

公車優先通行與調適性交通號誌整合控制之研究

蘇志強

摘要

本研究係以調適性號誌技術來處理公車優先通行問題，透過嚴謹的系統整合設計及數學化的模式運算，系統能對同時到達交叉路口的公車進行最佳化的優先控制，毋需受限於預先設定的優先通行策略。更重要的，系統能在此最佳化的控制過程中，同時考慮總乘客延誤、總車輛延誤以及公車早到與誤點等相對成本，同時系統也能依有無公車等候通過路口，而自行選擇不同的目標函數進行最佳化控制。

壹、前言

為解決都市交通擁擠問題，自1975年起，運輸系統管理的觀念已被世界各大都市廣泛採用與推行，其目的在於借重交通工程或管理等辦法，來充分利用現有運輸設施，改進系統使用效率，增進交通流暢與維護行車安全等多重目標。其中，提供現有大眾運輸工具優先通行權，以提高其服務品質，增加其使用效率，可說是解決當前都市擁擠最有效方法之一。由文獻得知，常被採用的高乘載車輛通行的策略計有：優先處理高乘載車輛(HOVs)；提供HOV車道；優待道路通行費；不受進出城或上高速公路時間管制；提供順向或逆向公車專用道及實施公車優先通行號誌管制等。但如何以號誌優先處理公車通行在國內可謂尚未實施；相反的，在國外卻已廣泛被使用。所謂公車優先通行管制，係利用公車偵測器去發現混合車流中的公車需求，進而通知交通號誌控制系統提供適當的控制方法，以利公車通過交叉路口並減少公車行駛延滯。因提昇公車使用率，係解決交通需求面(Demand Side)的良策，而以供給面(Supply Side)而言，調適性交通號誌控制(Adaptive Traffic Signal Control)更是協助達成上述目標的重要方法。因此，如何成功的整合這兩種管制方法，可說是當前國內最重要的研究課題之一。睽諸過去，國外已有許多學者對公車優先通行控制策略進行研究，本研究經深入的回顧，將所有的研究文獻分成下列三大類：實證研究(Experimental

中央警官學校交通學系副教授 (TEL: 03-3282321 EXT 4910, FAX: 03-3281991)

Testing), 模式開發(Model Exploration)及系統控制等三大類。其中第一類的實證研究者(Elias,1976; Ludwick,1976; Courage et. al.; Seward and Taube,1977; Lieberman et. al.,1977; Vincent et. al.,1978, EL-Reedy and Ashworth,1978; TJKM, 1978; Salter and Shahi,1979; Cooper et. al.,1980; Cottinet et. al.,1980;及Knasnabis, 1991)以透過系統模擬法及實驗設計法對各種公車優先通行策略進行評估,同時也證實適當的公車控制能顯著地增進系統總體效率。然而,為減少公車乘客的旅行延誤卻必須相對的增加其他車輛的行車時間,因此傳統數學模式研究者(Van Bilderbeek, 1969;Allsop,1977; Jacobson and Sheffi,1981;Heydecker, 1983,1984)在兼顧公車優先通行與路口最小延滯之下,企圖尋求一組新的時制計畫,期能同時滿足此兩種需求,但以上的諸種方法,大部份僅能在假設車流到達分配的狀況下,去處理定時或觸動號誌的優先通行控制問題,至於如何運用調適性號誌控制,則尚未被充分考慮。再者,雖然公車優先通行管制已被整合到部份的控制系統中,如 UTCS/BPS (MaGowan 和 Fullerton,1979),UTOPIA(Mauro 和 Taranto,1989), SCRAM (Cornwell,1986), 以及 SPPORT(Han 和 Yagar, 1992)等,但總體而言,這些系統乃以預先設定的優先通行策略(如延長綠燈、縮短現有紅燈等)來進行時制調整,甚少能同時對四方同時到達路口的競爭公車,進行即時最佳化運算。

總之,在以往學術研究者卓越的研究貢獻基礎上,筆者歸納未來有關公車優先通行的控制,應集中再下列幾個主要的問題上:

1. 整合公車優先通行與調適性號誌控制: 此種控制方式可以確信所求解的即時號誌時制,能在非週期(Acyclic)的控制邏輯下,同時滿足旅客及乘客延滯最佳化。在現有的系統中,僅有 UTOPIA 能達此種要求。
2. 考慮公車整體管理及優先通行的需求: 例如,為提昇公車運輸的威信,應針對公車早到或延誤問題適當加以考慮,而且對同時到達路口的每部公車及其載客率均應納入公平性的競爭模式,來考慮何者具有優先通行權。

3. 假設未來在交通號誌控制系統中，具有公車自動定位(AVL)功能：例如，充分利用公車運作的各種細部消息，來進行更精確或更前瞻性的調適性公車優先通行。

本研究擬僅就前面二個問題加以探討，在沒有公車自動定位(AVL)系統中，針對一個交叉路口的調適性公車優先通行控制法，提出具體解決之道。首先，針對現行公車優先通行的策略加以深入回顧，而從問題的發現與研究的目標，來設計整合性的控制所需要的步驟及數學模式，並詳細描述。最後，提出研究所得及其未來的研究方向。

貳、公車優先通行控制策略回顧

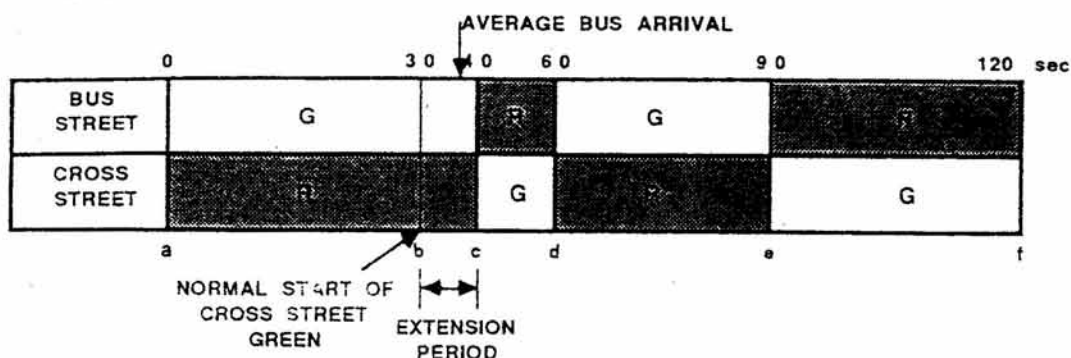
由上節的討論得知，現有的交通號誌控制系統中，均需透過預設的公車優先通行策略，達到對公車優惠管制的效果。而系統中常用的優先控制策略有哪些？以及這些策略在現有的號誌控制系統又如何運作？為本節探討重點。

1. 公車優先通行策略：在諸多的公車優先通行策略中，大概可歸納成被動式優先控制法(Passive Priority Method)與主動式優先控制法(Active Priority Method)兩種，其實施的方式，簡述如下：

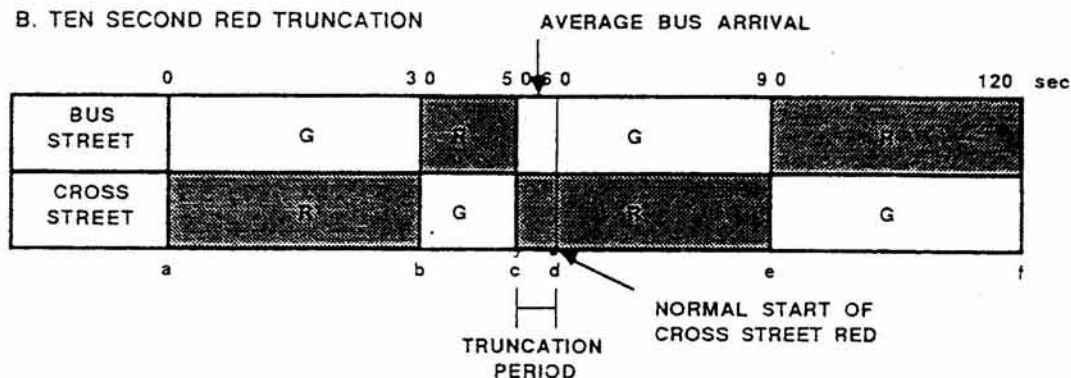
- (1) 被動式優先控制法：本法係透過廣泛蒐集公車運作行為特性的歷史資料，經整理分析後用以預測公車優先通行的需求，然後將此資料建立於系統中，作為策略運用之依據，使公車行駛能不受阻於各路口。常用的策略包括：縮短週期時間、提供公車時相、連鎖以供續進，此法優點在於安裝成本較低、操作容易，但控制誤差也較大。
- (2) 主動式優先控制法：本法主要係借重偵測器及通訊技巧，直接從車流中去辨識及預知公車的到達率，再由控制系統根據現有的號誌狀態及預設控制策略直接進行調整，使到達的公車能不受阻滯，而且能夠順利通過交叉路口。此法的特色在於控制成效佳，但是安裝成本高。圖1說明三種最常用的主動式優先控制技巧，其實施的方式，簡述如下：

- 延長綠燈時間：對現以具有通行權的公車，延長綠燈時間以確保公車能順利通過交叉路口。
- 切斷紅燈時間：對在紅燈時相到達的公車，系統能立即將現有紅燈切換，提前開啓綠燈以利公車通行。
- 插入綠燈時間：公車到達無通行權的紅燈時相時，系統會自動在現有紅燈時段中，插入一小段綠燈時間，以確保公車能順利通過路口。

A. TEN SECOND GREEN EXTENSION



B. TEN SECOND RED TRUNCATION



C. TEN SECOND RED INTERRUPTION

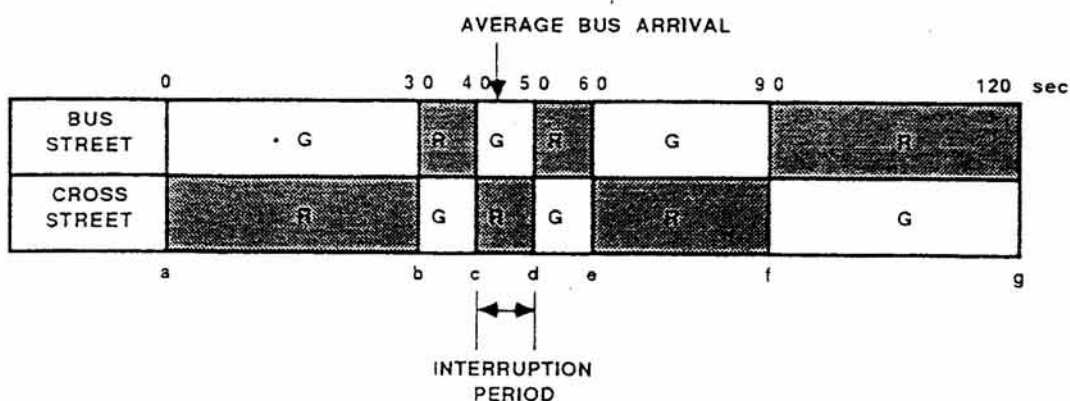


圖1:主動式公車優先通行控制方法

2. 系統控制方法：在現有的交通號誌控制系統中，有甚多系統用不同方式達到公車優先通行功能。於此僅選取並探討四個較著名的系統：UTCS/BPS、SCRAM、UTOPIA 和SSPORT 等，有關這些策略的主要特色，整理如下：

- (1) UTCS/BPS 系統：公車優先通行(BPS)係美國 UTCS 系統中的規定功能，系統透過過公車駕駛人的報告（停止或通過）及路旁的公車偵測器瞭解公車狀況，藉由中央控制中心執行公車優先通行策略，並且以下列兩種控制法賦予公車優先通行(MacGowan 和 Fullerton, 1979)：(1) 經由公式計算，假如給予優先通行能增進系統至少 2分鐘以上的控制總效益，則系統將延長現有綠燈時間10秒；(2) 系統可視狀況切斷現有的紅燈時間。
- (2) SCRAM系統 (Cornwell,1986)：SCRAM 發展於澳洲的 Melbourne 市，其主要目的是擴充現有的 SCATS 系統，使其能以各種主動式控制方法(Active Priority Method)進行公車優先通行控制，而其主要的特色在於充分利用路口觸動式號誌控制器來靈活調整時間的轉換，系統分別在距離路口200公尺及停止線處設置偵測器，以確保在優先管制過程中電聯公車(Train)能順利完成上、下客及離開路口，更重要的是，系統更採用所謂絕對的優先控制策略(Absolute Preemption Control)，使系統的續進不受影響。
- (3) UTOPIA (Mauro and Taranto,1989)：UTOPIA 發展於義大利的 Torino 市，系統總共設置112個偵測器，專供公車優先通行管制，其主要方式係利用路口上、下游偵測器所得的資訊，使控制中心能獲得線上資料，預測公車到達時間並指導路口控制器執行各種優先通行管制策略。
- (4) SSPOINT(Han and Yagar,1992)：SSPOINT 主要係用於控制混合車流中的小客車、公車及電聯公車(Street Car)，至目前為止，此方法控制2時相及10個偵測器的優先通行路口，系統藉由上、下游偵測器瞭解公車的到達與離開狀況，同時利用公車裝置有按鈕，使系統瞭解公車是否已完成上下車作業。而由以上的各種

訊息，系統可根據設定的各種算法，綜合性的提供各種不同層級的優先通行管制策略。

經由上述的探討，現有的各種公車優先通行系統，具有下列缺陷：

- 無法公平處理由路口各方向同時到達的公車。
- 公車乘載率>Loading Factors)和誤點成本不能反映在控制的函數之內。
- 未能充分與調適性號誌控制整合。
- 屬於預先設定的各種控制策略的近似最佳化控制，而非一種依據現況的即時最佳化控制。

參、整合性公車優先通行與調適性號誌管制

一個有效的公車優先通行系統，在設計理念上，除需考慮克服前節所列的各項既有缺點外，對於預定的整合性系統的控制方法，應該具備以下的特色：

1. 將公車優先通行整合成調適性號誌控制中的一種功能。
2. 系統能自動運用調適性號誌的即時反應控制功能，去處理公車優先通行的最佳化控制問題，而無須從預設的控制策略中，去尋找近似最佳化的控制方法。
3. 每次控制系統在切換時，應同時考慮行車安全、現有的交通狀況以及時制轉換損失延誤最少等基本原則。
4. 提供一完整的系統執行函數(Performance Function)，使系統能依據現有的交通狀況、公車流量、公車乘載率及行駛時間成本（含早到準時及延誤）等因素，進行整合性控制。

爲了滿足上述的系統特性，所有公車優先通行及調適性號誌控制所需模式間的相互關係，可設計成圖 2的控制流程。

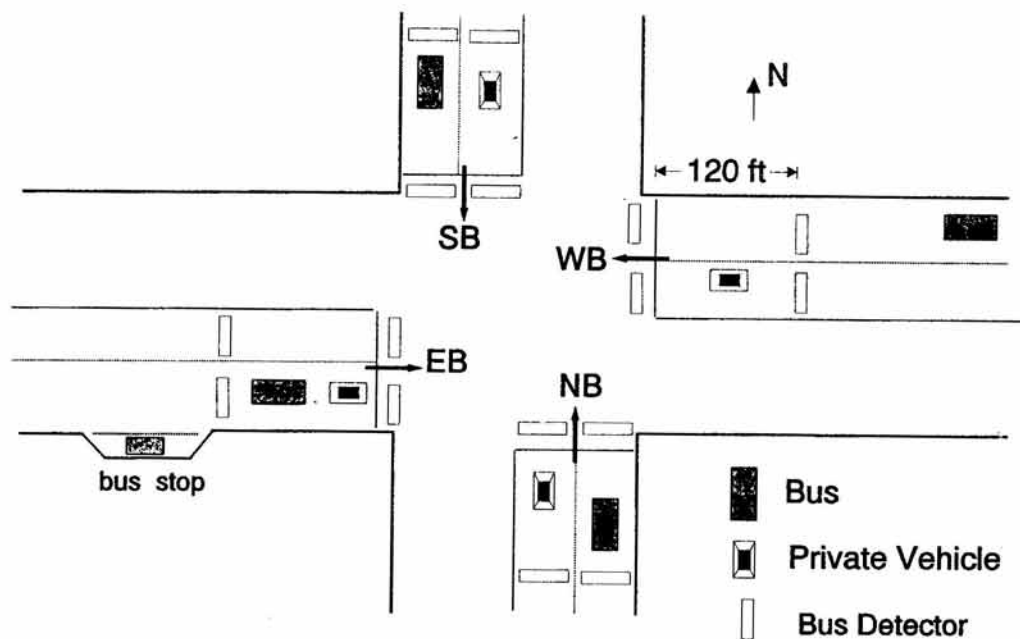


圖2:路口公車優先通行配置圖

在此整合性系統架構的運作下，系統能根據線上即時回應的偵測資料，每3秒鐘對系統狀況提供預測性(Preventive)的調適性控制，經由各種模式的整體性相互支援，無論公車有無到達或同時多方向公車到達等狀況，系統均能進行最佳化控制。其中車輛及公車偵測器將提供車輛及公車到達等候線的情形，針對整體系統的運作需要，有關車輛及公車的偵測器可以配置成如圖 3所示的位置：

1. 調適控制偵測器：分別配置上、下游偵測器，下游偵測器距離路口停止線120 ft（每車道），以利預測等候線長度，至於上游偵測器則設於距離上游路口 50 ft處，以預測車輛到達率。

2. 公車偵測器：公車偵測器置於距離停止線120 ft處，亦即在此之後的公車才加入優先通行的最佳化控制中，因如此之設計可消除公車的到達延誤。例如，上、下乘客、變換車道、路邊停車等影響所造成的延誤。同時，在停止線處亦設有一公車偵測器，以監督公車是否已離開等候線。

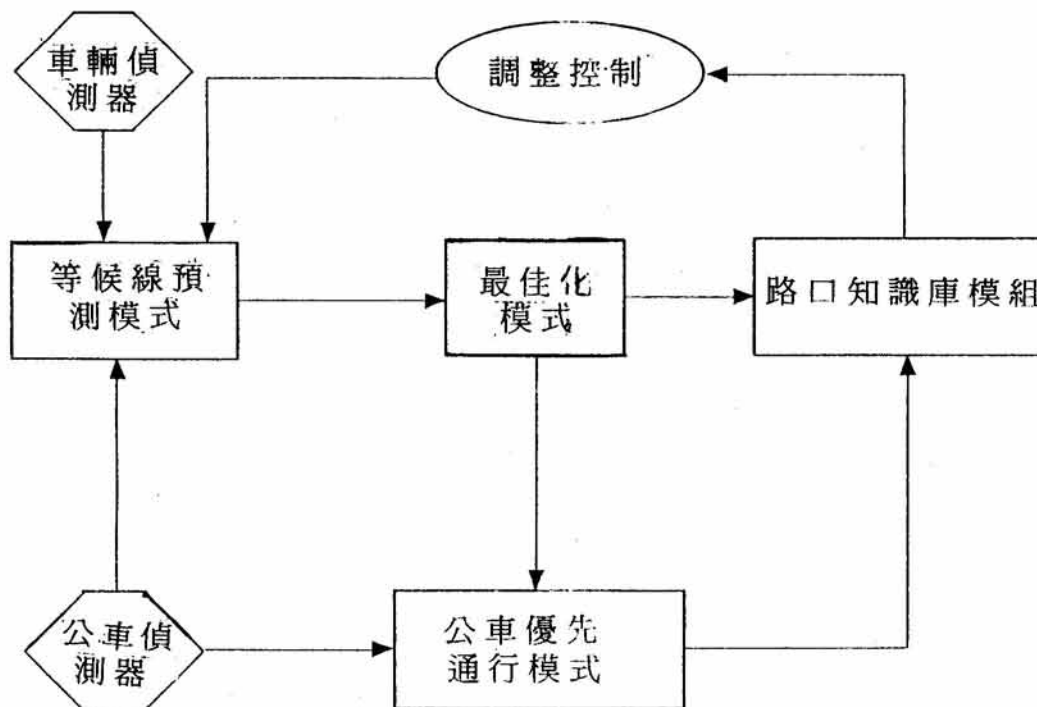


圖3:公車優先通行控制模式關係圖

在上述的控制流程中，假設在調適性號誌控制系統能提供號誌狀態評估模式，將號誌運轉的狀態及已用的綠燈時間隨時加以評估，則系統最佳化模式將採二元決策法(Binary Choice Method)，對下列所提供的系統執行函數(Performance Function)進行評估，以提供最佳化控制策略。

在整個公車優先通行的執行函數中，綜合考慮的因素包括乘客延誤 $C_{pd}^{i'}$ 、車輛延誤 $C_{oc}^{i'}$ 及公車時間延誤 $C_{sd}^{i'}$ ，有關的數學式，簡述如下：

在一多時相(Multi-Stage)控制的路口，整個系統的總執行指標 (PI)可以下列公式加以計算：

$$PI = \sum_{i' \in H} PI^{i'} \quad (1)$$

$$PI^{i'} = C_{pd}^{i'} + C_{oc}^{i'} + C_{sd}^{i'} \quad \forall i' \neq i, i' \in H \quad (2)$$

i' :代表號誌控制的每一時相

H :代表所有控制時相的集合

1. 計算乘客延誤: C_{pd}^i

$$C_{pd}^{i'} = R^i(k) c_d \sum_{\forall l} [n_p V_l^i(k) + \sum_{j=1}^{B_{jl}^i(k)} P_{jl}^i(k)] - T^i(k) c_d \sum_{\forall l} [n_p V_l^{i'}(k) + \sum_{j=1}^{B_{jl}^{i'}(k)} P_{jl}^{i'}(k)] \quad (3)$$

$$R^i(k) = Y^i + AR^i + r^i(k) \quad (4)$$

$R^i(k)$:時相*i*在一個紅燈時段的時間長度，如果系統在時間*K*切換現有時相的控制。

C_d :乘客延誤成本(秒)。

n_p :每部小客車平均的乘客人數。

$V_l^i(k)$:在時間*K*，將現有的綠燈時相*i*延長時間段*T*秒，每一車道所能額外通過路口的車輛數。

$B_{jl}^i(k)$:在時間*K*，將現有的綠燈時相*i*延長時間段*T*秒，系統所能額外通過路口的公車數。

$P_{jl}^i(k)$:時相*i*，在時間*K*，車道*l*，在公車*j*內的乘客數。

$T^i(k)$:在時間*K*，對時相*i*延長的綠燈時間。

$V_l^{i'}(k)$:在時間*K*，綠燈時相*i*，延長*T*時間，在時相*i'*內有額外的小客車所需增加的停等延誤。

$B_{jl}^{i'}(k)$:在時間*K*，綠燈時相*i*，延長*T*時間，在時相*i'*內有額外的公車所需增加的停等延誤。

$P_{jl}^{i'}(k)$:在時間*K*，時相*i*，車道*l*內，公車*j*所具有的乘客數

r^i :時相i內的黃燈時間

AR^i :時相i內的全紅時段

$r^i(k)$:時相i內所需等待最短紅燈時間

2. 計算車輛操作成本: $C_{oc}^{i'}$

$$C_{oc}^{i'} = [c_o^p \sum_{\forall l} V_l^i(k) + c_o^b \sum_{\forall l} B_l^i(k)] - [c_o^b \sum_{\forall l} B_l^{i'}(k) + c_o^p \sum_{\forall l} B_l^{i'}(k)] \quad (5)$$

c_o^p :小客車完全停止到恢復正常速度所需的操作成本。

c_o^b :公車完全停止到恢復正常速度所需操的作成本。

$V_l^{i'}(k)$:時相i'內，有額外的小客車被迫完全停止，如果現有的綠燈時相i延長T時間。

$B_l^{i'}(k)$:時相i'內，有額外的公車被迫完全停止，如果現有的綠燈時相i延長T時間

3. 計算公車時間延誤成本: $C_{sd}^{i'}$

$$C_{sd}^{i'} = c_s^d \sum_{\forall l} D_{j,l}^i(k) - c_s^b \sum_{\forall l} D_{j,l}^{i'}(k) \quad (6)$$

c_s^b :公車延誤成本

$D_{j,l}^i(k)$:公車j，在車道l，時相i的總延誤，如果綠燈時相在時間K進行切換。

$$D_{j,l}^i(k) = R^i(k) + t_{sd}^b + (F_{j,l}^i(k) - d_l^i(k) + 1) \frac{3600}{q_s^i} + D_{j,l}^i(k-1) \quad (7)$$

t_{sd}^b :公車的起動延誤。

$F_{j,l}^i(k)$:在時間K，時相i，車道l內在公車j前到的總公車數量。

$d_l^i(k)$:時間K，車道l，時相i的車輛疏解率。

q_s^i :車道l的飽和流率。

$D_{j,l}^i(k-1)$:時間K，車道l，時相i內，公車j已具有的行車延誤。

$$F_{j,l}^i(k) = \text{Min}\left\{\frac{D_{j,l}^i(k)}{q_s^i}, Q_l^i(k)\right\} \quad (8)$$

sd : 兩部車輛前保險桿間的距離。

D_l : 偵測器與停止線間的距離。

$Q_l^i(k)$: 預估的等候線車量。

$$Q_l^i(k+1) = \text{Max}\{Q_l^i(k) + A_l^i(k+1) - d_l^i(k+1), 0\} \quad (9)$$

$$\forall l \in P^i; \forall P^i \in i; \forall i \in H$$

$A_l^i(k+1)$: 時間K, 車道l, 在時相i內的車輛到達率。

P^i : 屬於時相i的車道群。

而在現有紅燈時相 i' , 公車j的總延誤, 可以下列公式計算:

$$D_{j,l}^{i'}(k) = T^i(k) + t_{sd}^b + (F_{j,l}^i(k) - d_l^{i'}(k) + 1) \frac{3600}{q_s^i} + D_{j,l}^{i'}(k-1) \quad (10)$$

肆、系統控制流程設計

對一個號誌化的控制路口而言, 隨著時間的變化, 系統中的競爭流量可能包含或不包含公車流量, 針對不同的車流組成, 系統會自動採取不同的目標函數, 去同時滿足調適性號誌及公車優先通行的最佳化控制。例如, 在沒有公車流量下, 系統的控制目標係在使總等候線長度最小 (Minimum Queue Length); 而在有公車流量情況下, 系統執行指數 (Performance Index) 最小為控制目標。基於此種理念及上述所提系統整合流程, 並在各設定的模式互動下, 整個系統的控制流程設計成圖4。至於整個實際的控制過程, 可用下列的步驟加以說明:

步驟1: 在時間K, 時相i, 計算最短綠燈時間和最長綠燈時間。

步驟2: 檢查最短及最長綠燈時間限制。

- (1) 如果已用的綠燈時間比最小綠燈時間小，則延長現有綠燈時間，同時更新已用的綠燈時間值。
- (2) 在時間 K ，時相 i ，如已用的綠燈時間大於最長綠燈時間，則應切換現有的綠燈時間。
- (3) 如果以上兩條件不成立，則執行步驟3。

步驟3：檢視公車偵測器，若無公車通過且無既存的公車，則執行步驟 4，否則，計算公車需求而執行步驟5的控制。

步驟4：如果步驟 3條件成立，則預測各車道等候線長度，並執行路口總等候線長度最小的最佳化模式。

步驟5：如果步驟 3有公車存在，則執行系統總執行指標(PI)最小，以進行公車優先通行控制。

步驟6：如果計算的結果 $PI < 0$ ，則延長綠燈以執行公車優先通行不被採用，此時系統轉採用調適性號誌控制的控制決策。

伍、結語

本研究已廣泛且深入的回顧現有號誌控制系統中公車優先通行的技術，並且發現將此種控制技術與調適性控制邏輯加以整合，能更周延的考慮整體號誌系統績效。因此，在嚴謹的問題特性分析後，本研究除已成功的整合公車優先通行與調適性號誌控制外，而且在最佳化的過程中能同時考慮路口總乘客延誤、總車輛延誤以及公車誤點等相對成本。尤其甚者，能針對獨特系統需求及問題特質加以模式化，以利整套研究能真正運用到實際的控制系統中。此外，未來對如何將現有的模式加以實例驗證評估，並考慮逆向公車專用道衝擊以及捷運系統完成後的服務公車(Shuttle Bus)之整合控制等諸多問題，為本研究後續努力的目標。

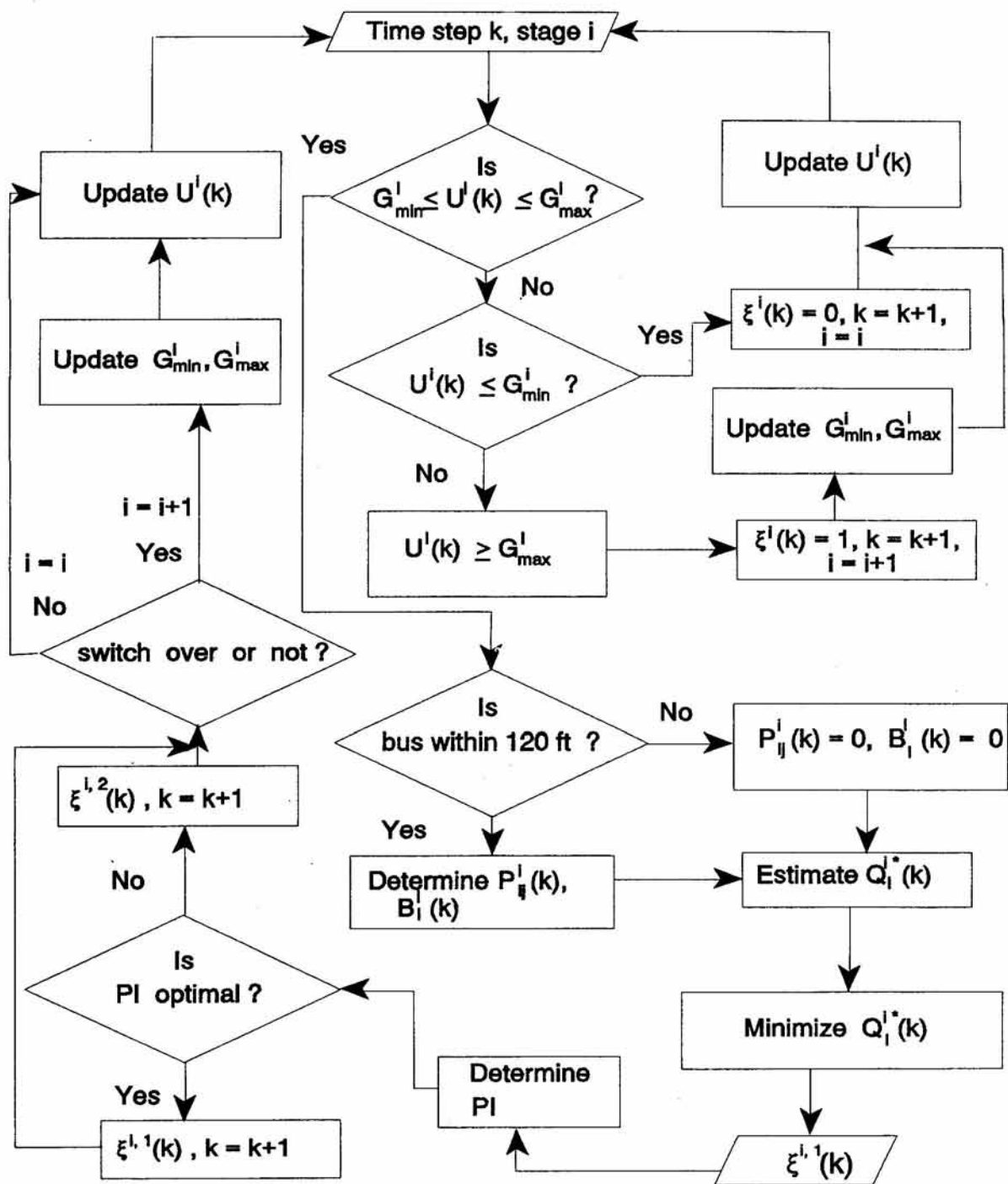


圖4:在無公車定位系統下的公車優先通行控制流程

参考文献

- Allop R. E. (1977) Priority for buses at signal-controlled junctions : some implication for signal timings. *Proc. 7th Int. Symp. Transp. Traffic Flow Theory*, Kyoto, Japan, pp. 247-270.
- Courage K. C., Wallace C. E. and Wattleworth J. A. (1977) *Effect of Bus Priority System Operation on Performance of Traffic Signal Control Equipment on NW 7th Av.* Prepared for the U.S., Department of Transportation, Report No. UMTA FL-06-0006.
- Cooper B. R., Vincent R. A. and Wood K. (1980) Bus-actuated traffic signals-initial assessment of part of the Swansea bus priority scheme. *Department of Transport TRRL Report LR 925. Crowthorne.*
- Cottinet M., Amy De La Breteque L., Henry J.J. and Gabard F. (1980) Assessment by observation and by simulation studies of the interest of different method of bus preemption at traffic lights. *Pro. of the int. Symp. Traffic Control Systems*, Berkeley, California, August 1979, **2a**, 95-105.
- Cornwell P. R. (1986) Dynamic signal co-ordination and public transport priority *IEE, Road Traffic Monitoring and Control*, 158 -161.
- Chang G. L., Meenakshy V., And Su C. C. (1994) Adaptive bus preemption control by using automatic vehicle location information. *Working Paper, Department of Civil Engineering, University of Maryland.*
- Elias Wilbur J. (1976) *The Greenback Experiment-Signal Preemption for Express Buses: A Demonstration Project.* Prepared for the California Department of Transportation, Report No. DMT-014.
- Vincnet R. A., Cooper B. R. and Wood K. (1978) Bus-actuated signal control at isolated intersections-simulation studies of bus priority. *TRRL Lab. Rep. 814, Crowthorne.*
- EL-Reedy T. Y. and Ashworth R. (1978) The effect of bus detection on the performance of a traffic signal controlled intersection. *Transp. Res.* **12(5)**, 337-342.
- Heydecker B. G. (1983) Capacity at a signal-controlled junction where there is priority for buses. *Transp. Res.* **17B(5)**, 341-357.
- Heydecker B. G. (1984) Delay at a junction where there is priority for buses. *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 113-132.
- Han B. & Yagar S. (1992) Real-time control of traffic with bus and streetcar interactions. *IEE, Road Traffic Monitoring and Control*, 108 - 122.
- Jacobson J. and Sheffi Y. (1981) Analytical model of traffic delays under bus signal preemption: theory and application. *Transpn. Res.* **15B(2)**, 127-138.

- Khasnabis S., Reddy G. V. and Chaudry B. B. (1991) Signal preemption as a priority treatment tool for transit demand management. *Vehicle Navigation & Information System Conference Proceedings*, Paper No. 912865, Dearborn, Michigan, U.S.A. 912865
- Lieberman E. B., Muzyka A. and Schneider D. (1977) *Bus Priority Signal Control: Simulation Analysis of Two-Strategies*. KLD Associates, Inc., and Transportation Systems Center, Prepared for the U.S. Department of Transportation.
- Ludwick J. S. (1976) *Bus Priority System: Simulation and Analysis*. Final Report, The Mitre Corporation, Prepared for the U.S. Department of Transportation. Report No. UTMA-VA-06-0026-1.
- MaGowan J. and Fullerton I. J. (1979) Development and testing of advanced control strategies in the urban traffic control system. *Public Roads*, **43**(3), 97-105.
- Richardson A. J. and Ogden K. W. (1979) Evaluation of active bus-priority signals. *Transpn. Res. Rec.* **718**, 5-12.
- Mauro V. and Taranto C. Di (1989) UTOPIA. *IFAC Control, Computer, Communication in Transportation*. Paris, France. 245-252
- Seward S.R. and Taube R. N. (1977) Methodology for evaluating bus-actuated, signal-preemption systems. *Transpn Res. Rec.* **630**, 11-17.
- Salter R. J. and Shiha J. (1979) Prediction of effects of bus-priority schemes by using computer simulation techniques. *Transpn Res. Rec.* **718**, 1-5.
- TJKM (1978) *Evaluation of Bus Priority Signal System*. Prepared for the City of Concord, California.
- van Bilderbeek B. (1969) Priority treatment of buses at traffic signals. *Proc. 1st Tech. Assessment Rev.* Organization for Economic and Development, Directorate for Scientific Affairs, Paris, France.