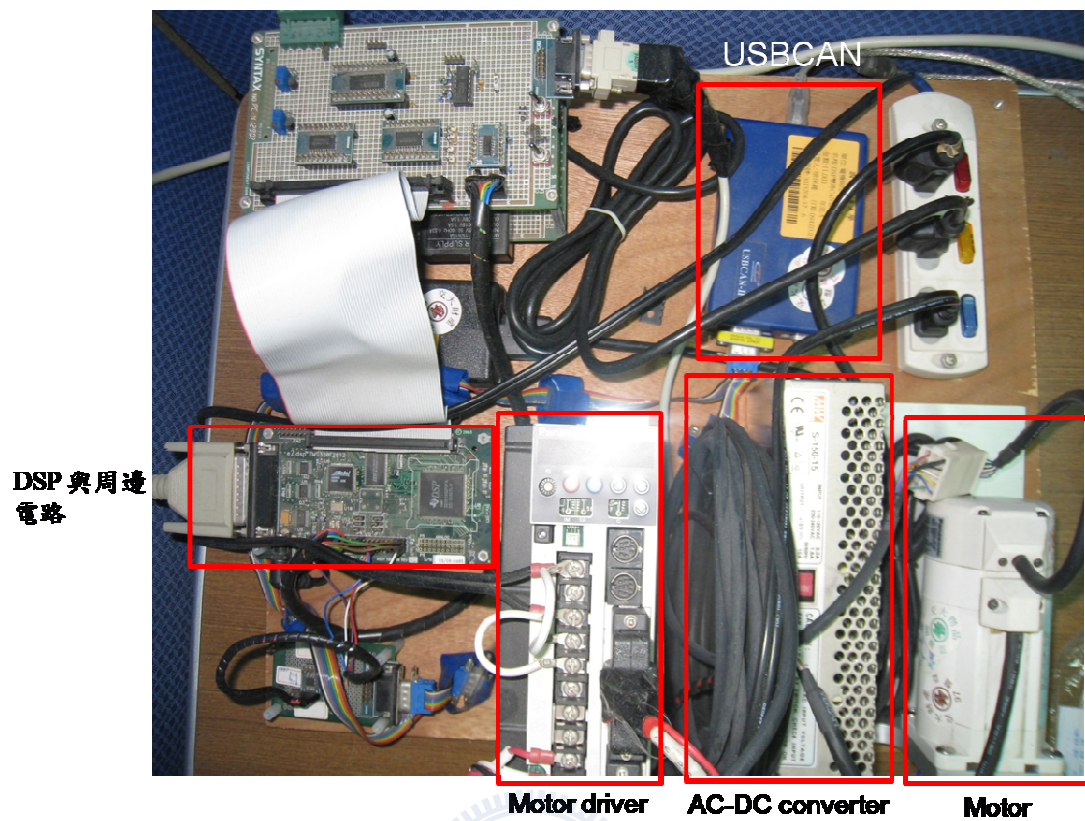


圖 2.8 實驗系統架構圖

由於本實驗系統是透過網路來控制，DSP 端採用時間觸發(time-trigger)方式，而 Client 端亦採用時間觸發的方式，DSP 每隔固定的時間會將馬達 Encoder 讀到的資料回傳給 Client，當 Client 每固定時間偵測是否接收到 DSP 傳過來的回授訊號，接收到訊號才經由控制器計算出命令回傳給 DSP，未接收到訊號，則系統如開迴路控制，而為了避免開迴路控制，在第四章我們會討論此問題並解決之。圖 2.9(a)為實驗控制平台，未包含 server 與 client 的電腦主機。圖 2.9(b)為驅動馬達圖，為 Panasonic AC 馬達。



(a)



(b)

圖 2.9 (a) 實驗控制平台 (b) Panasonic AC Motor

2-3-2 TCP/IP 與 CAN 封包轉換

由於 DSP 上面只有 CAN 介面，而遠端控制是使用無線網路透過 TCP/IP 通訊協定來傳遞資料，兩種不同協定的網路無法直接做溝通，所以我們中間需要透過閘道器來轉換兩種不同型式的封包。

圖 2.10 為 Server 的架構圖，Server 主要分成四個部份，第一部份是由 CAN 網路接收到 CAN 封包，然後將該封包轉換成 TCP/IP 通訊協定格式的封包後，透過無線網路，將封包送到遠端的控制端(client)，第二部份為經無線網路接收到的 TCP/IP 通訊協定封包，再轉換成 CAN 的封包，經由 CAN 網路將資料傳給 DSP。第三部份為 Server 管理程式，Server 僅允許一台 Client 連結到 Server，以避免在做網路控制時，還有其他 Client 端進來干擾，因為無線網路易受外界的干擾，嚴重的話將使系統不穩定，當已經有一台 Client 已經建立好連線，此時若有其他 Client 嘗試連線，Server 會拒絕該 Client 的連線並且給予警告的訊息。第四部份則為使用者介面。

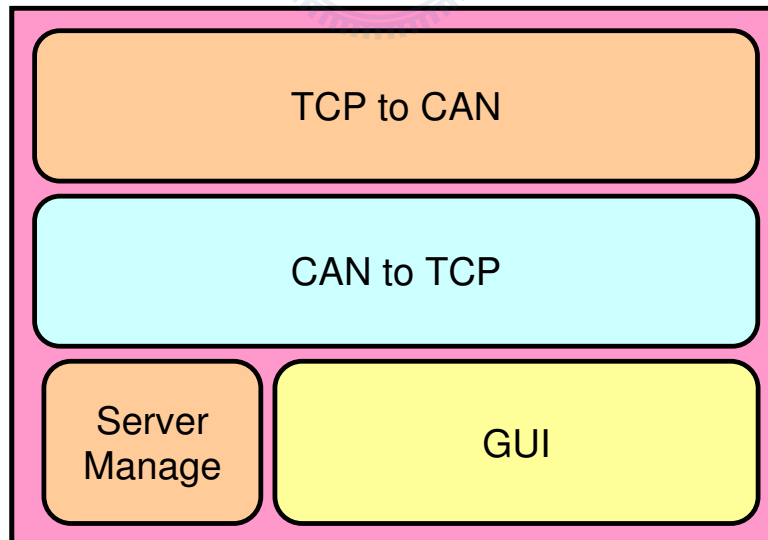


圖 2.10 Server 架構圖

當有資料要從 DSP 傳送到 Client 的控制端，首先將訊息種類(Type)及傳送資料(Data)的訊息格式設定好，設定好訊息格式之後將其放到 CAN 封包的 Data 部份透過 CAN 網路傳到 Server，此步驟如圖 2.11 的(1)。當 Server 接收到 CAN 送過來的封包之後，將整個 CAN 封包放到 TCP 封包的 Data 部份，再利用無線網路傳送到 Client 端，此步驟如圖 2.11 的(2)。Client 收到由無線網路送過來的封包後，先從 TCP 封包 Data 部份取出 CAN 的封包，再由 CAN 封包 Data 部份取出使用者自己定義的資料格式，注意 CAN 封包是可以自行定義格式，不像 IEEE802.11，最後再分析資料格式即可完成 DSP 傳送到 Client 的工作，如圖 2.11 的(3)。照著圖中(1)→(2)→(3)的順序即可將訊息完整的傳送到 Client 控制端。

若要將資料由 Client 控制端傳送到 DSP，先將要傳送的訊息種類(Type)和傳送資料(Data)訊息格式設定好，再放到 CAN 封包 Data 部份，最後把 CAN 封包整個放到 TCP 封包的 Data 部份，利用無線網路將封包傳送出去，如圖 2.11 的(4)。Server 收到封包之後，從 TCP 封包 Data 部份取出 CAN 封包，將 CAN 封包透過 CAN 網路將封包傳送到 DSP，如圖 2.11 的(5)。DSP 收到 CAN 封包後，將訊息格式由 CAN 封包 Data 部份取出，再進行解析，如圖 2.11 的(6)。只要照著圖中(4)→(5)→(6)的訊息即可完成 Client 控制端傳送訊息到 DSP 的動作。

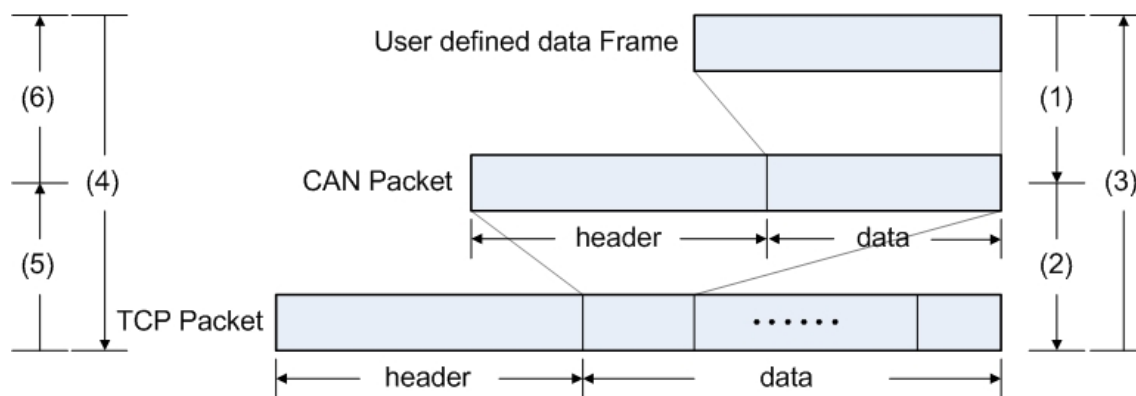


圖 2.11 封包轉換圖

第三章 時間觸發的無線網路控制系統

3-1 網路控制系統簡介

回授控制系統之中的控制迴路及回授迴路，以網路來做傳輸媒介，則將此類控制系統稱之為網路控制系統(networked control systems, NCSs)[2]，所使用的網路可以是有線網路如 Ethernet，無線網路如 IEEE802.11，或是工業用網路如 CAN。透過網路來做控制，有許多優點，例如：

- (1) 節省配線：一般的控制系統其配線複雜，不同訊號、元件、受控端個別需要不同線路傳輸、連結，但網路控制系統只需備妥網路環境，所有資訊封裝在封包內傳輸，即可將不同的受控端連結在一起，網路上各個元件不需在個別配線回到控制端，就可以將資訊傳回主控端，達到配線簡化、效率化。
- (2) 模組化：每個連接在網路上的控制端或是受控端都可以被視為物件(object)，在一個系統裡面要增減一個物件，只需在軟體做設定即可。
- (3) 故障易於診斷及排除：網路化的元件，可在軟體上設定自我診斷的功能；當元件故障，元件能夠透過網路回傳故障訊息給主控台，無需個別元件做檢查，提高維修時的效率與便利性。
- (4) 遠端控制：增加控制的距離，可以使操作人員遠離危險環境，在遠端即可控制機器。

由上面可以知道，網路控制系統可以為我們帶來許多便利，但是將控制系統網路化之後，也帶來幾個缺點，例如時間延遲(delay time)，資料遺失(data dropout)，封包碰撞，取樣週期降低，網路排程(network scheduling)等問題，這些問題沒有處理好，輕則降低系統效能，重則整個系統產生不穩定或是無法控制，這些問題都是網路控制上的重要課題。

在本章我們主要探討取樣週期、時間延遲、資料遺失率對系統造成的影響，並於第四章應用回授訊息估測以消除資料遺失對系統的不良影響。

3-2 取樣週期、時間延遲、資料遺失探討

3-2-1 時間延遲

圖 3.1 為一般網路控制方塊圖，在控制端與受控端之間的命令和回授訊號的傳輸是透過各種網路來傳輸，由網路來當作傳輸媒介就會產生延遲時間 (delay time)。網路控制所產生的時間延遲分成兩類，一種為命令延遲時間 (command time delay) 是由控制端將命令傳到受控端的所產生的延遲時間，另外一種則是回授延遲時間 (feedback time delay)，回授延遲時間是指受控端將感測器的資料傳回控制端所產生的延遲時間。

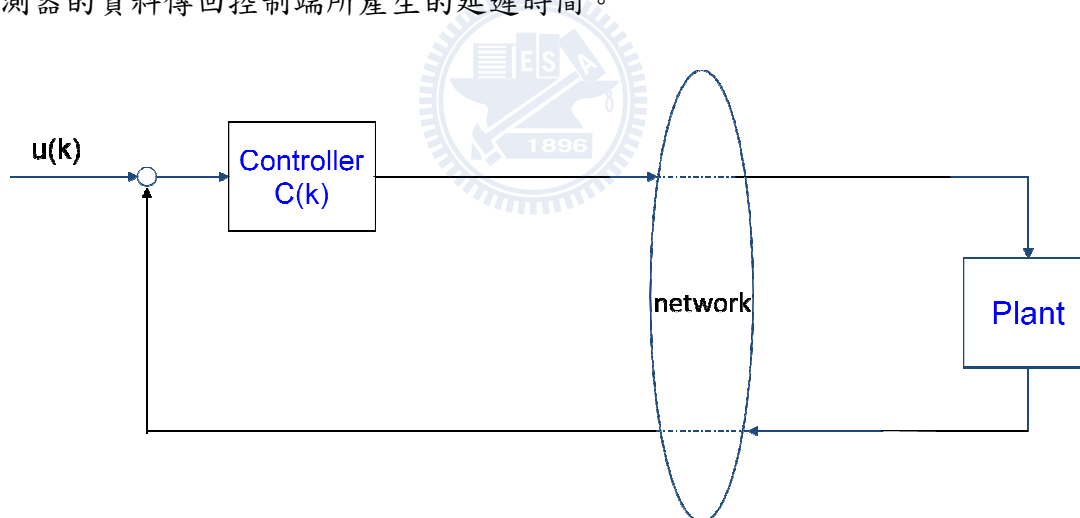


圖 3.1 網路控制系統方塊圖

延遲時間若小於系統的取樣週期，則我們可以將延遲時間忽略掉，但是當延遲時間大於取樣週期，此時延遲時間對整個控制系統的影響，輕則會降低系統的效能，嚴重則會造成整個控制系統的不穩定。圖 3.2 和圖 3.3 分別為實際的網路控制系統在取樣頻率為 20 ms 時的響應圖，兩張圖中虛線部份是不經過

網路控制的系統跑來的響應，實線部份則是經過網路來做控制的響應圖，圖 3.2 的延遲時間為 200 ms，此時響應圖與未受網路控制做比較，可以看出因延遲時間造成的系統震盪，若我們再將時間延遲加大到 1000 ms，整個網路控制系統已經發散不受控制。

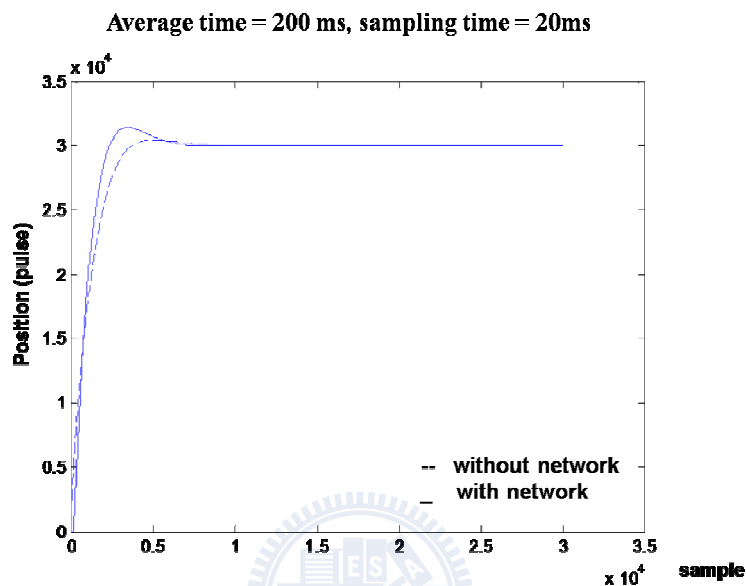


圖 3.2 延遲時間對系統影響圖(delay time = 200 ms)

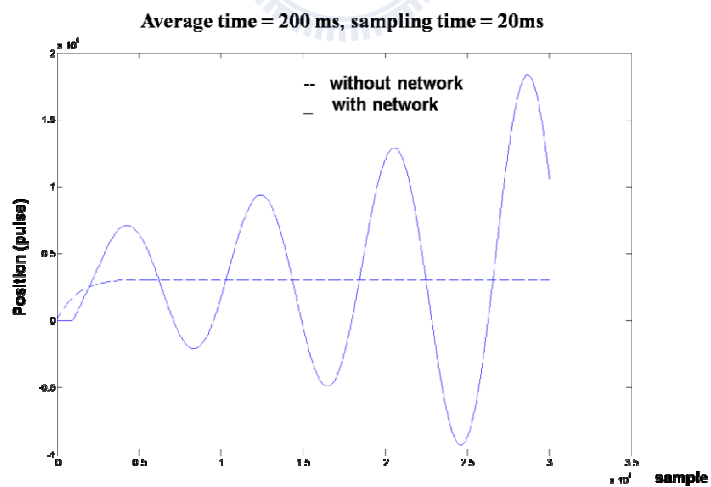


圖 3.3 延遲時間對系統影響圖(delay time = 1000 ms)

由上面兩張圖可以看出，在網路控制系統若不將延遲時間做妥善處理，則可能對網路控制系統造成無法控制和降低效能。

3-2-2 資料遺失

一般傳統的網路控制系統其回授訊號的傳遞多是採用事件觸發(event-trigger)，即受控端根據感測器的資料是否傳回控制端做為觸發依據，所以可視為是每間隔一時間延遲，受控端回傳感測器資料到控制端，如圖 3.4(a)所示，其優點是架構簡單、無須多次回授訊號給控制端處理，以避免網路壅塞，所以多半用在低精確度控制或開迴路控制，但其缺點是無法及時回授感測器資料，應用於需要精密控制的領域上，如運動控制、CNC 伺服控制會有取樣點數不夠多，讓誤差過大，導致控制效能低落的問題，為了解決此問題，本研究採用時間觸發(time-trigger)，即每一固定取樣週期回傳回授訊號給控制端做處理，如圖 3.4(b)所示，相較於事件觸發，具有高取樣頻率且閉迴路即時控制的優點。

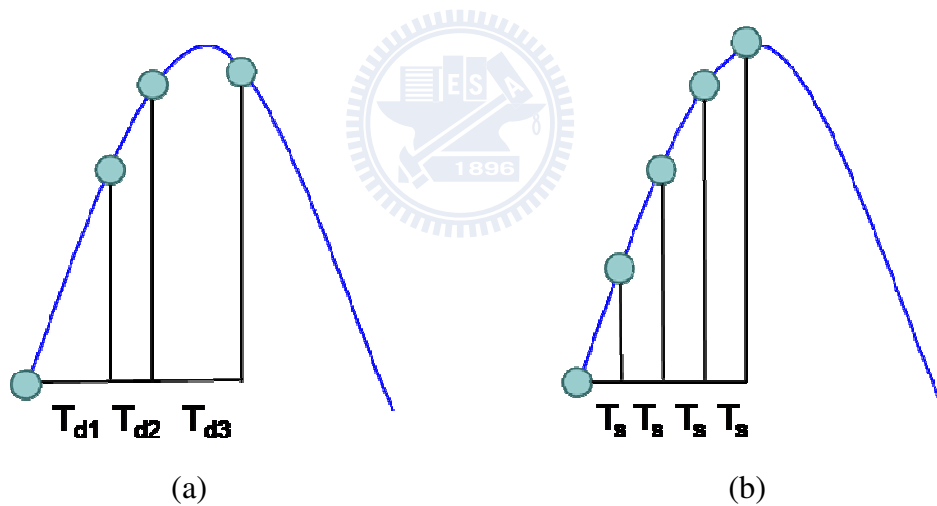


圖 3.4 (a)事件觸發(event-trigger)示意圖 (b)時間觸發(time-trigger)示意圖

在低取樣頻率或低時間延遲下的網路環境下，時間觸發可以即時回授訊號做處理，但在高取樣頻率或高時間延遲下的網路環境下，會有時間延遲遠大於取樣週期的現象，當在固定的取樣週期下，因為時間延遲遠大於取樣週期，導致無感測器資料可被接收，此現象我們定義為資料遺失(data dropout)，如圖 3.5 所示。

當網路控制系統應用於精密控制，如運動控制時，需要高取樣頻率以達到高精確度，若使用的網路環境為低時間延遲的工業用網路如 CAN，則少有時間延遲遠大於取樣週期的現象發生，如同閉迴路控制一般，回授訊號可以被及時回授處理，使輸出誤差減少，改善系統的控制效能。倘若使用的網路環境為高時間延遲的無線網路如 IEEE802.11，時間延遲遠大於取樣週期，此時時間觸發如同事件觸發一般，每間隔一次時間延遲(delay time)，控制端才接收到回授訊號做處理，其他未接收到資料的取樣週期中，系統如同開迴路控制，無法有效降低輸出誤差，改善系統的控制效能。

下面我們將探討不同取樣頻率下，時間延遲、資料遺失率與取樣週期的關係。

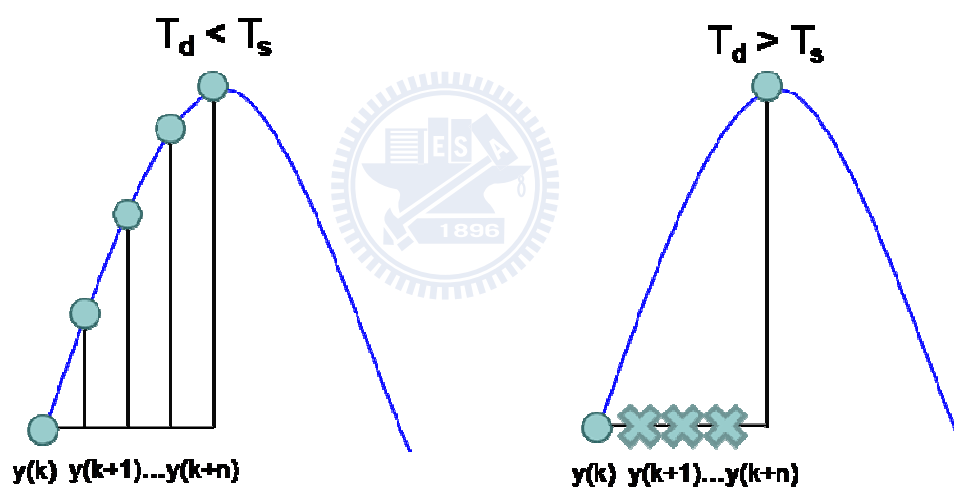


圖 3.5 資料遺失示意圖

3-3 時間觸發的無線網路控制系統

圖 3.6 為以時間觸發為基礎的網路控制系統方塊圖，對應至圖 2.8，圖 3.6 中的 remote 相當於圖 2.8 的 client，控制器採用 P 控制器+ Phase-lag 控制器，圖 3.6 中的 plant 相當於圖 2.8 的 DSP 和 Motor，圖 3.6 中的 network 則為無線網路 IEEE802.11，值得注意的是，網路兩端以時間觸發作控制，命令每隔固定時間透過網路發送至 DSP，而 DSP 每固定時間回傳輸出資料透過網路至 remote 端，而 client 每隔固定時間接收資料與命令相減，經控制器計算後發送至 DSP，不同於大部分網路控制系統是將 plant 端回傳給 remote 端以事件觸發來作控制。所以須考慮 remote 端與 plant 端的時脈同步問題。取樣週期較大者，允許較差的時脈同步性，資料遺失率主要受到網路傳輸延遲所影響，而取樣週期較小者，時脈漂移容易使得節點的時脈相差一個取樣週期以上，導致極高的資料遺失情形[19]，在本研究所採用的取樣週期遠大於時脈漂移的時間，若時脈漂移的時間不可以忽略時，我們在第四章採用訊息估測來估測未能即時接收到的資料，降低因時脈漂移不同步所造成的高資料遺失率帶給系統的影響。

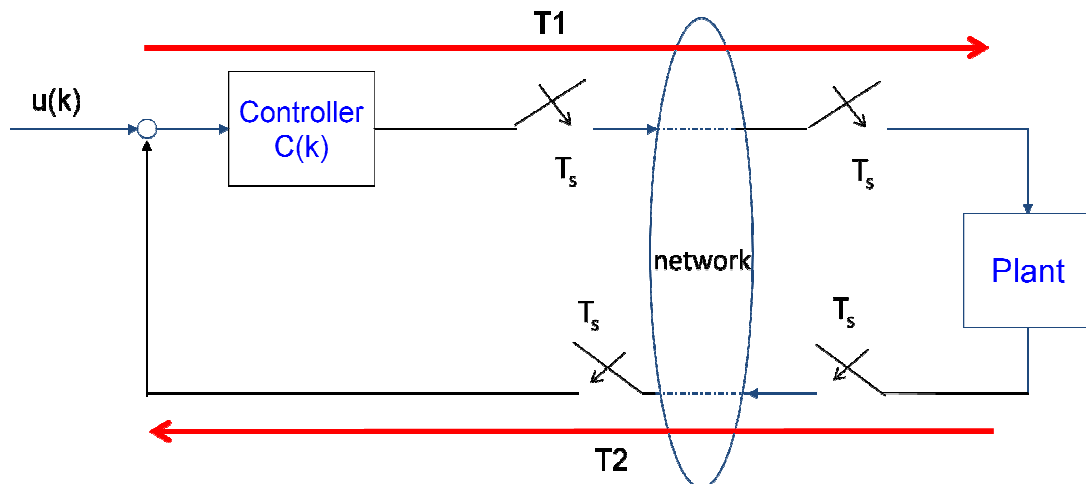


圖 3.6 時間觸發為基礎的網路控制系統方塊圖

3-4 無線網路控制系統實驗

3-4-1 網路延遲時間量測方法

為了瞭解時間延遲與取樣週期關係，我們必須先取得網路上面的延遲時間，此網路延遲時間是指圖 3.6 中 T_1+T_2 的總和， T_1 為命令延遲時間， T_2 為回授延遲時間。其中 T_1 和 T_2 延遲時間為每個節點的應用層到另外一邊應用層加起來的總和，而不是單純指硬體層對硬體層之間的傳輸時間[10]，如圖 3.7。

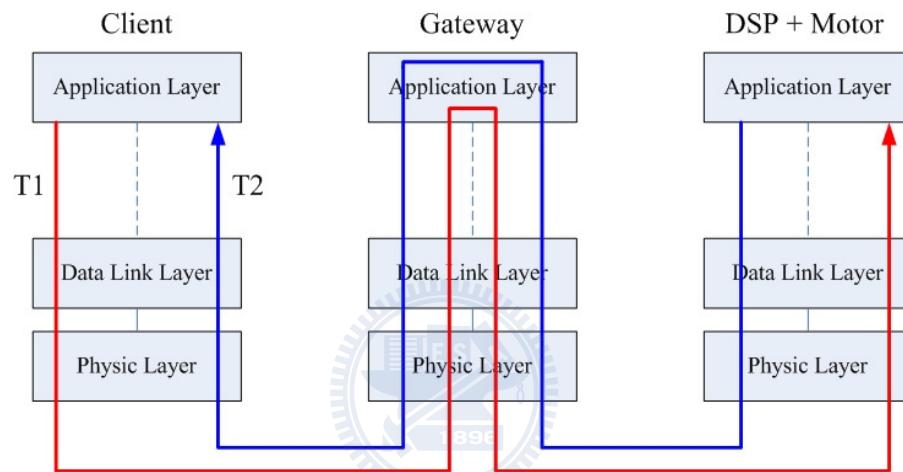


圖 3.7 延遲時間計算

時間延遲的量測方法是由 DSP 端每一取樣週期傳送一筆帶有 Index 的資料封包經由 Gateway 傳送到 Client 端，這裡 Index 指的是該封包的編號，封包傳送出去前會記錄封包發送的起始時間，當 Client 端接收封包之後，立刻將封包原封不動傳回 DSP，DSP 接到封包後記錄到達時間，並且根據封包上面的 Index 找出發送時的起始時間，將到達時間跟起始時間相減即可求得延遲時間。

使用 DSP 作為量測起始點，而不選用 Client 做為起始點的原因，是因為 Windows 作業系統的 timer 只有 10ms 的精確度，若由 Client 當起始點就得用作業系統 timer 來計數，10ms 對我們控制系統而言，精確度略顯不足，為了求得更準確的時間，使用 DSP 來計算延遲時間，DSP 計數精確度可以達到 1ms 以

下，在本次實驗我們使用 $1ms$ 為量測延遲時間最小的單位。

3-4-2 資料遺失率測定方法

資料遺失率是指在固定的時間與取樣頻率下，未能及時接收到的筆數與總筆數的比值，未能及時接收到的資料因為 buffer 每一取樣週期須記錄資料，所以記錄成 0，如圖 3.8 所示，假設 buffer 可以存取固定的時間與取樣頻率下所有的筆數，則統計 buffer 中的 0 筆數與總筆數，則可得到資料遺失率，但實際上，buffer 有其限制，不可能完全存取所有的筆數。所以設計其他方式來取得資料遺失率。

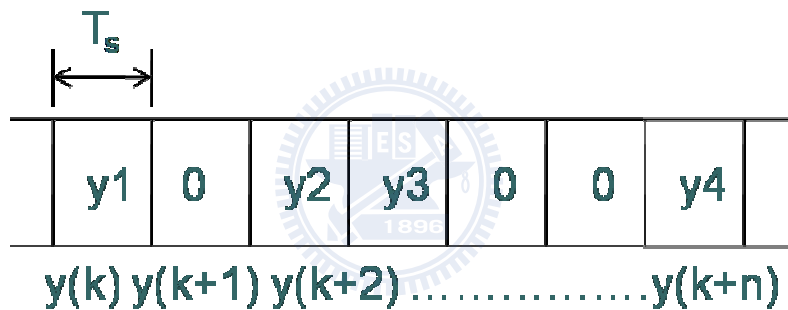


圖 3.8 Buffer 存取示意圖

取得網路上面的資料遺失的方法每一取樣週期傳送一筆資料封包經由 Gateway 傳送到 Client 端，當 Client 端接收封包之後，立刻將封包原封不動傳回 DSP，DSP 在傳送出下一筆資料封包前，先偵測是否收到該封包，未接到封包與接收到封包分別記錄，即可求得資料遺失率。

3-4-3 網路控制系統的延遲時間實驗

本次實驗是在 10 秒內，固定取樣週期傳送固定大小的資料封包來量測網路控制系統的平均延遲時間，不同的取樣週期各做五次同樣的實驗。網路傳輸部份，Server 連接 DSP 部分是用 CAN 網路。Server 連接 Client 部分則使用無線網路 IEEE 802.11，傳輸速率為 54Mbps，連結模式採用 ad-hoc 點對點的傳輸模式，傳輸協定是使用 TCP/IP，Client 和 Server 之間透過一個 HUB 相連接。

表 3.1 IEEE 802.11+CAN 的平均延遲時間 (單位: *ms*)

取樣週期 T_s 實驗群組	1 <i>ms</i>	2 <i>ms</i>	5 <i>ms</i>	10 <i>ms</i>	20 <i>ms</i>	50 <i>ms</i>	100 <i>ms</i>
1	27.89	57.97	39.41	46.22	26.41	19.03	23.53
2	64.47	35.76	45.83	34.19	52.53	24.67	38.96
3	37.31	47.35	36.12	26.09	36.05	19.79	22.73
4	45.92	30.15	27.27	24.97	27.19	27.67	26.96
5	28.94	29.58	54.94	25.98	27.51	40.25	17.96

由表 3.1 我們會發現，量測出來的結果無任何規律性，在同一取樣週期下量測到的平均延遲時間不一致，且在不同取樣週期下並非較高的取樣週期擁有較短的延遲時間，量測出來的延遲時間呈現不規則分佈，會造成這種現象的發生是因為無線網路容易受到環境干擾造成封包的遺失，但是我們是使用 TCP/IP 的傳輸協定，此傳輸協定為連線型的傳輸協定，當有訊息沒有傳到目的地時，系統會自動重傳遺失的封包，在封包遺失到重傳的過程當中會造成延遲時間大

量的增加，這些大量增加的延遲時間便會對平均延遲時間造成影響，但是這些大量增加的延遲時間對所有傳輸來說只佔少部份，所以我們在估測平均延遲時間時，可以忽略掉這些大量增加的延遲時間來計算平均延遲時間。

表 3.2 為使用 IEEE 802.11 無線網路加上 CAN 網路在不同取樣頻率下所量測，經處理過的平均延遲時間與標準差，我們把超出一個標準差的資料去除，其他的資料留下作平均，由此表可以看出，在不同取樣頻率下，平均的延遲時間也跟著不同，在取樣頻率較低的時候，延遲時間較小平均值大約在 18~19 ms 之間，當取樣頻率變高的時候，延遲時間並沒有顯著的增加，表示還沒有到達網路傳輸頻寬限制的時候，取樣頻率大小不會對平均延遲時間有多大的影響，而當取樣頻率大於 50Hz 時，平均延遲時間增加至 35ms 左右，顯示取樣頻率 50Hz 已超出網路傳輸頻寬限制，導致網路開始壅塞，如圖 3.9 所示。固定頻寬的網路控制系統，當取樣週期低於網路延遲時間，產生資料遺失率與延遲時間劇烈增加導致系統不穩定的問題。根據本次實驗結果，此臨界值為 20ms。

表 3.2 IEEE 802.11 + CAN 處理後的平均延遲時間與標準差（單位：ms）

取樣週期 T_s 實驗群組	1ms	2ms	5ms	10ms	20ms	50ms	100ms
平均值	35.01	31.83	28.65	25.69	21.03	19.41	18.89
標準差	27.64	15.14	9.71	9.5	6.58	5.26	4.64

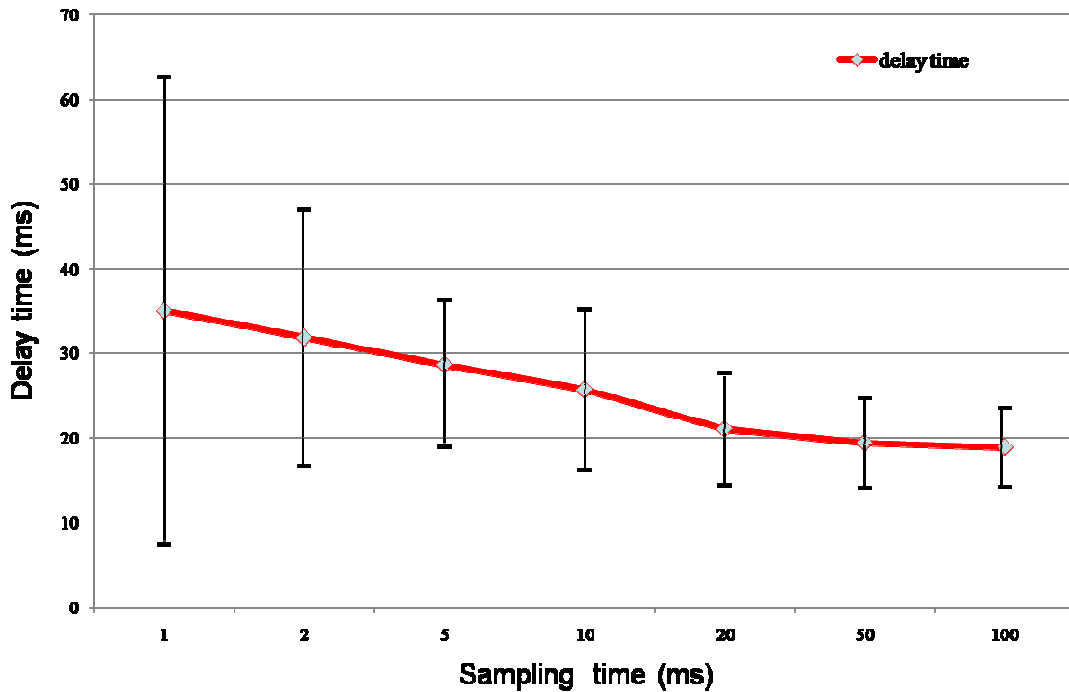


圖 3.9 IEEE 802.11 + CAN 的平均延遲時間與取樣週期關係圖

3-4-4 網路控制系統的資料遺失率實驗

本次實驗是固定取樣週期傳送固定大小的資料封包，共 5000 筆來量測網路控制系統的資料遺失率，不同的取樣週期各做五次同樣的實驗。網路傳輸部份的設定同上節。

表 3.3 為使用 IEEE 802.11 無線網路加上 CAN 網路在不同取樣頻率下所量測的平均資料遺失率，同量測網路延遲時間，我們把超出一個標準差的資料去除，其他的資料留下作平均，由此表可以看出，取樣週期大於 20ms，網路正常，資料遺失率則低於 10%。取樣週期小於 20ms，讓取樣週期容易小於網路延遲時間，資料遺失容易發生使封包重傳，網路開始壅塞，資料遺失率劇烈增加至 90% 以上，平均資料遺失率有隨取樣頻率增加的趨勢，且此趨勢與平均延遲時間相似，如圖 3.10 所示。在固定取樣頻率下，網路延遲時間影響資料封包是否遺失，所以我們可以將延遲時間做為評估網路傳輸環境的依據。

表 3.3 IEEE 802.11+CAN 的平均資料遺失率 (單位：%)

取樣週期 T_s 實驗群組	實驗群組						
	1ms	2ms	5ms	10ms	20ms	50ms	100ms
1	92.36	63.28	52.25	31.86	7.25	1.86	0.24
2	93.01	62.87	52.24	31.86	7.24	1.86	0.26
3	92.79	61.29	52.51	32.02	7.51	2.02	0.28
4	93.29	67.87	52.95	31.81	7.95	1.81	0.24
5	95.03	55.46	53.90	31.96	8.90	1.96	0.28
平均值	92.8	62.15	52.77	31.91	7.77	1.9	0.26
標準差	7.12	8.26	2.61	0.89	0.72	0.07	0.01

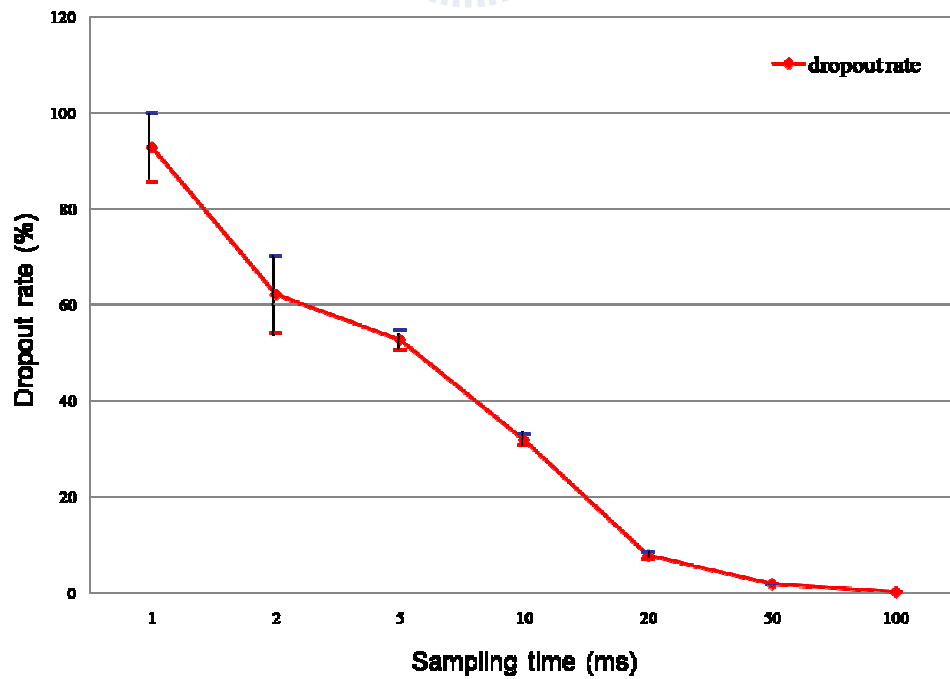


圖 3.10 IEEE 802.11+CAN 的平均資料遺失率與取樣週期關係圖

3-4-5 網路控制系統的控制效能探討與實驗

本研究主要是希望將網路控制系統應用於高精確度的控制用途，如運動控制、CNC 伺服控制，所以必須先定義網路控制系統的輸出誤差。根據輸出誤差，判斷該系統控制效能的好壞。

網路控制系統利用 Smith predictor 補償後的輸出相較於命令延遲固定時間項，此固定時間項約等於 3-2-1 節所提到的命令延遲時間加上回授延遲時間的總和，本研究所討論的輸出誤差並不包含因為時間延遲所造成的輸出誤差，目前的研究文獻均無法消除該時間延遲對系統的影響，而且我們所在意的是輸出訊號的追跡性(tracking)，所以消除時間延遲所造成的輸出誤差非本研究的重點。

本研究定義平均輸出誤差的式子如下：

$$\widehat{\mathbf{e}}(\mathbf{t}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{y}(\mathbf{t} - \mathbf{T}_d) - \mathbf{r}(\mathbf{t}))^2 dt} \quad (3-1)$$

$$\widehat{\mathbf{e}}(\mathbf{k}) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\mathbf{y}(\mathbf{k} - \mathbf{n}) - \mathbf{r}(\mathbf{k}))^2} \quad (3-2)$$

其中 $y(t)$ 為輸出， $r(t)$ 為命令， T_d 為平均網路延遲時間， n 為平均網路延遲時間除以取樣週期，取整數，式(3-1)為類比訊號所用，式(3-2)為數位訊號所用，因為訊號彼此間傳輸是以網路作為媒介，所以需要數位訊號。至於 phase-lead 控制器的設計，首先先以系統識別(system identification)的方法來取得系統的模型，利用輸入 PRBS 的訊號，得到馬達輸出位置結果，再利用 Matlab 所提供的 System Identification Toolbox，可以估測出大致的系統模型，如下：

$$\frac{\theta}{V} = \frac{139.1z^3 + 25.46z^2 - 0.06z}{z^4 - 0.99z^3 + 0.004z^2 - 0.1462z + 0.1174} \quad (3-3)$$

其中取樣週期為 20ms。

Phase-lag 控制器是希望可以提升系統穩定度，且把極、零點設計在遠離系統頻寬的位置，避免讓 phase margin 下降，讓系統可容忍的網路延遲時間不會減少，而 P 參數避免系統不穩定即可，設計結果如下：

$$C(s) = \frac{0.001s+15}{s+1000} \quad (3-4)$$

再根據取樣週期 20ms，轉成數位控制器。

因為輸入命令與輸出回授遺失而無法及時收到，導致過長的傳輸時間延遲，造成系統控制效能不佳，甚至不穩定，圖 3.11 為時間延遲對馬達位置控制的影響，取樣頻率為 50 Hz，命令為弦波，其頻率為 0.157 Hz，因為馬達本身的頻寬約在 1 Hz 的限制，所以其命令頻率不能大於 1 Hz。由圖可以看出隨延遲時間變化劇烈時，其輸出響應並沒有相當平滑，這顯示因為輸入命令與輸出回授的資料遺失率過高，導致延遲時間過長，增加輸出誤差，讓控制效能下降。對於無法及時接收的控制命令與輸出回授影響控制效能的問題，在第四章我們提出輸出回授訊息估測的方法來解決。

圖 3.12 為不同取樣週期下，網路控制系統的輸出誤差。圖中取樣週期小於 20ms，系統進入不穩定狀況，無法量測輸出誤差，故用虛線表示。取樣週期大於 20ms 時，根據數位控制原理，控制效能隨取樣週期減少而增加。取樣週期小於 20ms 時，由於網路壅塞，讓資料遺失率增加，導致平均延遲時間增加，控制效能隨取樣週期減少而急劇變差，進而讓系統不穩定。取樣週期等於 20ms 時，NCS 具有最佳的控制效能，因為此時取樣週期約等於延遲時間，使網路尚未壅塞，且取樣解析度高，可改善控制效能。

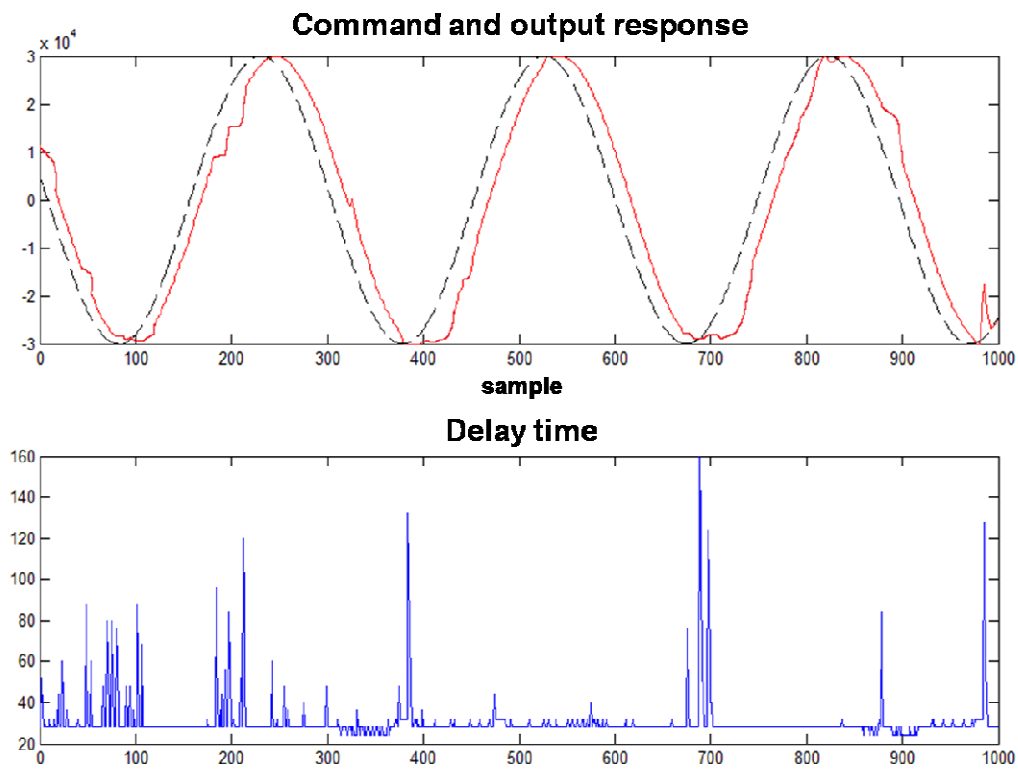


圖 3.11 延遲時間對馬達位置控制影響實驗圖

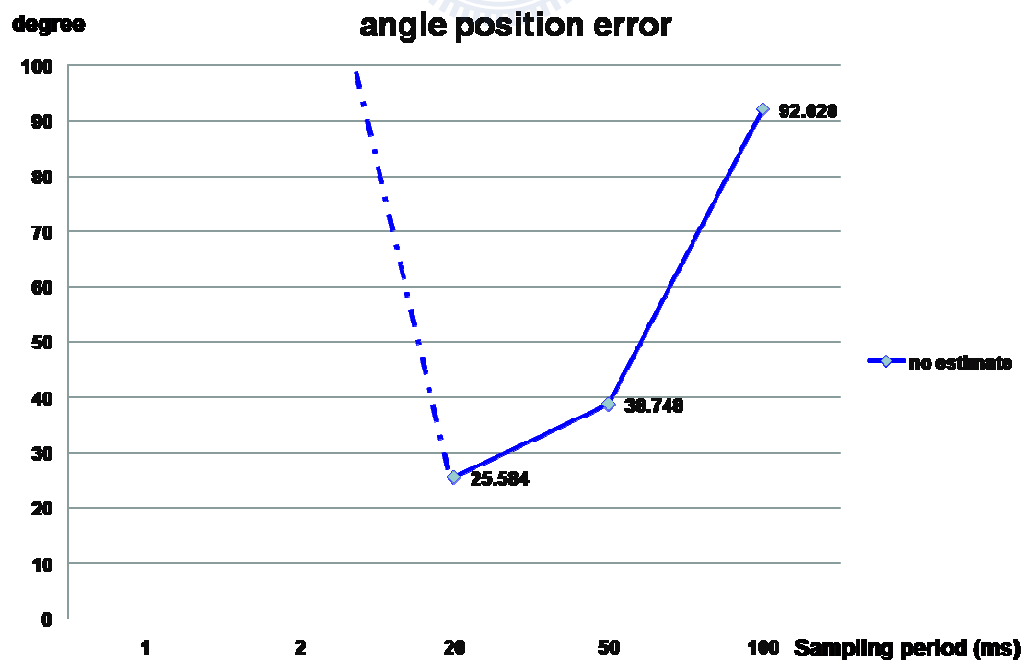


圖 3.12 不同取樣週期下，網路控制系統的輸出誤差

第四章 回授訊息估測

4-1 回授估測

因為本研究是採用時間觸發來作為傳輸封包的依據，雖然是使用 TCP/IP 通訊協定，但從上章所討論的內容可知，client 端與 DSP 會因為網路延遲時間而無法即時接收到資料，導致無法即時作控制而使輸出誤差增加。對於無法及時接收的控制命令與輸出回授，解決之辦法：

1. 沿用前一筆的資料(One-delay)
2. 利用估測原理來預估該筆數值

而無法及時傳送的則捨棄不用，以避免 TCP/IP 協定一直重傳而增加延遲時間。以估測法則來預估未能即時接收的資料是一種較為精確的方法，特別是針對突然的少筆資料遺失，但在某些狀況，One-delay 仍有其好處，在下面我們會加以說明。

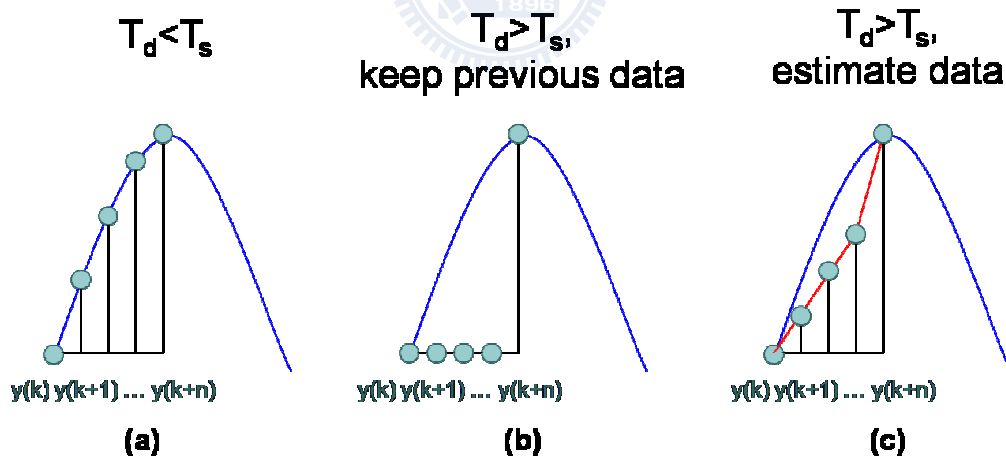


圖 4.1 不同時間延遲、估測方式的取樣結果圖

圖 4.1 為不同時間延遲與不同估測方式的取樣結果圖，當延遲時間小於取樣週期，表示每一筆資料均可以透過網路即時地傳送，如圖(a)所示，而當延遲時間大於取樣週期時，若沿用前一筆透過網路傳送的資料，是最為簡單的方法

來估測未能及時接收的資料，但從圖(b)可看出，會有估測誤差過大的問題，此估測誤差會連帶影響輸出誤差，導致在網路延遲時間過長的情況下，會有控制效能降低、甚至不穩定的問題產生。倘若利用估測法則來設計估測器，如：泰勒估測(Taylor estimate)、最小平方估測(Least-square estimate)等，如圖(c)所示，會降低估測誤差，得到較好的控制效能。

4-2 估測器簡介

4-2-1 泰勒估測

一般而言，利用數值方法根據已知的位置資訊來得到未知的位置資訊有三種，差分法、最小平方估測法與泰勒展開估測法。差分法簡單易實現，但精確度不足，最小平方估測法以複雜的數值方式可以改善估測值與實際值的誤差，但因為複雜而不易實現，在此我們先介紹泰勒展開估測法。

假設一函數 $f(t)$ 在 $t=a$ 處為連續(continuous)且可以無數次可微分(differential)，則 t 在 a 點的泰勒展開式如(4-1)式所示：

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(t)|_{t=a}}{n!} (t-a)^n \\ &= f(a) - f'(a)(t-a) + \frac{f''(a)}{2!} (t-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (t-a)^n + \dots \end{aligned} \quad (4-1)$$

今令 $f(t) = \widehat{v}_k(t)$ ， $t_{k-1} \leq t \leq t_k$ ，且 $a = t_\alpha$ ， $t_{k-1} \leq t_\alpha \leq t_k$ ，則(4-1)式可改寫為

$$\begin{aligned} \widehat{v}_k(t) &= \widehat{v}_k(t)|_{t=t_\alpha} + \frac{d\widehat{v}_k(t)|_{t=t_\alpha}}{dt} (t-t_\alpha) + \frac{1}{2!} \frac{d^2\widehat{v}_k(t)|_{t=t_\alpha}}{dt^2} (t-t_\alpha)^2 + \dots + \\ &\quad \frac{1}{n!} \frac{d^n\widehat{v}_k(t)|_{t=t_\alpha}}{dt^n} (t-t_\alpha)^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \widehat{v}_{k,t_\alpha}^{(n)} (t-t_\alpha)^n \end{aligned} \quad (4-2)$$

假設 $\widehat{v}_k^{(n)}(t_\alpha)$ 為在每次取樣週期中的平均位置差值，且泰勒級數是在每個取樣週期之中間值展開，則

$$\widehat{v}_{k,t_\alpha} \approx \frac{\Delta x_k}{T} = \frac{x_k - x_{k-1}}{T}$$

$$\widehat{v}_{k,t_\alpha}^{(1)} \approx \frac{\Delta v}{T} = \frac{\widehat{v}_{k,t_\alpha} - \widehat{v}_{k-1,t_\alpha}}{T}$$

$$\widehat{v}_k^{(n)} \approx \frac{\Delta \widehat{v}_k^{(n-1)}}{T} = \frac{\widehat{v}_{k,t_\alpha}^{(n-1)} - \widehat{v}_{k-1,t_\alpha}^{(n-1)}}{T}$$

$$t - t_\alpha \approx \frac{T}{2}$$

因此， $\widehat{v}_k(t)$ 的泰勒展開式二階近似為

$$\begin{aligned} \widehat{v}_k &\approx \widehat{v}_{k,t_\alpha} + \frac{d\widehat{v}_{k,t_\alpha}}{dt}(t - t_\alpha) + \frac{1}{2!} \frac{d^2\widehat{v}_{k,t_\alpha}}{dt^2}(t - t_\alpha)^2 \\ &\approx \frac{\Delta x_k}{T} + \frac{\widehat{v}_{k,t_\alpha} - \widehat{v}_{k-1,t_\alpha}}{T} \frac{T}{2} + \frac{1}{2} \frac{\widehat{v}_{k,t_\alpha}^{(1)} - \widehat{v}_{k-1,t_\alpha}^{(1)}}{T} \frac{T^2}{4} \\ &= \frac{\Delta x_k}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x_k}{T} - \frac{\Delta x_{k-1}}{T} \right) + \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta x_k}{T} - \frac{2\Delta x_{k-1}}{T} + \frac{\Delta x_{k-2}}{T} \right) \\ &= \frac{1}{T} \left[\Delta x_k + \frac{1}{2} (\Delta x_k - \Delta x_{k-1}) + \frac{1}{8} (\Delta x_k - 2\Delta x_{k-1} + \Delta x_{k-2}) \right] \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \widehat{x}_k &= x_k + \widehat{v}_k * T \\ &= x_k + \left[\Delta x_k + \frac{1}{2} (\Delta x_k - \Delta x_{k-1}) + \frac{1}{8} (\Delta x_k - 2\Delta x_{k-1} + \Delta x_{k-2}) \right] \end{aligned} \quad (4-4)$$

若將(4-3)式中的末項除去則成為一階近似，而零階近似則為差分法，至於本研究採用五階近似，如(4-5)式所示。

$$\begin{aligned} \widehat{x}_k &= x_k + \left[\Delta x_k + \frac{1}{2} (\Delta x_k - \Delta x_{k-1}) + \frac{1}{8} (\Delta x_k - 2\Delta x_{k-1} + \Delta x_{k-2}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{48} (\Delta x_k - 3\Delta x_{k-1} + 3\Delta x_{k-2} - \Delta x_{k-3}) + \frac{1}{384} (\Delta x_k - 4\Delta x_{k-1} + 6\Delta x_{k-2} - \right. \\ &\quad \left. 4\Delta x_{k-3} + \Delta x_{k-4}) + \frac{1}{3840} (\Delta x_k - 5\Delta x_{k-1} + 10\Delta x_{k-2} - 10\Delta x_{k-3} + 5\Delta x_{k-4} - \right. \\ &\quad \left. \Delta x_{k-5}) \right] \end{aligned} \quad (4-5)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta x_k &= x_k - x_{k-1} \\ \Delta x_{k-1} &= x_{k-1} - x_{k-2} \\ \Delta x_{k-n} &= x_{k-n} - x_{k-(n+1)} \end{aligned}$$

\hat{x}_k 為根據已知先前位置估測出的位置， x_k 為第 k 筆所回授的馬達輸出訊號。

4-2-2 最小平方法估測

泰勒估測是利用線性的方式來估測未知的數值，而最小平方法則是以多項式曲線的方式來估測，假設有 M 個已知數值，欲得到第 $M+1$ 個的數值，藉由前 M 筆已知數值與 N 次方多項式曲線來做逼近，該 N 次方多項式曲線與 M 個已知數值的平方距離為最小，則該 N 次方多項式曲線為其他未知數值所估測出的集合，此為最小平方法的原理。而因為要實現於軟體上，所以以公式來實現此估測法：

$$x[k] = c_0 + c_1k + c_2k^2 + \dots + c_Nk^N \quad (4-6)$$

$$\begin{bmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[M] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2^0 & 2^1 & \dots & 2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M^0 & M^1 & \dots & M^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} = X = A \cdot C \quad (4-7)$$

$$C = (A^T A)^{-1} A^T X \quad (4-8)$$

$x[1]$ 、 $x[2]$ 、...、 $x[M]$ 為 M 筆已知數值，(4-6)式為 N 次方多項式曲線，由(4-7)式可知矩陣 A 為已知，矩陣 X 為 M 筆已知數值所構成的矩陣亦為已知，根據(4-8)式可得矩陣 C ，則所欲估測的下筆數值 $x[M+1]$ 由下式可知，

$$\begin{aligned} x[M+1] &= c_0 + c_1(M+1) + c_2(M+1)^2 + \dots + c_N(M+1)^N \\ &= [(M+1) \quad (M+1)^2 \quad \dots \quad (M+1)^N] \cdot C \\ &= [(M+1) \quad (M+1)^2 \quad \dots \quad (M+1)^N] \cdot (A^T A)^{-1} A^T X \end{aligned} \quad (4-9)$$

故根據(4-9)式，只要有 M 筆已知數值與欲逼近 N 次方多項式，可估測出所希望的估測值。

至於沿用前筆資料(one-delay)，如字面上所敘述的相同，是未知的數值以最後一筆已知數值作取代，類似於事件觸發(Event-trigger)，因為實現簡單，所以不多作介紹。

4-2-3 估測器的選擇

在前面我們大致介紹了泰勒估測、最小平方法與 one-delay 估測，以下我們提出表 4.1 來簡單說明各種估測法則的優缺點。

表 4.1 各種估測法則的優缺點比較

	泰勒估測	最小平方法	One-delay
少量資料遺失	*****	*****	*
大量資料遺失	*	*	***
訊息變化大	*	****	**
硬體運算速度	***	**	*****
實現性	***	**	*****

*****：優，***：尚可，*：劣

泰勒估測、最小平方法對於突然的一兩筆資料遺失具有極高的估測精確度，但泰勒估測因為其線性逼近的特性，使其對於變化劇烈的訊息，估測精確度不佳，但相較於最小平方法擁有容易實現與運算速度較佳的優點，而 one-delay 對於突然的一兩筆資料遺失，估測精確度不佳，但面對連續大筆資料遺失，泰勒估測、最小平方法會有容易產生錯誤估測的現象。所謂的錯誤估測便是以估測所得的值作為已知數值，而進行估測，會有估測精確度不佳甚至發散的問題。

根據所使用的網路傳輸特性與取樣週期的決定，選擇適合的估測器。

圖 4.2 為無線網路的延遲時間量測，圖中所標示的粗線為根據第三章實驗所選擇的取樣週期，為 20ms，由延遲時間量測結果可知，大部分連續遺失資料的筆數不會超過一兩筆，所以使用泰勒估測或最小平方法是較好的選擇，又希望運算時間遠小於網路延遲時間，避免硬體設備影響網路特性，所以我們選擇運算時間較為快速的泰勒估測。

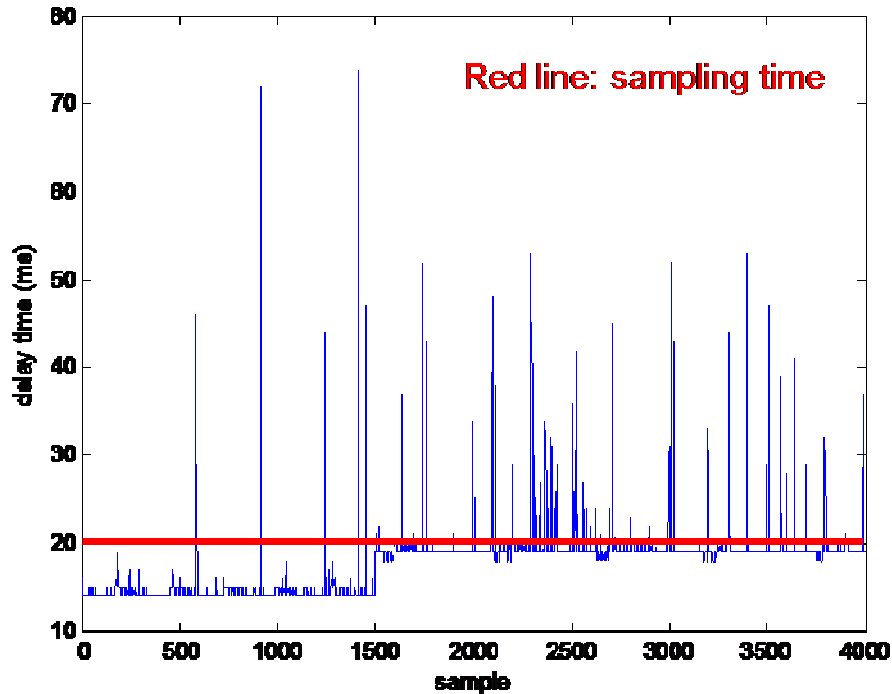


圖 4.2 網路延遲時間量測與取樣時間

4-3 回授估測控制效能實驗

圖 4.3 分別為控制命令端估測與輸出回授估測的示意圖與輸出響應模擬結果，紅線為命令，藍線為馬達輸出，如圖，比較控制命令加入泰勒估測與輸出回授加入泰勒估測的差異，發現輸出回授加入估測會有較好的控制效能，其原因是

1. 訊號可否估測：因為輸出回授訊號是馬達輸出訊號，為可估測的訊號，與命令訊號相似，其估測誤差小，而控制命令端估測是估測控制命令與輸出回授相減後的誤差，為不易估測的訊號，估測此訊號並無意義，且估測誤差大，所以輸出回授估測有較好的控制效能。
2. 閉迴路控制：若不在輸出回授加入估測，則當延遲時間大於取樣週期時，控制迴路會出現開迴路控制，相較輸出回授估測可即時回授輸出訊號做控制，控制命令估測自然不具較好的控制效能。

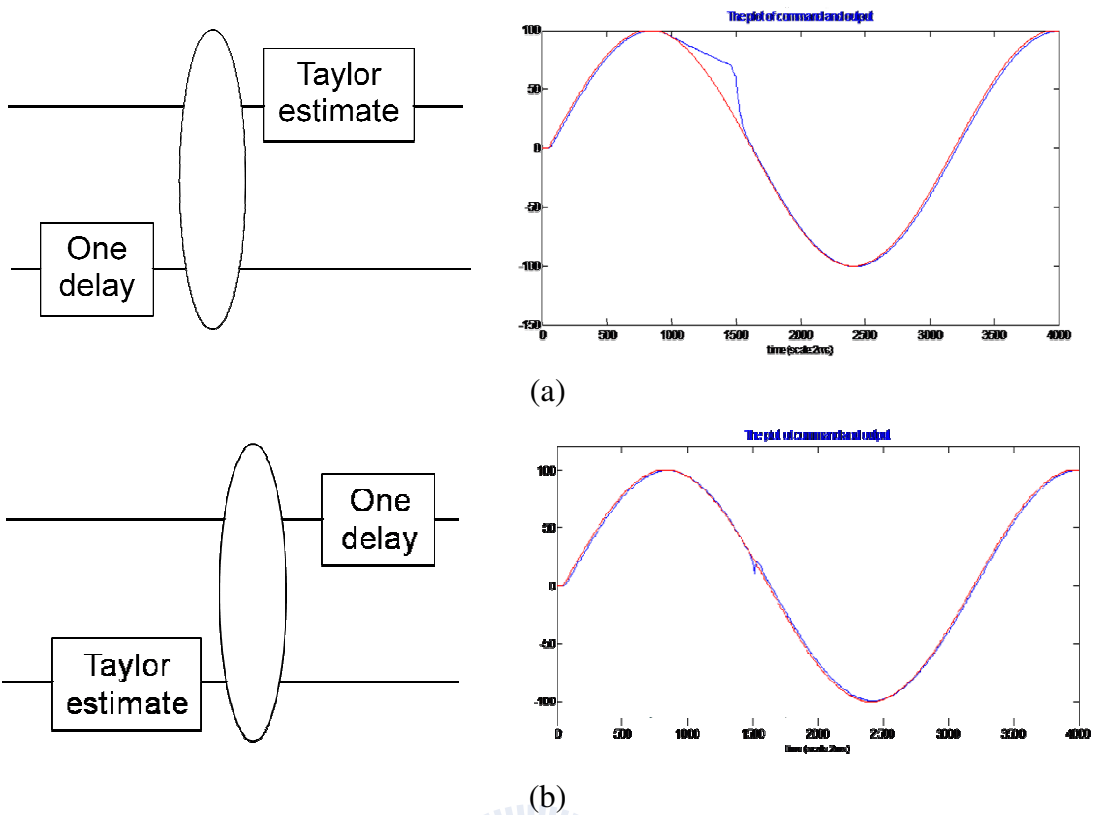


圖 4.3 (a)控制命令端估測與 (b)回授命令端估測之示意圖與輸出響應模擬結果

圖 4.4 為加入回授估測的系統方塊圖，命令 $u(k)$ 與輸出回授的命令相減經控制器處理後，藉由網路傳輸命令，而其命令封包傳送間隔為每一取樣週期傳送一封包，所以是時間觸發(time trigger)，而受控端收到命令後，由感測器感測出輸出訊號作回授控制，其輸出回授亦是根據時間觸發來傳送封包，不同於先前討論的網路控制系統，本研究在受控端傳回控制端的路徑中，加入估測器，估測出未能即時接收到的輸出回授，避免控制迴路成為開迴路。而無法及時傳送的則捨棄不用，以避免 TCP/IP 協定一直重傳而增加延遲時間。

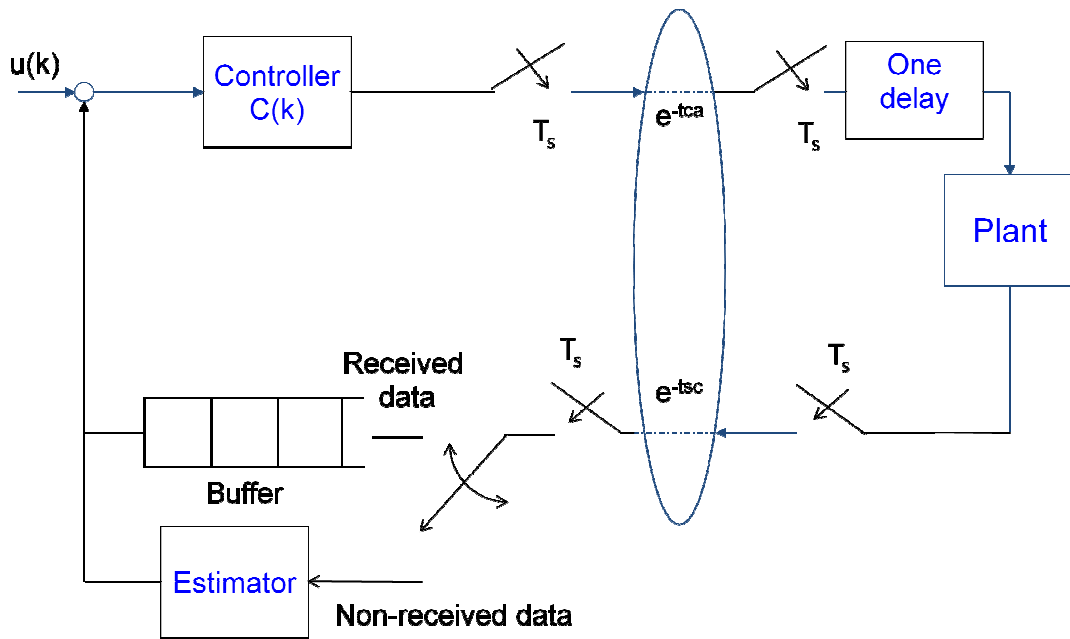


圖 4.4 加入回授估測的系統方塊圖

在第三章我們討論到資料遺失對輸出回授採用時間觸發的網路控制系統之影響以及網路控制系統會有一個最好的控制效能，在取樣週期約等於網路正常不壅塞的延遲時間，為了解決此問題，在 4-1 節我們提出輸出回授估測的方式避免網路控制系統進入開迴路控制以及改善控制效能，下面將以實驗驗證其可行性。

圖 4.5 為加入輸出回授估測與未加入輸出回授估測，時間延遲對馬達位置控制的比較，同 3-3 節的實驗，取樣頻率為 50 Hz，命令為弦波，其頻率為 0.157 Hz，因為馬達本身的頻寬約在 1 Hz 的限制，所以其命令頻率不能大於 1 Hz。由圖可以看出加入估測的輸出響應相較於未加入的輸出響應較為平滑，且接近原控制命令，而當延遲時間變化劇烈，依舊可以讓輸出訊號維持穩定不發散，近似於原控制命令，這顯示加入輸出估測的網路控制系統具有良好的循跡性，且提升整體的控制效能。但在本實驗當延遲時間大於 400ms 時，加入輸出估測，系統依然會不穩定，因為此時系統的極點(poles)由於延遲時間過大的影響已進入左半平面，而單靠估測器的補償是無法改變系統的極點位置。所以加入估測

器確實可以解決因資料遺失所導致控制效能下降的問題，但仍無法有效解決因過大的延遲時間所產生的系統不穩定問題。

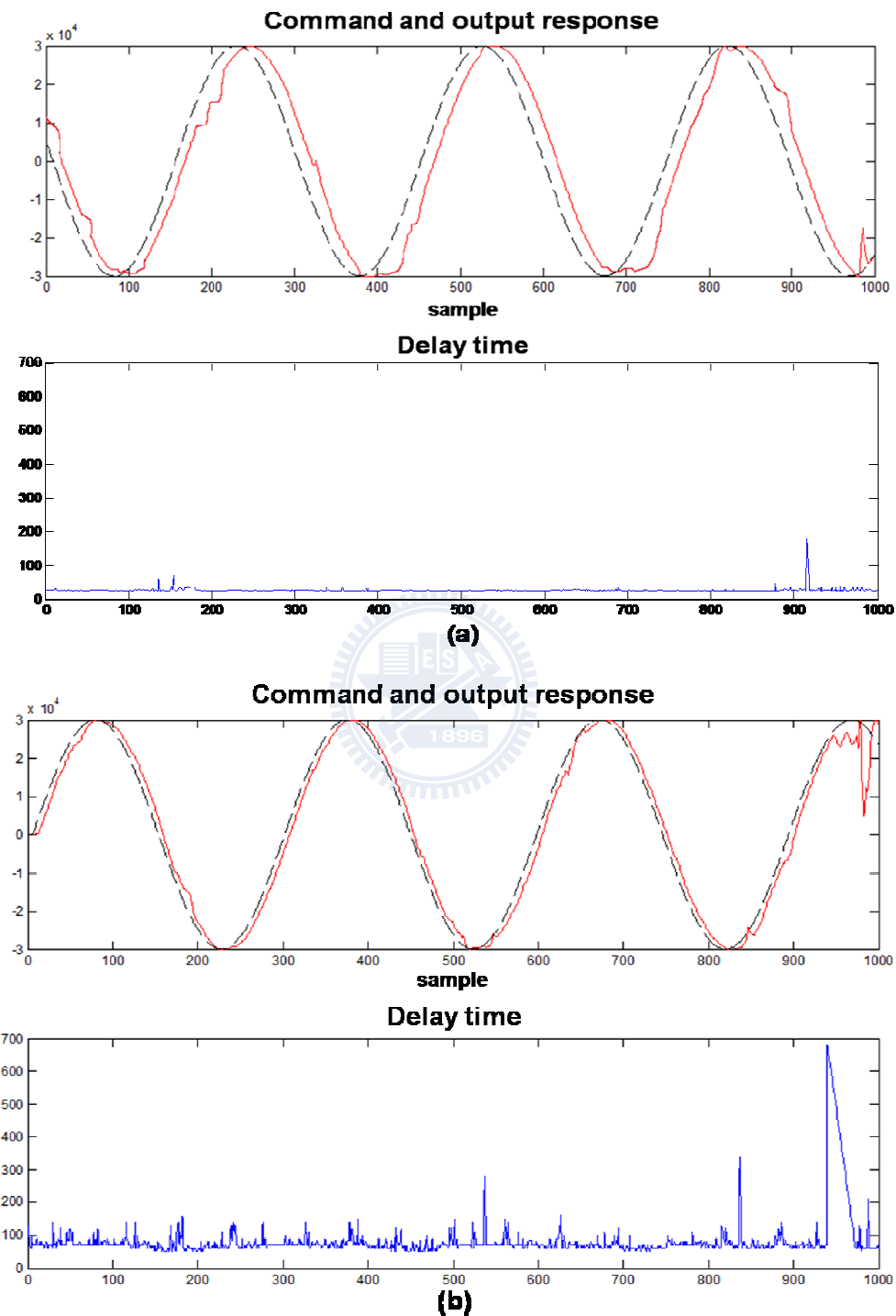


圖 4.5 延遲時間對馬達位置控制影響實驗圖

(a)未加入輸出回授估測 (b)加入輸出回授估測

圖 4.6 為不同取樣週期下，網路控制系統加入輸出回授估測與未加入輸出回授估測的輸出誤差比較，10 筆實驗資料平均。圖中取樣週期小於 10ms，系統進入不穩定狀況，無法量測輸出誤差，故用虛線表示。具有輸出回授估測的網路控制系統在取樣週期 50~100ms 時，並無太大的改善效果，因為資料遺失率低於 5%，讓估測器少有啟動的機會；雖然資料遺失率低，但因為低取樣頻率導致馬達位置誤差大。當取樣週期逐漸下降時，位置誤差隨取樣週期下降，回授估測的改善效果也逐漸增加，所以改善效果隨資料遺失率增加而增加。取樣週期等於 20ms 時，NCS 具有最佳的控制效能，而加入回授估測仍可以改善控制效能多達 30%。取樣週期縮小至 5ms 時，未加入回授估測的網路控制系統已不穩定，因為過大的資料遺失率導致系統無法長期處於閉迴路的狀況，但加入回授控制，可以讓系統穩定，但無可避免的是輸出誤差大幅上升。取樣週期 2ms 時，因為連續遺失的封包數遠大於估測器的階數 5，導致估測器的估測誤差過大，讓系統不穩定。

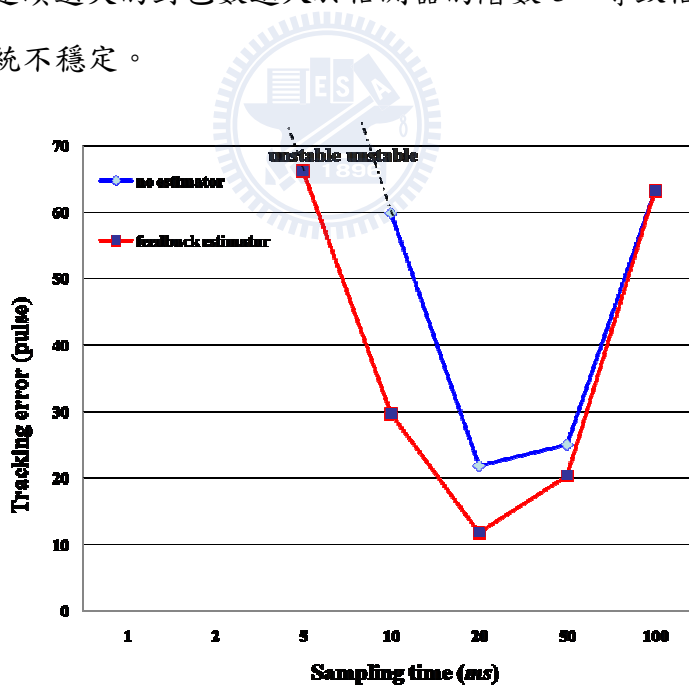


圖 4.6 網路控制系統的輸出誤差加入回授估測的比較

圖 4.7 為不同控制命令下估測器對輸出誤差之改善，從圖中可以得知，無論任何頻率命令，其取樣週期越大，輸出誤差的改善越不明顯，原因是如前面

所敘述的相同，低資料遺失率讓估測器少發生作用，而高頻命令下，改善程度較小，其原因是因為高頻命令，其訊號變化大，容易讓估測器產生錯誤估測之問題，所以本研究所適用的命令訊號頻率不適合高於 1 Hz，一方面是系統頻寬限制，一方面也是因為高頻命令效果差。

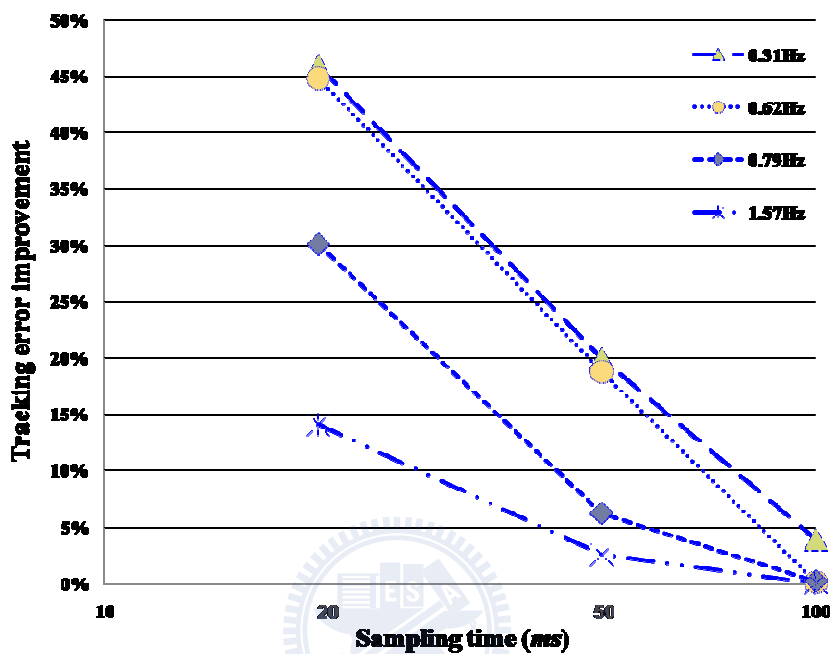


圖 4.7 不同頻率之控制命令下估測器對輸出誤差之改善

4-4 智慧訊息估測器 (Intelligent Message Estimator, IME)[22]

從圖 4.5(b)中，我們發現即使使用泰勒估測器，在網路使用量過度壅塞的情況下，輸出響應會有發散不受控的現象，由量測網路延遲時間可知，此時的延遲時間已接近 500~600ms，導致過多的連續資料遺失，造成泰勒估測器錯誤估測。為了解決在高資料遺失率下，泰勒估測器錯誤估測的問題，從前面討論估測器的章節中，我們知道在大量的資料遺失下，one-delay 可以避免錯誤估測的現象發生，而在突然的一兩筆資料遺失下，泰勒估測器具有高估測精確度。所以試圖透過監控先前資料遺失的狀態來決定所需的估測器可以處理任何資

料遺失狀態。

首先先定義評估網路資料遺失狀態的指標，我們引用[22]所提出的 states of dropout (SD)作為評估網路資料遺失狀態的指標。先定義資料狀態(Data State)，接收到資料的資料狀態(DS)為 0，未接收到資料的資料狀態(DS)為 1，這在下面定義與計算 SD 會用到。

states of dropout (SD_k)共有六種狀態，分別為 0~5，表示在此狀態前 5 筆資料遺失的筆數，k 指第 k 次的取樣週期。但在第 k 次的取樣週期中，若有收到資料則無須啟動估測器，但其 SD 值仍可得到，但此值是無意義，所以我們再定義一指標為 DQ，為 Dropout Quantity，當收到資料則 DQ 不能計算，未收到資料 DQ 等於 SD，如此一來，當 DQ 越大表示網路資料遺失率越大。根據此指標，我們可以判斷何時要切換取樣頻率。

DQ 指標除了可以判斷目前的網路資料遺失率，還可以判斷訊息遺失的密集程度，一般在討論資料遺失率對系統的影響不會考慮訊息遺失的密集程度，根據[22]，訊息遺失的密集程度亦對系統有影響，下圖是不同的平均 DQ 值在相同的資料遺失率，圖 4.8(a)和圖 4.8(b)是具有相同的資料遺失率，但(a)其資料遺失分散，(b)其資料遺失密集，如圖可知，DQ 指標具有反應資料遺失率與訊息遺失的密集程度的優勢。

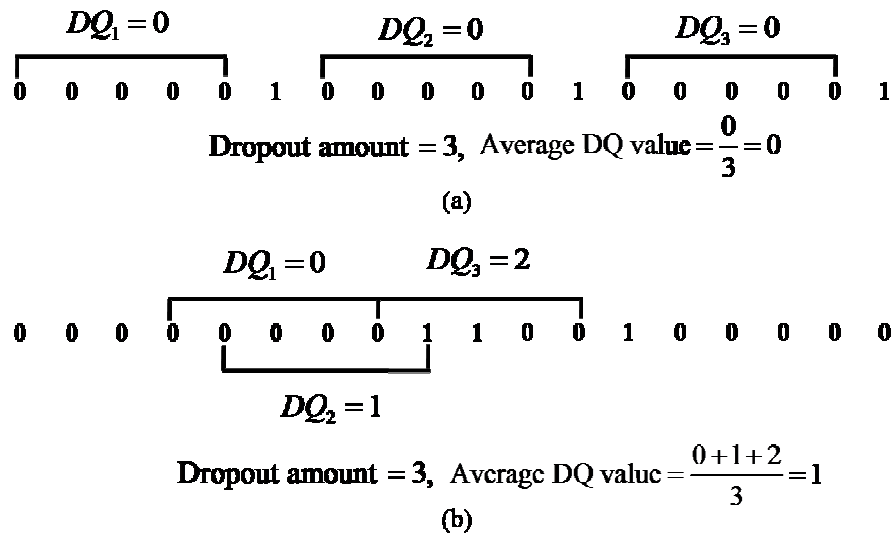


圖 4.8 不同的平均 DQ 值在相同資料遺失率(a)資料遺失分散 (b)資料遺失密集

下面我們將討論在不同的平均 DQ 值下，個別估測器的估測效果。

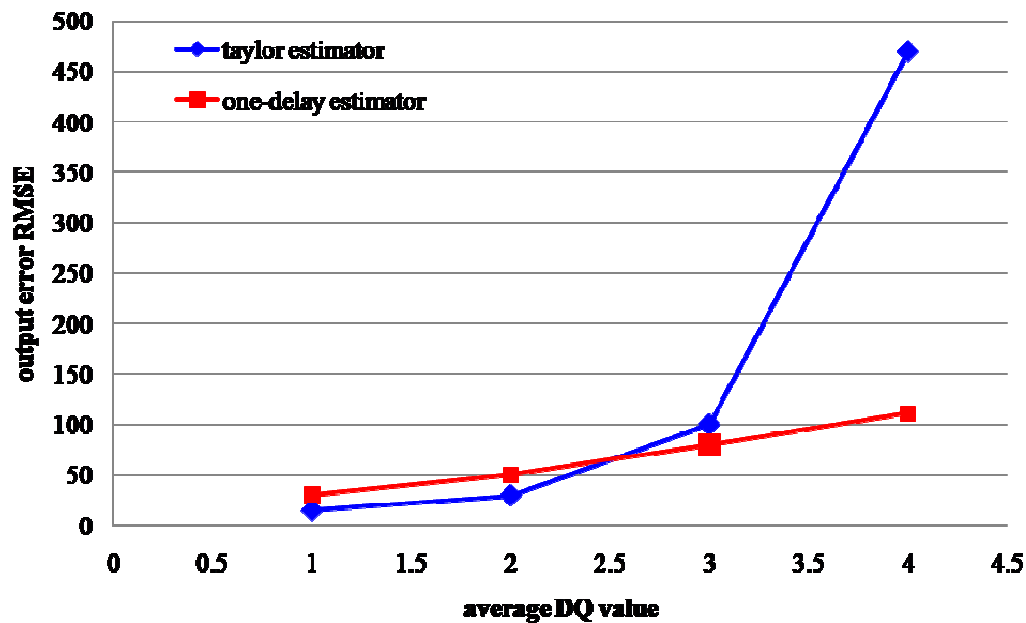


圖 4.9 泰勒估測器與 one-delay 估測在不同平均 DQ 值的輸出誤差模擬

圖 4.9 為泰勒估測器與 one-delay 估測在不同平均 DQ 值的輸出誤差比較，發現在平均 DQ 值大於 3 時，泰勒估測器的輸出誤差急劇增加，代表已發生錯誤估測的現象，相反的 one-delay 估測則輸出誤差緩慢增加，根據先前的分析，我們找到在不同的平均 DQ 值下，泰勒估測與 one-delay 估測具有個別之優勢，在 DQ 值大於 3 時，one-delay 具有較佳的補償效果，而在 DQ 值小於 3 時，泰勒估測具有較佳的補償效果，下面列出切換估測的的法則：

$$\begin{cases} \text{DQ} = 0,1,2 & \text{Taylor estimator is adopted} \\ \text{DQ} = 3,4,5 & \text{One-delay estimator is adopted} \end{cases} \quad (4-10)$$

所以當我們只要即時監控網路目前的 DQ 值，便可以判斷何時須用泰勒估測器，何時須用 one-delay 估測。

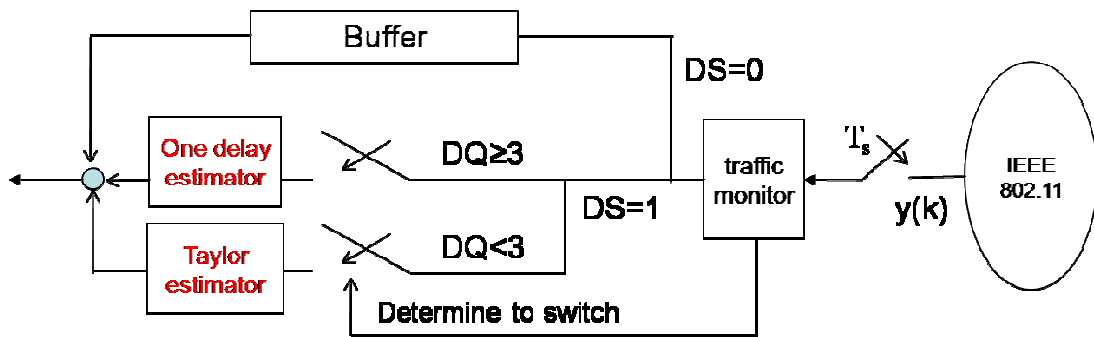


圖 4.10 IME 實現架構圖

圖 4.10 為 IME 實現架構圖，當時間觸發下，每次取樣週期，網路流量會受到監控，得到目前資料狀態(DS)與遺失率量化指標(DQ)，根據 DS 與 DQ 來判斷回授訊號要如何處置。

4-5 智慧型估測器模擬與實驗

此節將針對前面所設計的智慧型估測器(IME)，以模擬來驗證其可行性，並實際實現於無線網路控制系統上。

首先說明模擬時重載與輕載之定義，在模擬時，我們可把網路延遲時間作為量化網路環境的一項指標，當平均網路延遲時間越大，網路使用量越壅塞，而網路延遲時間變異量的大小則與網路是否易受外在干擾之影響有關，無線網路因為其為開放式的網路環境，所以具高變異量的特性。根據此特性，我們定義網路使用量，重載為平均網路延遲時間為 100ms，變異量為 20ms 的常態分布函數，輕載為平均網路延遲時間為 20ms，變異量為 20ms 的常態分布函數。

圖 4.11 為不同估測器，在網路使用量為輕載下的模擬結果，比較沒有加入估測、泰勒估測與 IME，發現沒有加入估測其輸出響應仍有一些地方不平滑，因為回授端無法定時回傳輸出響應資料作閉迴路控制，失去最初使用時間觸發的本意，導致輸出響應不佳，根據(3-2)式，其輸出誤差為 19.62，而泰勒估測

與 IME 均具有良好的控制效果，其輸出誤差分別為 5.99 和 5.84，相差不大，因為在輕載的情況下，其 DQ 值大多為 0 或 1，所以 IME 多工作在泰勒模式下。但當網路使用量在重載的環境下，便有極大差異。

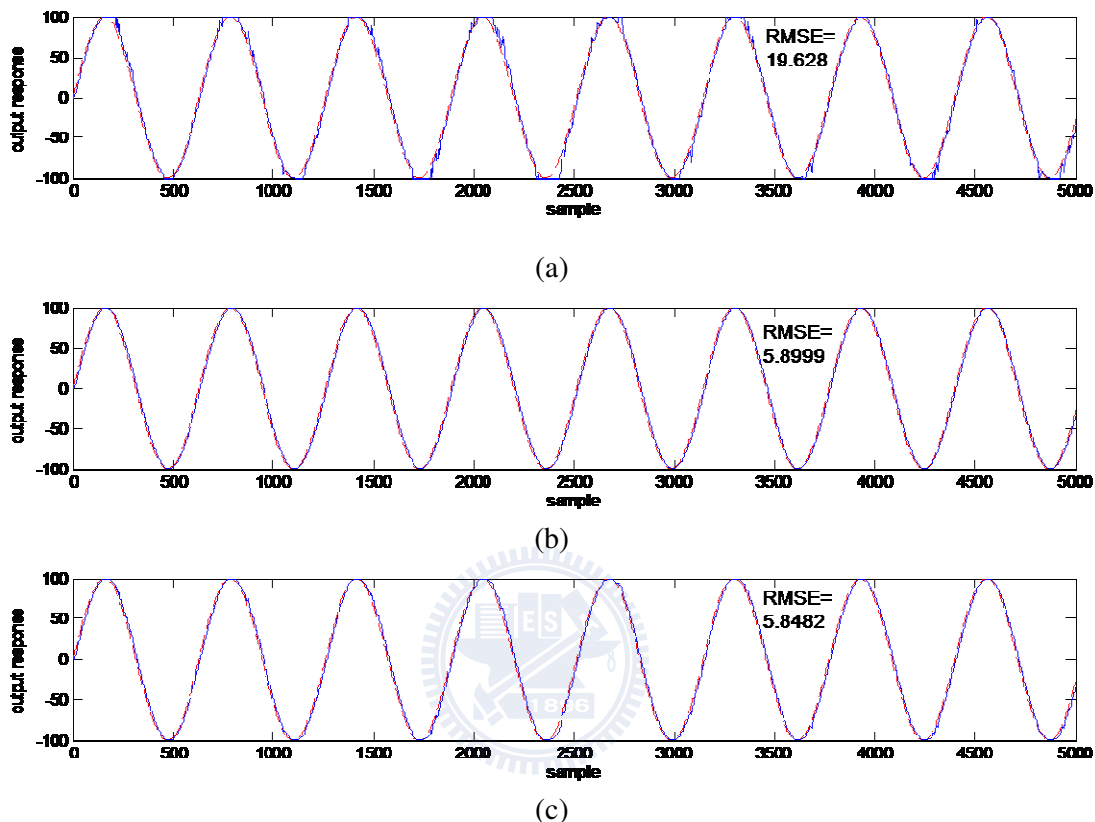


圖 4.11 不同估測器在網路使用量為輕載下的模擬結果 (a)未加估測器
(b)泰勒估測器 (c) IME 估測

圖 4.12 為不同估測器，在網路使用量為重載下的模擬結果，比較沒有加入估測、泰勒估測與 IME，發現泰勒估測，其輸出響應已不穩定，因為在重載的情況下，其 DQ 值大多大於 3，導致泰勒估測器發生錯誤估測之現象，讓估測精確度大幅下降，此時的估測器反而成為系統不穩定的因素，利用 IME 可以根據先前所量測的資料遺失量，切換成 one-delay 的模式，避免錯誤估測，模擬顯示在重載具有良好的控制效果。所以根據以上模擬結果，我們所設計的 IME 估測器的確具有優良的估測精確度與良好的控制效果在不同的網路使用量上。

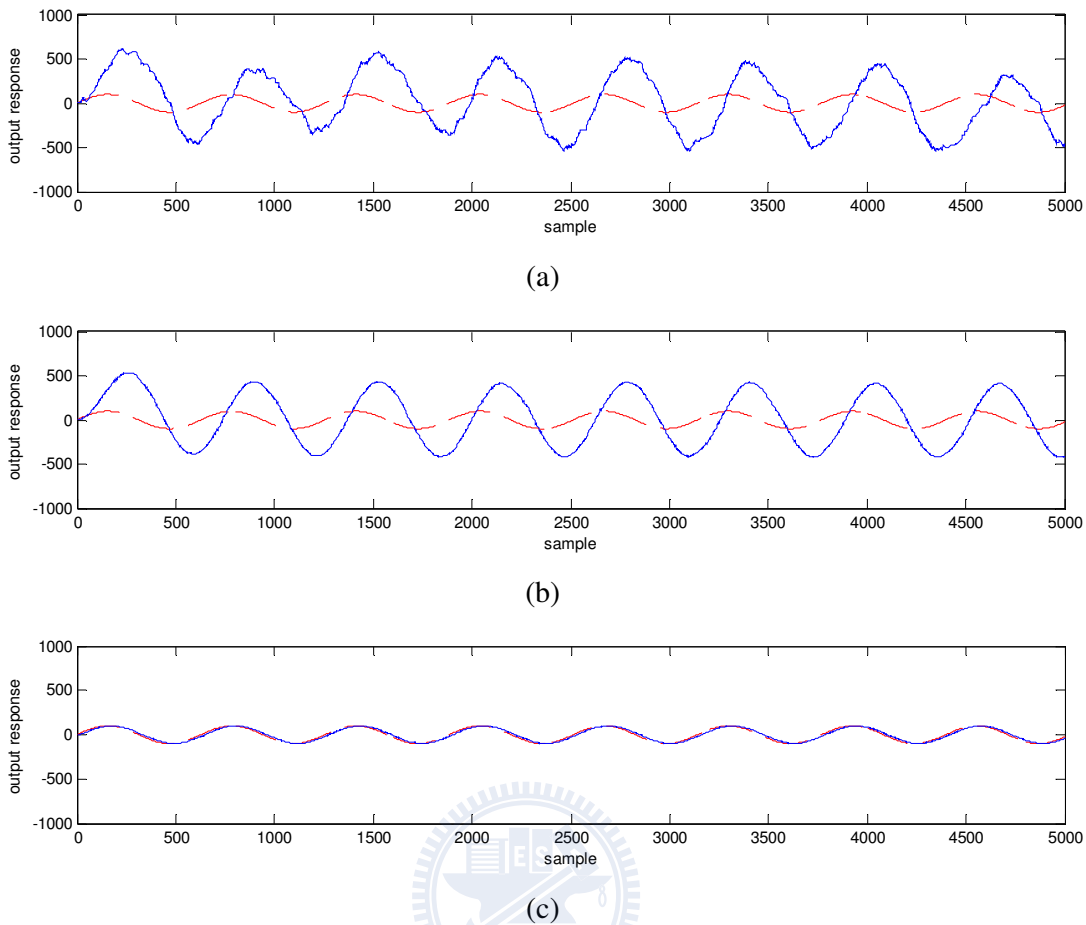
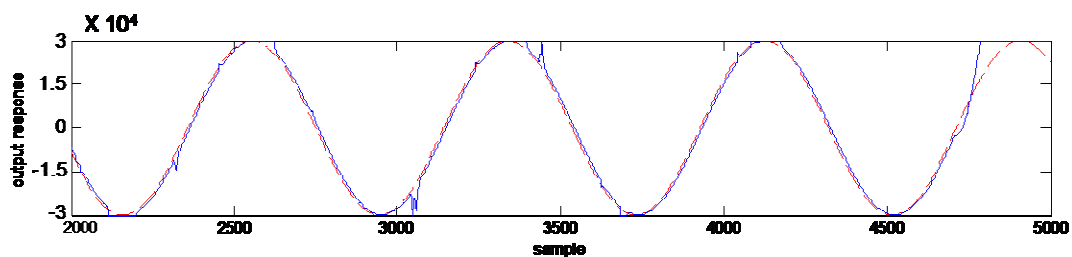


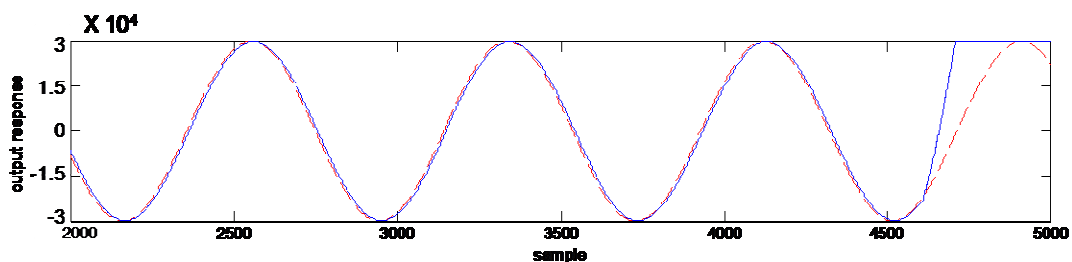
圖 4.12 不同估測器在網路使用量為重載下的模擬結果
 (a)未加估測器 (b)泰勒估測器 (c)IME 估測

模擬驗證其可行性，本研究將此估測法實現於無線網路控制系統，圖 4.13 為沒有加入估測、泰勒估測與 IME 的實驗輸出響應比較。此實驗環境盡可能地維持相似，我們在後面增加網路使用量，如：以無線網路下載資料，設法讓系統不穩定，如圖可知，在泰勒估測已無法保持穩定的情況下，IME 依舊可保持系統穩定，且具有良好控制效果，顯示 IME 優良的估測精確度與良好的控制效能。圖 4.14 為不同估測器，不同取樣週期，平均輸出誤差之實驗結果，我們從每種估測器在不同取樣週期，去除差異過大的輸出誤差，各取十筆輸出誤差的實驗結果作平均，得到圖 4.14，如圖可知，IME 可改善輸出誤差達 53.9%，在取樣週期 10ms，相較於泰勒估測，均具有最佳的控制效能

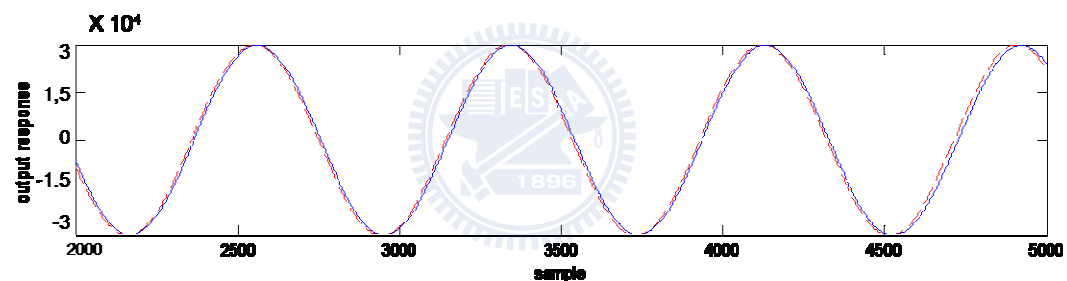
下，特別是在較低的取樣週期，因為在較低的取樣週期，其資料遺失率較高，這驗證了 IME 可以解決因高資料遺失率所帶來的錯誤估測問題。



(a)



(b)



(c)

圖 4.13 (a)沒有加入估測、(b)泰勒估測與(c)IME 的實驗輸出響應比較

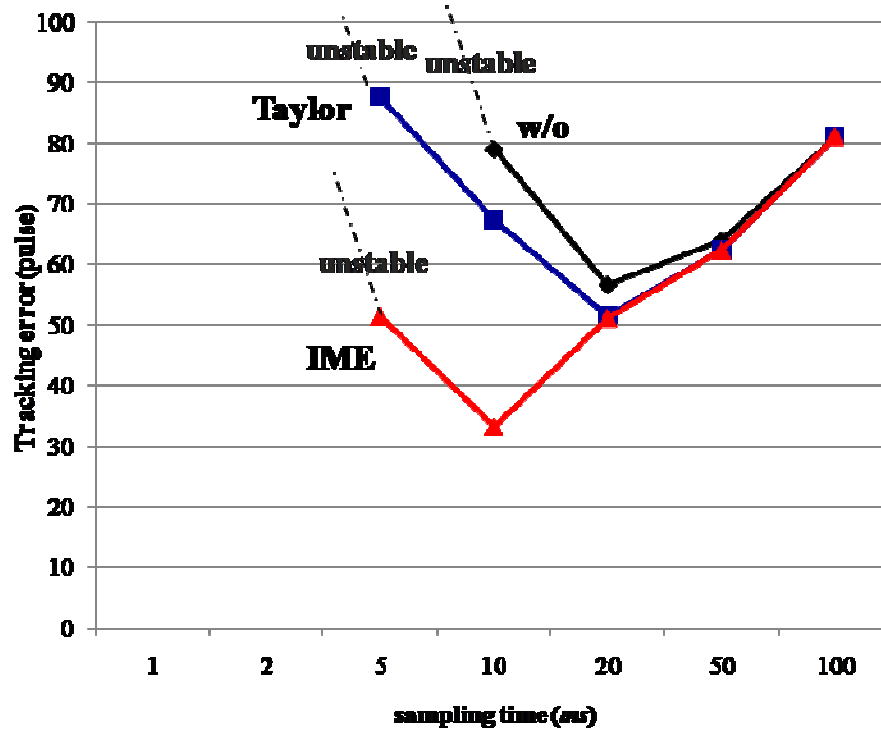


圖 4.14 不同估測器，不同取樣週期，平均輸出誤差之實驗結果



第五章 網路流量監控

在第五章我們將討論當無線網路過度壅塞時，導致高資料遺失率的現象，讓估測器依據估測所得的訊息進行估測，產生估測精確度大幅下降的問題，本章先說明為何網路壅塞，產生高資料遺失率，再藉由網路流量監控，以降低資料遺失率，藉此提升控制效能與穩定度。

5-1 網路環境對資料遺失率之影響

在第三章我們知道當取樣週期減少時，資料遺失率會逐漸增加，所以若想更高取樣頻率作控制，便須要加入估測器來處理資料遺失的問題，但取樣週期固定後，資料遺失率則和網路環境有關，特別是針對於易受外在環境影響的無線網路。我們針對此特點作以下實驗，首先定義實驗環境下的網路負載之輕載與重載，圖 5.1 是無線網路使用量示意圖，當網路使用量接近 0% 時，定義為輕載，而開啟從網路接收資料的程式(FTP)讓網路使用量在 50% 跳動，定義為重載。如此可以對網路環境作更定量的分析。

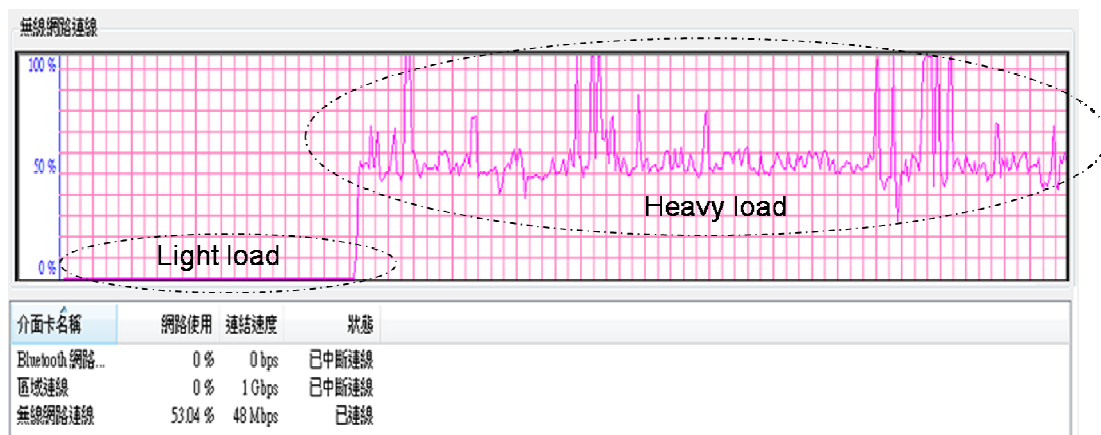


圖 5.1 無線網路使用量示意圖

圖 5.2 是無線網路傳輸環境對資料遺失率之實驗結果，重載為開啟從網路接收資料的程式(FTP)，讓網路使用量在 50% 跳動，輕載為網路使用量接近 0%，如圖可以看出當網路重載時，資料遺失率也隨之增加，而增加取樣週期可以降低資料遺失率，因為增加取樣週期可避免取樣週期小於網路延遲時間，但所付出的代價是取樣週期的上升讓訊號的解析度變差。

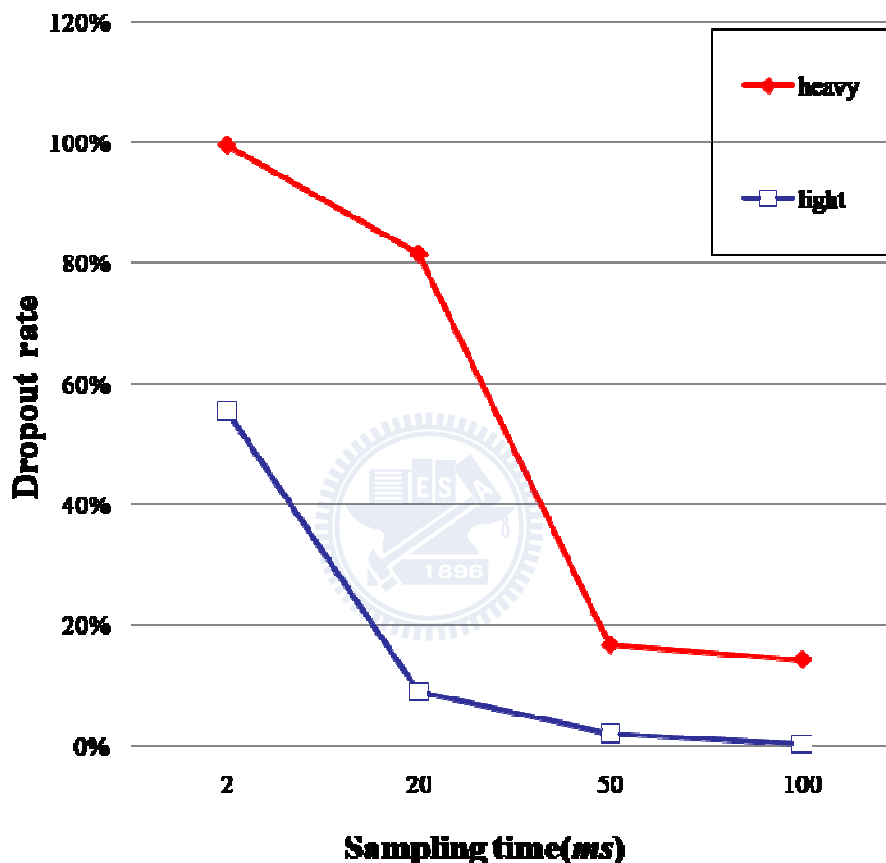


圖 5.2 無線網路傳輸環境對資料遺失率之影響

圖 5.3 為網路環境、取樣頻率對系統輸出誤差之實驗結果，如圖中可知，在相同的取樣週期下，重載的輸出誤差均大於輕載的輸出誤差，因為過高的資料遺失率，導致估測器發生錯誤估測，而重載時，具最低輸出誤差的取樣週期為 50ms 大於重載時具最低輸出誤差的取樣週期 20ms，這顯示隨著網路使用量

的變化，系統最佳的取樣週期亦會變化，因為在密集的網路使用量需要較大取樣週期降低資料遺失率，提升控制效能，但如實驗結果顯示，過大的取樣週期仍會讓輸出誤差增加。

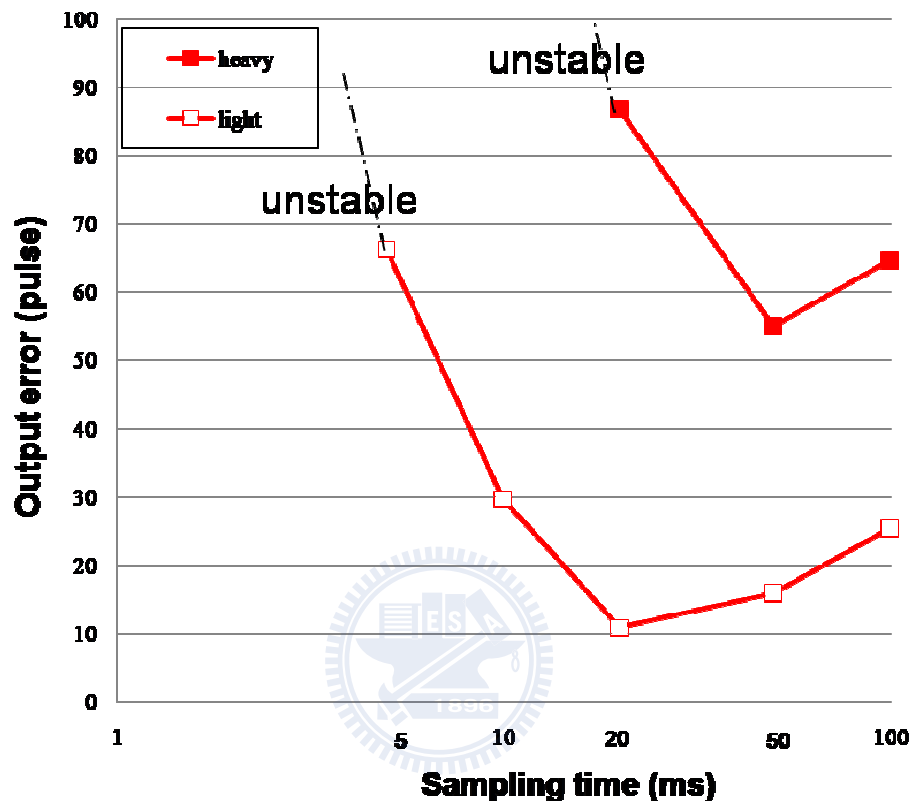


圖 5.3 網路環境、取樣頻率對系統輸出誤差之影響

5-2 網路流量監控

根據圖 5.3，我們知道在網路使用量重載時，最佳的取樣週期為 50ms，而輕載時為 20ms，如果監控網路流量來調整系統的取樣週期，如此可以保證系統不會因為網路壅塞而發散。在此我們設計兩種切換模式，以下分別介紹：

5-2-1 Mode 1 以網路流量作切換指標

圖 5.4 為網路控制系統加入流量監控的方塊圖，我們在 client 接收端加入監測網路流量的機制，將網路目前的資料遺失率即時傳送到 client 來判斷是否要切換至較高的取樣週期以降低資料遺失率，或較低的取樣週期以提高訊號解析度。而監測網路流量的機制同時亦具有判斷是否接收到資料封包的功能，藉此判斷估測器是否該啟動。

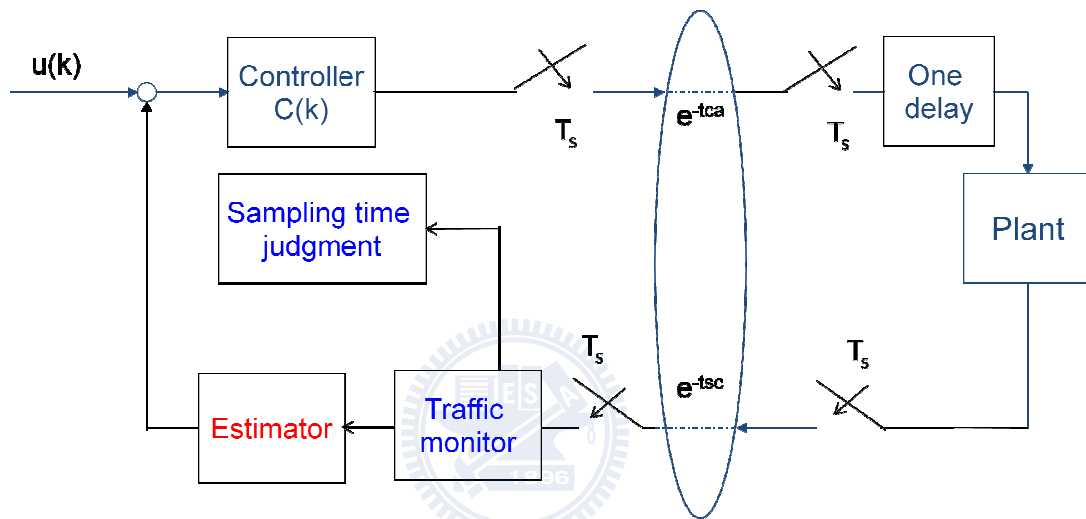


圖 5.4 網路控制系統加入流量監控之方塊圖

圖 5.5 為監控網路流量之切換取樣時間機制的程式流程圖，以下說明機制運作，取樣週期初始值為 20ms。

Mode 1 切換法則：

1. 根據是否接收到資料，啟動估測器。
2. 監控網路流量，連續 5 筆遺失，切換週期至 50ms，連續 5 筆接收，切換週期至 20ms，未達到以上條件，維持現狀。

連續 5 筆資料遺失，代表網路此時的資料遺失率嚴重，估測器會根據前 7 筆資料中有 5 筆是由估測器所產生的，以不精確的資料做估測會導致估測不精

確的問題，須提高取樣週期以降低資料遺失率，相對的，連續 5 筆資料接收，代表網路此時的資料遺失率並不嚴重，可以降低取樣週期，增加訊息解析度，而 5 筆的依據是來自於實驗結果，7 筆切換太慢，系統容易發散，低於 5 筆，在某些網路使用量狀況，切換過於頻繁。

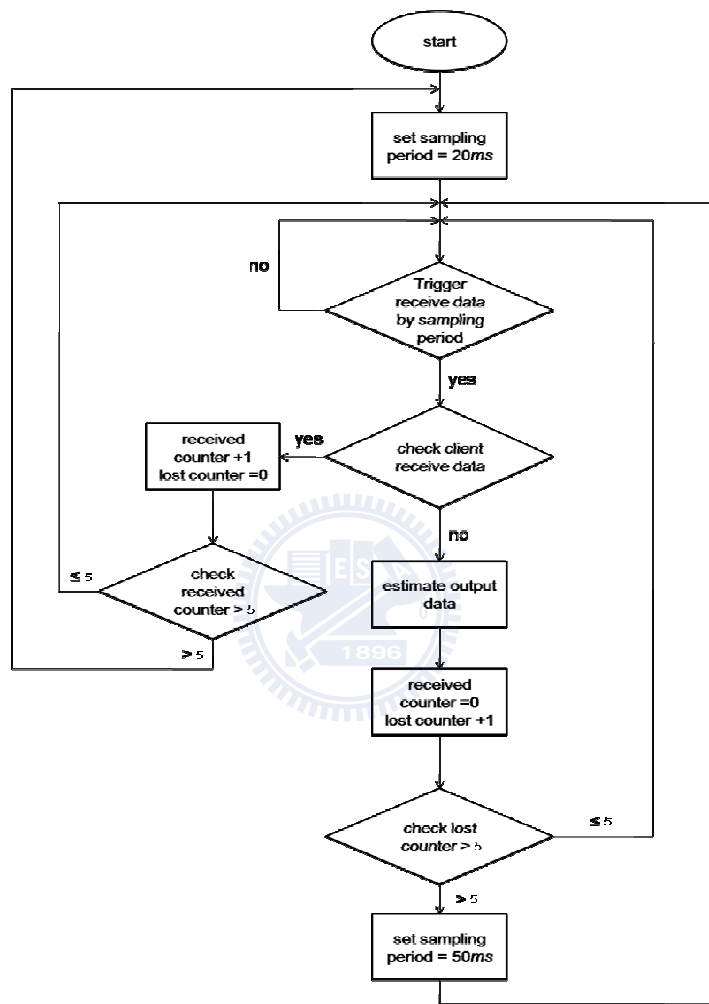


圖 5.5 監控網路流量之切換取樣時間機程式流程圖

5-2-2 Mode 2 以網路流量與誤差作切換指標

之前的設計方法是根據目前的實驗環境作設計，不具通用性，根據 5-1 節的敘述，我們知道在不同的網路使用量，網路控制系統具有不同的最佳取樣時間，假設我們可以藉由監控網路流量來自動調整系統的取樣頻率，如此可以保證系統在任何網路使用狀況，均可以達到穩定且擁有良好的控制效能，而再加入根據誤差切換的機制，所謂的誤差為經網路回授的馬達 encoder 值與命令相減的值。

建立四種狀態來判斷是否增加或減少取樣週期。

Mode 2 切換法則：

1. 網路使用量大，但誤差值並未持續上升：

表示此時的取樣週期仍可以維持不錯的控制效能，無須改變取樣週期。

2. 網路使用量大，但誤差值持續上升：

表示此時的取樣週期已造成控制效能下降，因為過高的資料遺失率，增加取樣週期。

3. 網路使用量正常，誤差值未持續上升：

表示此時的取樣週期仍可以維持不錯的控制效能，無須改變取樣週期。

4. 網路使用量正常，但誤差值持續上升：

表示此時的取樣週期讓訊號解析度過低，使控制效能下降，減少取樣週期。

圖 5.6 為網路控制系統加入流量監控與誤差監控的方塊圖，不同於圖 5.4，增加誤差監控機制，作為另一項判斷的指標。

圖 5.7 為監控網路流量與誤差之切換取樣時間機程式流程圖，設計根據前面四種狀態與參考 4-4 節所提到的資料狀態(DS)與 Dropout Quantity(DQ)，作為是否接收到資料與資料遺失率的指標。

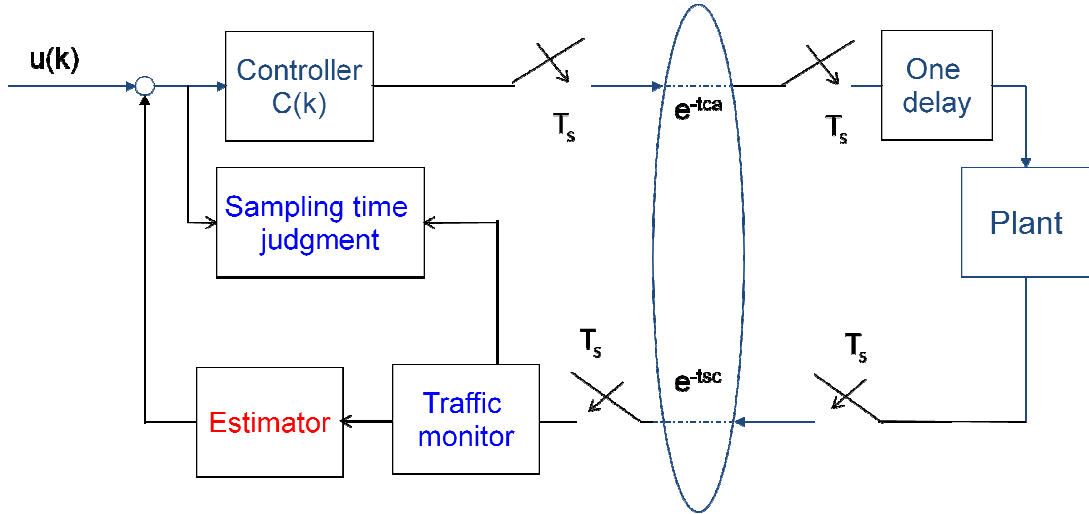


圖 5.6 網路控制系統加入流量監控與誤差監控之方塊圖

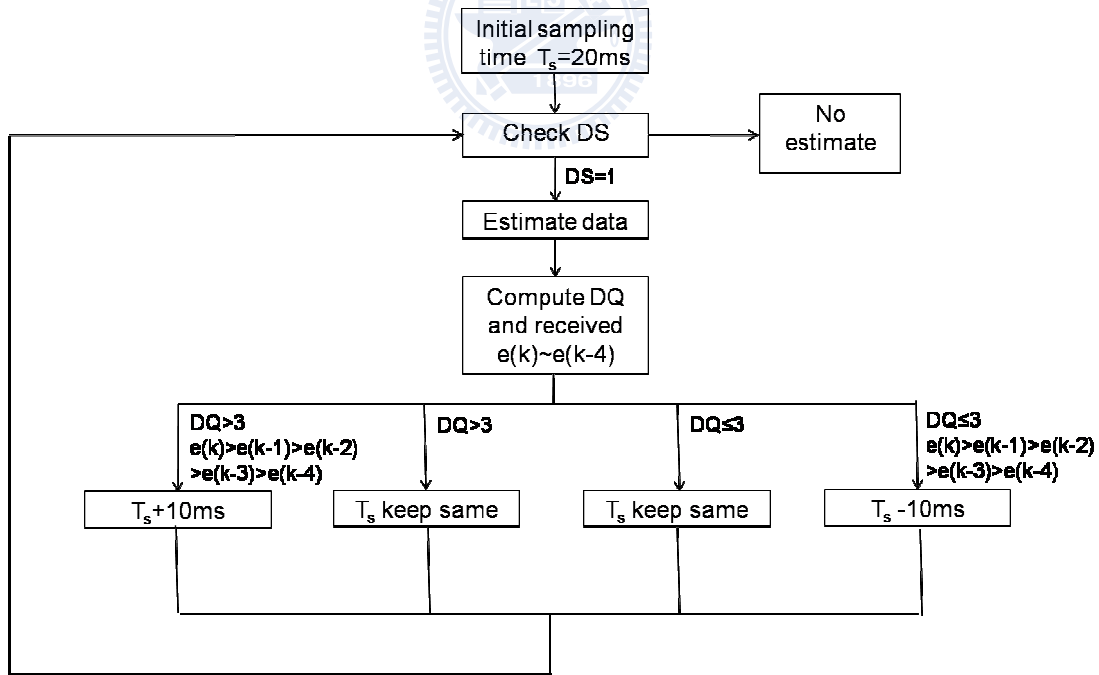
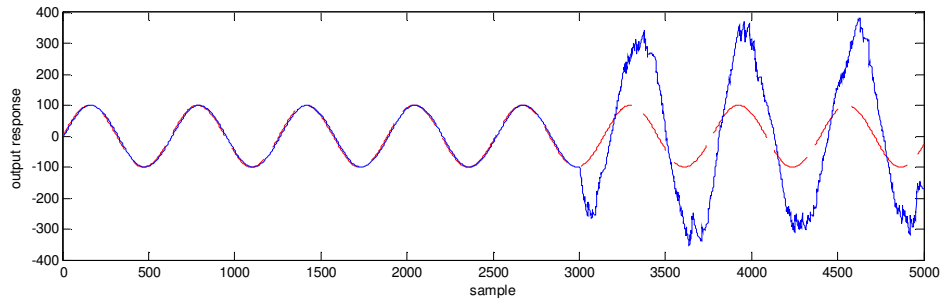


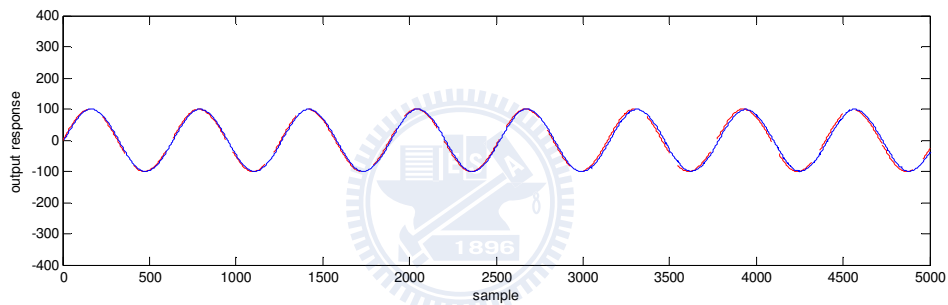
圖 5.7 監控網路流量與誤差之切換取樣時間機程式流程圖

5-3 切換取樣頻率之模擬與實驗

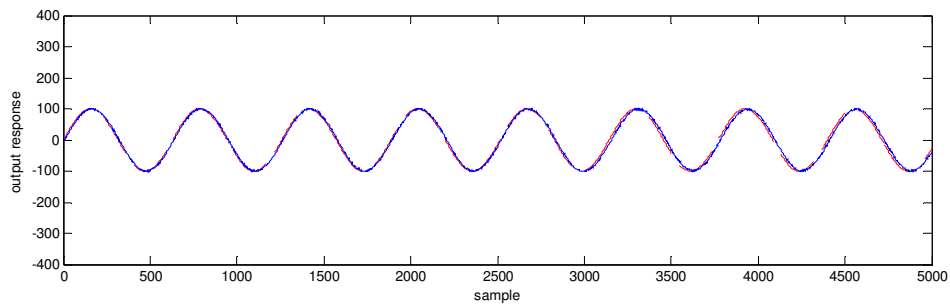
此節將針對前面所設計之切換取樣頻率的機制，以模擬來驗證其可行性，並實際實現於無線網路控制系統上。



(a)



(b)



(c)

圖 5.8 (a)未加切換取樣週期機制、(b)加入切換取樣週期機制(mode 1)與(c) mode 2 之輸出響應模擬

圖 5.8 為切換重、輕載下，有切換機制 mode 1、mode 2 與沒有切換機制的比較，從圖上可以看出，沒有切換機制會因為過高的資料遺失率導致錯誤估測的問題，讓控制效能下降，反之，具有切換機制的網路控制系統，可降低資料遺失率，避免估測器錯誤估測。系統維持穩定。而 mode 1 和 mode 2 的差異不大。

表 5.1 不同切換法則下，平均遺失率與平均輸出誤差之比較

	Heavy network load		Light network load	
Sampling mode	Data dropout rate	Tracking error(pulse)	Data dropout rate	Tracking error(pulse)
Mode 1	16.63%	83.1	8.41%	36.2
Mode 2	18.29%	78.8	9.12%	34.8

表 5.1 為不同切換法則下，作 10 筆資料後，平均遺失率與平均輸出誤差之比較，首先說明模擬時重載、輕載與混合之定義，在模擬時，我們可把網路延遲時間作為量化網路環境的一項指標，當平均網路延遲時間越大，網路使用量越壅塞，而網路延遲時間變異量的大小則與網路是否易受外在干擾之影響有關，無線網路因為其為開放式的網路環境，所以具高變異量的特性。根據此特性，我們定義網路使用量重載為平均網路延遲時間為 100ms，變異量為 40ms 的常態分布函數，輕載為平均網路延遲時間為 20ms，變異量為 20ms 的常態分布函數。

如表可知 mode 2 比 mode1 輸出誤差約改善 5%，改善效果不大，可改善的原因是 Mode 2 取樣週期可作為微調，犧牲一些資料遺失率來提升輸出誤差。改善效果不大的原因可能是

1. 控制器設計問題
2. 切換機制設計不佳

根據 5-1 節的敘述，我們知道在不同的網路使用量，網路控制系統具有不同的最佳取樣時間，假設我們可以藉由監控網路流量與誤差來自動調整系統的取樣頻率(mode 2)，如此可以保證系統在任何網路使用狀況，均可以達到穩定且擁有良好的控制效能，但由前面的模擬結果可知，自動調整系統的取樣頻率並沒有多大改善程度，且實作上自動調整取樣頻率有幾個問題要處理：

1. 控制器設計問題

網路控制系統其控制器為數位控制器，而數位控制器的設計須考慮取樣頻率，所以須建立個別取樣週期下控制器的參數在 client 端，失去自動調整的本意，若建立控制器參數與取樣頻率的關係式於 client 端內，但仍有控制器設計錯誤之問題存在。

2. 取樣頻率切換過於頻繁

取樣頻率切換過於頻繁會導致系統為動態取樣頻率，對網路封包欄位定義、量測延遲時間等設定增加複雜度，更惡化 client 端與 DSP 端同步的問題。

基於以上問題，我們使用切換至特定取樣頻率(mode 1)，而非自動調整取樣頻率(mode 2)，如此一來控制器可以針對特定的取樣頻率作設計，且不會過於頻繁的切換取樣頻率

表 5.2 為不同取樣週期模式下，作 10 筆資料，平均遺失率與平均輸出誤差

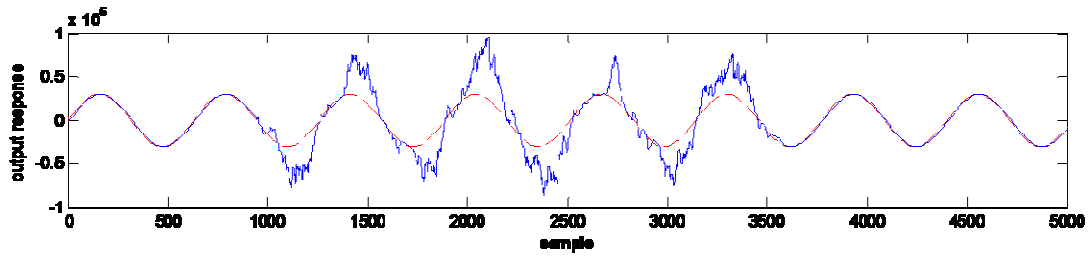
之比較，從表 5.2 可得知，在不同的網路使用量下，系統最佳的取樣週期亦不同，與前面我們的實驗推論相同。重載時，降低資料遺失率可以降低輸出誤差，而輕載時，降低取樣週期可以降低輸出誤差，符合我們切換取樣週期的規則。而切換取樣週期均具有不錯的控制效能，在不同的網路使用量。

表 5.2 不同取樣週期模式下，平均遺失率與平均輸出誤差之比較

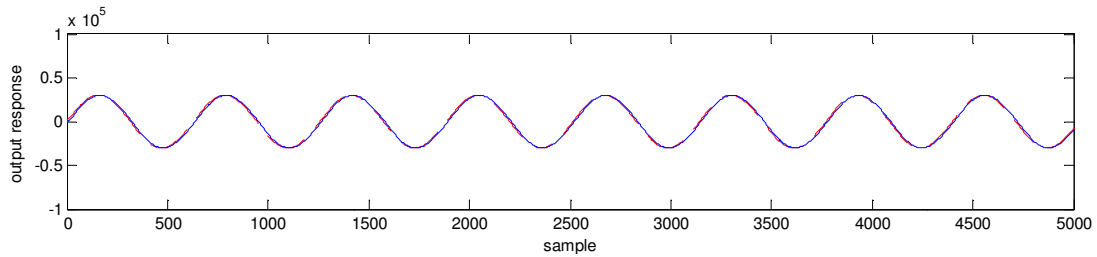
	Sampling period mode	Data dropout rate	Tracking error (pulse)
<i>Heavy network load</i>	20ms	35.82%	136.96
	50ms	12.53%	35.27
	switching	15.48%	39.68
<i>Light network load</i>	20ms	8.41%	12.32
	50ms	3.52%	21.54
	switching	6.86%	14.27
<i>Mix network load</i>	20ms	25.86%	87.1
	50ms	9.13%	31.78
	switching	12.03%	28.52

由上面的模擬可知，切換取樣週期確實具有降低資料遺失率與提高控制效能的優點，下面將實現在實際的網路控制系統下。

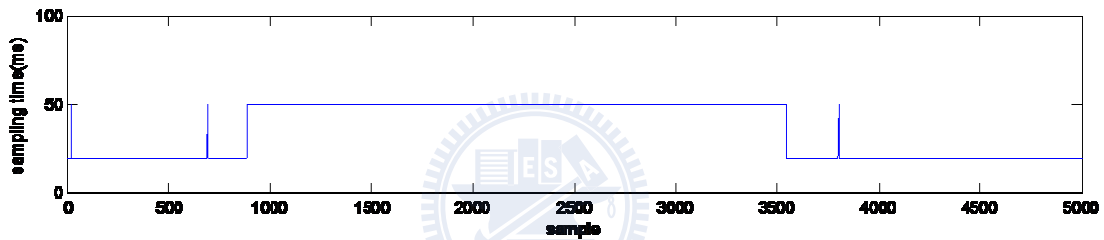
圖 5.9 為有切換機制與無切換機制之輸出響應實驗比較，從圖中可看出，取樣週期固定為 20ms 時，當中間我們開啟從網路接收資料的程式(FTP)讓網路使用量在 50%跳動時，系統會不穩定，反之，具有切換取樣頻率機制，當網路使用量增加時，會切換至較高的取樣週期，讓系統保持穩定。而至於上圖的輸出響應有飽和的現象，是因為我們在設計估測器時，為了避免嚴重的錯誤估測損害硬體設備與造成 DSP 計算有溢位現象，讓估測值不大於命令範圍。



(a)



(b)



(c)

圖 5.9 (a)無切換機制與(b)有切換機制之輸出響應實驗比較以及(c)系統取樣週期

圖 5.10 分別為網路使用量在輕載與重載下，不同取樣週期模式之輸出誤差，比較該兩張圖可以發現，個別網路使用量下，最佳的取樣週期亦不相同，重載時為取樣週期 50ms，而輕載時為取樣週期 20ms，但切換取樣週期均具有良好的控制效能，在重載時可以解決因高資料遺失率所帶來的不穩定問題，且在所有的取樣週期模式下，具有最小的變異量，這結果證明切換取樣週期機制具高容忍網路環境的強健性與控制效能的精確性。

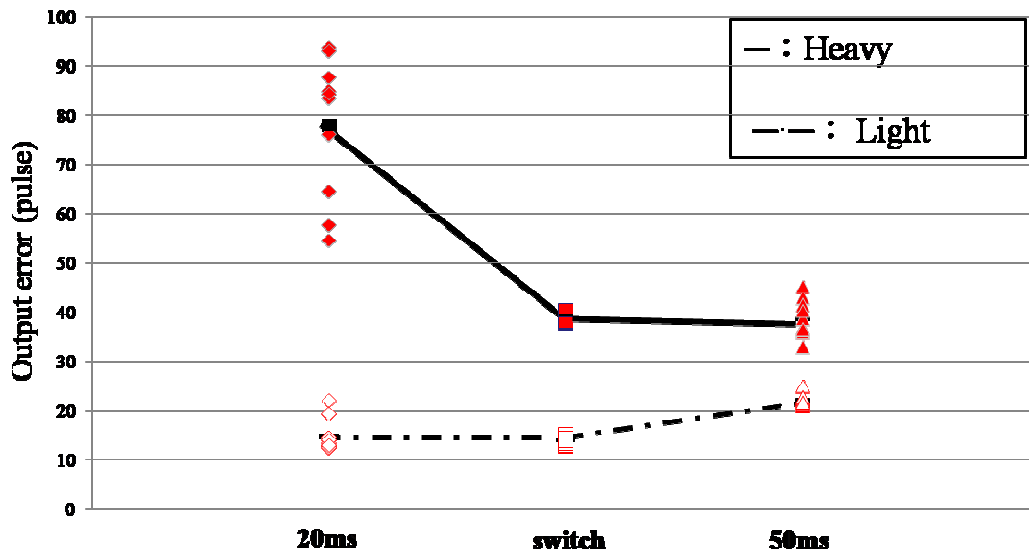


圖 5.10 網路使用量在輕載與重載下，不同取樣週期模式之輸出誤差



第六章 結論與未來發展

6-1 結論

本研究針對以 IEEE 802.11 無線網路為傳輸媒介的網路控制系統，透過延遲時間、資料遺失率與系統控制效能的一系列實驗，發現資料遺失對控制效能的影響以及外在網路環境對系統的影響，藉此提出以時間觸發作為網路傳輸觸發依據的閉迴路網路控制系統，具有估測遺失輸出回授資料封包與監控網路流量以調整取樣頻率的機制，透過模擬以及在網路控制平台，實際驅動馬達來進行驗證，以下歸納出幾點結論：

1. 探討網路延遲時間、資料遺失率與取樣週期的關係，找出最佳取樣週期

本研究歸納實驗結果，得到隨著取樣週期的增加，資料遺失率會下降，而網路延遲時間會遞減且收斂到一定值，而該定值為網路控制系統的最佳取樣週期，在本實驗環境的最佳取樣週期約在 20ms。取樣週期小於 20ms，延遲時間、資料遺失率大幅上升，控制效能大幅下降進而不穩定。

2. 建立時間觸發的閉迴路網路控制系統，以輸出回授估測處理遺失導致低控制效能問題

本研究針對需要高精確度的網路控制系統，如運動控制，採用時間觸發，相較於事件觸發，具有閉迴路即時控制的優點。針對使用的網路環境為高時間延遲的無線網路如 IEEE802.11 會有高資料遺失率的問題，提出在輸出回授端加入估測器來即時估測未能接收到的資料，藉此降低輸出誤差。從實驗中驗證，加入回授估測補償後，取樣週期等於 20ms 時，控制效能可提升約 30.1%，而在網路壅塞時，以 SDQ

估測可降低輸出誤差約 53.9%。在取樣週期等於 5ms 時，雖然延遲時間、資料遺失率大幅上升，仍可以保持系統穩定，增加系統可穩定的取樣週期至 5ms。

3. 建立監控網路流量以調整取樣頻率的機制，避免網路環境壅塞產生過大的資料遺失率。

本研究針對易受外在網路環境影響的無線網路控制系統，提出監控網路流量以調整取樣頻率的機制，藉此降低當高網路負載時所急劇增加的資料遺失率以及輸出誤差，同時再整合前面所做的回授估測以提升控制效能與穩定度。模擬驗證當高網路負載，固定取樣頻率 50Hz 時的資料遺失率為 35.82%，加入監控網路流量調整取樣頻率的架構後，其資料遺失率為 15.48%，降低 56.8%，而網路壅塞時，相較固定取樣週期為 20ms，輸出誤差降低 67.7%，未加此機制的系統會不穩定，而加入此機制的系統會穩定，在網路環境壅塞的情形下顯示此架構可有效改善資料遺失率、控制效能與容忍網路環境的穩健性。

6-2 未來發展

1. 本文根據目前所使用的無線網路特性，選擇 20ms 作為取樣週期，無須考慮同步問題，倘若使用傳輸速度更快、頻寬更大的網路，取樣週期可選擇更低，以提高控制精度，但須讓 client 端與 DSP 端同步控制。
2. 本文目前的切換機制較為簡單，未來可以設計更良好的切換機制，甚至朝向自動調整取樣週期的目的來著手。
3. 本文目前實驗在馬達負載的情況仍是空載實驗，未來可以加入負載，對具有負載的馬達透過網路加以控制，可能需要一些額外的控制架構作補償。

參考文獻

- [1] J. Y. Yu, S. M. Yu, and H. Q. Wang, "Survey on the Performance Analysis of Networked Control Systems," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Volume 6, pp.5068–5073, 10-13 Oct. 2004.
- [2] P. L. Tang, and C. W. de Silva, "Compensation for Transmission Delays in an Ethernet-Based Control Network Using Variable-Horizon Predictive Control," *IEEE Transaction on Control System Technology*, Volume 14, No.4, pp.707-718, Jul. 2006.
- [3] J. Nilson, B. Bermhardsson, and Wittermark, "Schtochastic Analysis of Control of Real Time Systems with Random Time Delays," *Automatica*, Volume 34, Issue 1, pp.57-64, B.1998.
- [4] 鄭景文, "動態網路控制系統之時間延遲分析," 國立交通大學, 碩士論文, 中華民國 95 年
- [5] C. Canudas de Wit, J. Jaglin, and C. Siclet, "Energy-aware 3-level coding and control co-design for sensor network systems," *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, Singapore, 2007.
- [6] P. Sourdille and A. O'wyer, "A New Modified Smith Predictor Design", *Proceedings of the 1st international symposium on Information and communication technologies*, Vol. 49, pp. 385-390, Sep. 2003.
- [7] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Philips, "Stability of Networked Control Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Volume 21, Issue 1, pp.84-99, February 2001.
- [8] W. Zhang, "Stability Analysis of Networked Control Systems," PhD Thesis, Case Westem Reserve University, 2001.
- [9] C. C. Hsieh, P. L. Hsu and B. C. Wang, "The Motion Message Estimator in Real-Time Network Control Systems", *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2006.

- [10] S. H. Hong, "Scheduling Algorithm of Data Sampling Times in the Integrated Communication and Control Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Volume 3, Issue 2, pp.225-231, Jun 1995.
- [11] 薛伊婷, "以硬體實現主動可調式CAN 網路排程系統", 國立交通大學, 碩士論文, 中華民國 93 年7 月.
- [12] P. Marti, G. Fohler, K. Ramamritham, and J. M. Fuertes, "Jitter Compensation for Real-Time Control Systems," *22nd IEEE Real-Time Systems Symposium*, London, UK, December, 2001.
- [13] 鄧元銘, "CAN 網路同步應用協定之設計與實現", 國立交通大學, 碩士論文, 中華民國 96 年 7 月.
- [14] F. L. Lian," Analysis, Design, Modeling, and Control of Networked Control Systems." Ph.D thesis, University of Michigan, May 2001.
- [15] F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, "Network Design Consideration for Distributed Control Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Volume 10, Issue 2, pp.297-307, March 2002.
- [16] Z. Li and M. Y. Chow, "Adaptive Multiple Sampling Rate Scheduling of Real-time Networked Supervisory Control System – Part I", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference*, pp. 4604 – 4609, Nov. 2006.
- [17] Z. Li and M. Y. Chow, "Adaptive Multiple Sampling Rate Scheduling of Real-time Networked Supervisory Control System – Part II", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference*, pp. 4615 – 4620, Nov. 2006.
- [18] A. Antunes, P. Pedreiras, L. Almeida, and A. Mota, "Dynamic Rate and Control Adaptation in Networked Control Systems", *5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Volume 2, pp.841-846, Jun. 2007.

[19] X. D. Ren, S. B. Li, Z. Wang, M. Z. Yuan, and Y. X. Sun, "A QoS Management Scheme for Paralleled Networked Control Systems with CAN Bus," *IEEE Industrial Electronics, IECON 2003 - 29th Annual Conference*, Volume 1, pp.842-847, 2-6 Nov. 2003.

[20] "CAN Specification Version 2.0", *BOSCH*, 1991.

[21] 簡榮宏, 廖冠雄, "無線區域網路", 全華科技圖書有限公司, 2007.

[22] C. C. Hsieh, P. L. Hsu and B. C. Wang, "The SDQ-Based Message Estimator for Motion NCS," 7th Asian Control Conference, Hong Kong, Aug. 27-29, 2009, to be published.

