

應用智慧型號誌控制器執行適應性 交通控制之研究

ADAPTIVE SIGNAL CONTROL VIA AN INTELLIGENT TRAFFIC CONTROLLER

張堂賢 Tang-Hsien Chang¹

張智華 Zhi-Hua Chang²

(91 年 7 月 31 日收稿，91 年 12 月 19 日第一次修改，92 年 1 月 20 日
第二次修改，92 年 12 月 31 日定稿)

摘 要

本研究為 TCIS (Traffic Communication and Information Station) 控制器發展出適應性交通號誌控制邏輯。本法係採兩階段水平推移法改良 OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) 模式的缺失。所提模式之優點在於縮短決策時段長度，減少偵測器誤差對系統績效計算之影響。本研究利用 Java 程式語言成功開發出 TCIS 控制器實用與模擬系統。決策模式採路口總延滯為績效指標，係以各臨近路段之等候線長度總和為系統的延滯值基準。經分析發現，當臨近路段未達飽和車流量時，路口績效取決於最小綠燈時間的限制，在 V/C 值 0.7 以下時，本研究之適應性號誌控制邏輯可以明顯降低路口總延滯，在 V/C 為 0.5 時有最佳控制效果。但當車流量增多 V/C 值達 0.8 時，此適應性號誌控制模式卻與定時控制效果相當。

關鍵詞：交通控制；適應性交通控制；交通號誌系統

-
1. 國立台灣大學土木工程學系所交通組教授 (聯絡地址：106 台北市羅斯福路四段 1 號台灣大學土木工程學系)。
 2. 國立台灣大學土木工程研究所交通組碩士。

ABSTRACT

This study develops an adaptive signal control logic for an intelligent traffic controller 'TCIS' (Traffic Communication and Information Station). The method uses two stages rolling on the projection horizon for vehicle estimation and phase-changing decision, which modifies the OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) model. The proposed method can save time for decision-making, and reduce errors from detectors. A system for application and simulation of the proposed model is built. The performance criteria guiding the decision model is the total delay time, estimated on the basis of queue lengths for all the approaches. For the simulations of the study, the model works well in conditions of under saturation. The delay observed is reduced when V/C is lower than 0.7. This constitutes an improvement compared to a pretime system. The optimal effect occurs when V/C has a value of 0.5. However, when V/C approaches 0.8, the proposed model gradually becomes equivalent to a pretime system.

Key Words: Traffic control; Adaptive traffic control; Traffic signal system

一、前言

交通號誌在管理控制道路車輛、行人扮演著重要的角色，它在智慧型運輸系統中是最前端的交通控制設施，其功能為提供交通號誌燈號顯示適當的燈相，使行駛路權可藉由號誌燈的指示功能得到公平的分配，並改善人車的交通安全與效率。發展 ITS 即應配以號誌控制系統同步精進，傳統固定時制控制的方法已經不能滿足實際的交通控制需求，國內外皆有許多學者投入適應性號誌控制方法之研究^[1,2,3,4,5,6,7,8,9]，但在過去國內由於軟硬體缺乏配合，施行尚難。近來國內已有先進控制器 TCIS^[10,11,12]之研發，其功能十分強大，對國內推展適應性控制已是不遠。本研究之目的係藉由運用最佳控制理論的基礎於適應性號誌控制之演算邏輯模式中，並設計應用程式，配合 TCIS 以執行適應性控制。

本研究的內容主要有四部分如下：(1) 適應性號誌之邏輯模式構建。(2) 適應性號誌邏輯之最佳控制求解。(3) 控制邏輯程式撰寫及測試。(4) 適應性號誌控制適用時機分析。研究範圍設定為獨立路口之適應性號誌控制，並不考慮連鎖控制。針對獨立路口臨近路段，布設車輛偵測器來蒐集車流資料，然後輸入於所建構之模式中，進行控制最佳化計算。本研究利用開放性架構且跨平台的程式語言來撰寫控制程式，目標為路口控制績效最佳，亦即是路口總延滯最小的控制策略。

二、OPAC 模式回顧

目前各種適應性號誌邏輯中，主要有兩種決策邏輯，一是二元決策邏輯，MOVA、SAST

及 COMDYCS-III 屬於此類型的邏輯；另一種是程序性決策邏輯，OPAC 模式則是此種判斷決策邏輯。這兩種邏輯各有其優缺點，其判斷架構分述如後：

二元決策邏輯其控制時段以先期交通資訊量為範圍，作為各種時制轉換判斷之基礎。在判斷過程中，先將控制時段切割成許多決策時段，其長度為單位時間 Δt ， Δt 範圍在 2 ~ 5 秒間，在每一個決策時段中，皆採用二元決策邏輯來進行判斷是否延長現行綠燈一個 Δt 時間，或者結束現行綠燈進行分相轉換之得失比較，並逕行系統延滯值之評估計算。決策結果將在下一個 Δt 時段進行，而控制時段將會往後推一個 Δt 單位時間，重複以上判斷邏輯之工作。

程序性決策邏輯則是以一控制階段約 50 ~ 100 秒，為其控制長度範圍，並將控制長度範圍切割成許多單位時段 Δt ，與二元決策邏輯不同的是其控制範圍包含了先期交通資訊量長度以及預測交通資訊量長度。在產生了最適化時制決策後，先執行此決策時制（頭區），其長度即為先期資訊長度，並且控制長度向後推移一個先期資訊長度。程序性決策邏輯之步驟，用水平投射區來代表控制時段之時間長度，而頭區即代表先期交通資訊量，尾區代表預測交通資訊量，在每次最適化的決策過程中，皆是以控制時段內所有交通資訊量，作為各種時制轉換的判斷依據。經由其最適化決策邏輯決定最佳時制轉換時間點，再向後推移一個頭區長度時間，重複進行最適化決策判斷。

本研究設計應用強大的電腦號誌控制器 TCIS 來進行適應性控制，在控制邏輯多半參考 OPAC 模式的精神，因為 OPAC 為程序性之判斷邏輯，適合電腦進行運算，利用其近似動態規劃的技術為基礎，來設計無固定週期之即時需求感應式的交通號誌決策邏輯。以下就 OPAC 模式詳加說明。

OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) 模式係由 Gartner^[6,7] 針對獨立路口所提出之無固定週期之即時需求感應式的交通號誌決策邏輯。第一代的 OPAC 最佳化演算法（簡稱為 OPAC-1），為一種動態規劃演算法，係多階段決策過程的全域最佳解策略。其設計概念是由偵測器取得車隊預測、分相流量等資料經處理，預測未來數個週期之週期流量表、平均車速及占有率之資料，加上現場燈號狀態，傳入路口最佳化邏輯計算（動態規劃法），考慮路口最長綠燈與最短綠燈限制及網路同步問題，產生號誌時制，估計等候長度、停等及延滯參數作為績效指標。

由於 OPAC-1 需掌握控制時段內完整的車輛到達資訊，且要在極短的時間內計算所有方案，因此 OPAC-1 本身並不符合時效性，在當時電腦技術尚未發達，應用上有其困難和缺失存在。於是有了第二代最佳化演算法（OPAC-2）的加入以取代 OPAC-1 動態規劃法，OPAC-2 的運作為：

1. 將控制時段 T 劃分為若干階段 (stages)， T 之長度近似於傳統的週期長度或稍長（約 50 至 100 秒），每個階段皆分為整數個 (K 個) ΔT 的時段 (intervals)，通常設為 4 或 5 秒（黃燈加全紅的清道時間長度）。
2. 每個階段中至少包含一次的號誌轉換，最多可容許至三次，而其目的乃是為了使最佳化的需求感應策略較具彈性。

3. OPAC-2 計算最佳化時制轉換順序所使用的方法稱「最佳化序列限制搜尋法」(Optimal Sequential Constrained Search Method, OSCO)。目標函數為各路口績效指標之總和，在逐次比較各可行方案之績效指標，可行方案即為在階段 n 時轉換順序，若此一方案的績效指標值較上一方案為佳，則可取代上一方案，否則即繼續進行下一方案的比較，最後即可獲得最小績效指標值之方案組合。其績效指標 (performance function) 即為階段內的起始等候車隊長度，加上了到達車輛數後再減去離開車輛數的總和：

$$P_n(t_1, t_2, t_3) = \sum_i (Q_0 + A_i - D_i) \quad (1)$$

其中

Q_0 ：起始等候線長度；

A_i ：每個步驟 i 所到達的車輛數；

D_i ：每個步驟 i 所離開的車輛數；

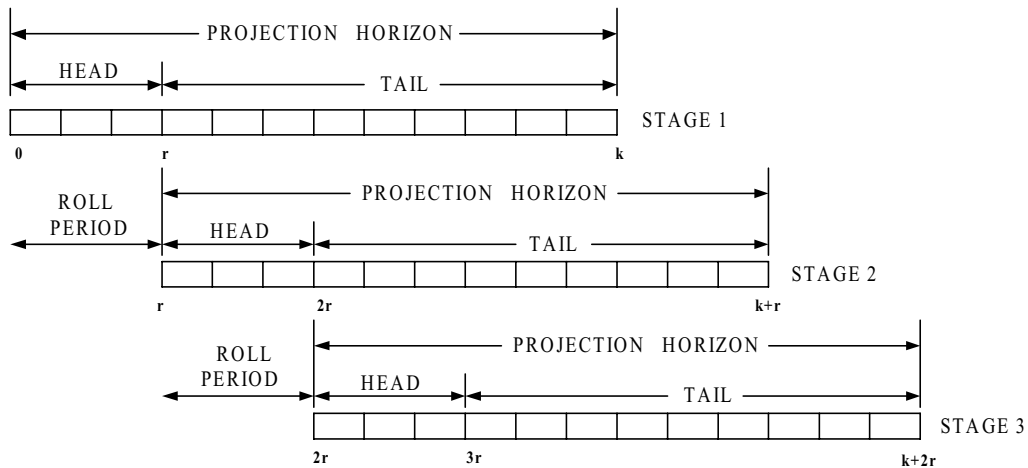
t_1 、 t_2 、 t_3 ：時相轉換之時點。

OPAC-2 在執行上已較 OPAC-1 更具即時性，但仍須具有整個階段的車輛到達資訊才能運作，因此，在不影響最佳化過程之績效演算，對流量推估方面作改進，即僅使用上游偵測器所提供之資訊，以水平推移法 (ROPAC) 來推估流量。水平推移法係將一個階段 (stage) 的長度分成 K 個時段，該階段長度乃相當於一個平均週期長度。由各臨近路段之上游偵測器所獲得前 r 個時段的實際車流資訊 (稱為頭區)，而剩下的 $k-r$ 個時段 (尾區) 則由適當的模式推導獲知。基本作業是將偵測器埋設於距路口停止線上游 10 至 15 秒自由流旅行時間處，頭區長度即為車輛自上游偵測器至停止線的自由流旅行時間長度。其運作程序為 (參見圖 1)：

1. 決定水平投射區 k ，及推移期間 r 。
2. 由偵測器獲得前一個 r 個時段 (頭區) 之流量資料，在由尾端模式推算後 $k-r$ 個時段 (尾區) 之車流資訊。
3. 利用 OSCO 法計算最佳時序轉換策略。
4. 執行推移期間 (頭區) 的時序轉換策略。
5. 推移 r 個投射水平面 (projection horizon)，產生出新的階段；重複步驟 2 至 5。

OPAC 決定尾區的模式有三種：

1. 尾端固定模式 (Fixed Tail, FT)：尾端的每一步驟等於控制時段平均流量的常數。
2. 靜態尾端模式 (Static Tail, ST)：階段內的每一步驟使用一不同值，其值為控制時段車輛到達之週期性平均值。
3. 動態尾端模式 (Dynamic Tail, DT)：類似於靜態尾端模式，即將控制時段內的每一步驟內之實際車輛到達數，透過指數平滑法來推得。

圖 1 水平推移法示意圖^[7]

OPAC 模式非常適合應用在分散式控制之獨立路口微處理機中執行。偵測器設置於停止線及上游處各一個，只要蒐集流量及占有率。然 OPAC 之設計準則中，採用系統延滯最小為其績效指標。OPAC 為程序性的決策邏輯，先期車輛資訊的內容必須完整了解控制時段內之車輛到達資訊，才能有效掌握並控制路口績效，但是可能由於偵測器之誤差而影響到先期資訊的正確性，加上控制時段較長，若產生誤差，將對系統有較大的影響，產生路口績效降低，或者是未達原先預期之水準。因此本研究將以降低先期車輛資訊的誤差為方向，利用 OPAC 之計算延滯流程，以及水平推移法，並且加入競爭時相之計算，縮短控制時段長度，利用二元決策邏輯，減少偵測器誤差而對系統績效計算之影響。並且採用 Java 程式語言來撰寫適應性號誌控制程式。

三、適應性控制最佳化模式構建

路口的交通量隨時間、地點而不斷變動，在均勻流量時適用定時號誌控制，但是在變動情形較大的情況下，就會使得路口各時相有效綠燈時段的使用效率降低，因此設計適應性號誌控制邏輯，就必須掌握此一目標，在執行上必須配合偵測器之設置，包含停止線與上游偵測器，利用偵測器來蒐集即時的車流量資料，也就是先期交通資訊量 (advance traffic information)，利用交通流量預測模式，將先期交通資訊量轉換成預期抵達路口停止線之預期交通量 (expected traffic data)。在本研究之模式中將產生的預期交通量包含兩部分，一是獨立路口臨近路段上停止線前之等候線長度，另一為下一階段抵達停止線之預期車輛到達量。

考量我國都市街廓長度較短且車流變動較大，要蒐集較長時段且完整（如考慮機車等）的先期交通資訊又比較困難下，本研究提出「兩階段水平推移法」（參見圖 2）作為快速反

應實際交通的變化，達到適應性控制的目的。本法即擬混以二元決策邏輯改進 OPAC 之最佳化決策流程，即採縮短 ROPAC 頭區與尾區之長度各為 Δt ，設定 Δt 為 5 秒，縮短控制時段為兩個 Δt 階段，即為 10 秒鐘，其中 Δt 長度等於先期交通資訊長度。縮短尾區長度之優點係不需取得太長時間之完整先期交通資訊，決策時間縮短，因此若先期交通資訊量產生誤差，在下一個決策單位時間中可以即時反應，加以修正，避免先期交通資訊量之誤差被放大，對控制績效影響程度較小。

本研究之路口績效值亦採用路口總延滯為績效指標，但與 OPAC 所不同在於本研究考量的是競爭時相的延滯值。亦即本研究之模式以各臨近路段之等候線長度總和為系統的延滯值，考慮兩時相之各路段的等候線車輛數，以作為獲得綠燈權之參考依據。

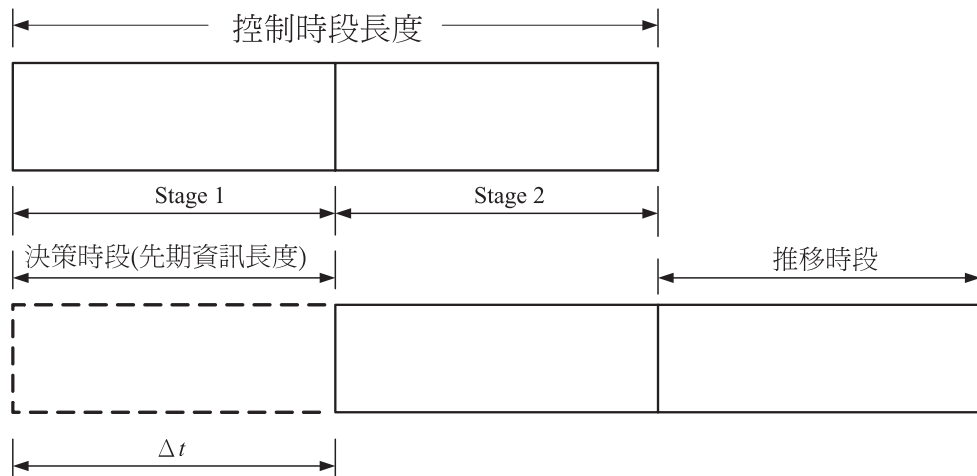


圖 2 兩階段水平推移圖

3.1 建模基本假設

對於本研究之系統，設定為獨立路口，而模式基本假設為：

1. 先期交通資訊不考慮機車影響。
2. 黃燈加上全紅時段合計為清道時間共為 5 秒，其假設根據雙車道獨立路口的路口大小來設計，黃燈 3 秒，全紅 2 秒。
3. 無固定週期限制，最大綠燈時間為 120 秒，最小綠燈時間為 15 秒。
4. 先期交通資訊長度總共為 10 秒，若以平均速率 36km/hr 計算，上游偵測器埋設位置需在 80~90 公尺處。
5. 獨立路口有四個臨近路段，採取二時相的號誌時相設計，路段編號為 1、2、3、4。路段 1、2 為第一時相；路段 3、4 為第二時相。

3.2 模式概念

本研究之模式採用 OPAC 之流程加以修改，加入競爭時相的延滯計算，而目標式及限制式係引用邱素文君「最適化控制理論應用於構建獨立路口適應性號誌時制決策邏輯之分析研究」^[5]中之限制式加以修改，其模式基礎在於獨立路口雙向路段中取一臨界延滯值，作為計算基礎。但在本研究中並非取臨界延滯值做為計算值，而是將每一路段之延滯都納入計算，以求得較正確之路口延滯值。模式開始時，系統初置階段為全紅時段 5 秒，之後設定方向 1、2 為起始綠燈分相 1，並且開始進行第一次計算總延滯，分別為 Pn1 與 Pn2。Pn1 為系統延長綠燈之總延滯值，Pn2 為系統結束綠燈之總延滯，計算方式包含階段 1 與階段 2。

在階段 1 中，進行延長綠燈時間，長度為 Δt ，或者是結束綠燈進行分相轉換之延滯值計算，再往後推移一個階段，即計算階段 2 之延滯值，加總兩階段之延滯值，則為判斷系統績效之總延滯值，藉以判斷是否延長或結束目前分相，進行燈號轉換。

在轉換順序 $k < i < j$ 時，進行兩時段之 Pn1 與 Pn2 之比較，若決定延長綠燈時間，則推移一個時段 Δt ，再進行下一階段之比較，如圖 3 所示。當轉換順序 $i < k$ 時 (k : Min GreenTime/ Δt ; Min GreenTime = 30 sec; Δt = 5 sec)，則表示尚未達最小綠燈時間限制，將不進行燈號轉換，或者是當轉換順序 $i = j$ 時 (j : Max GreenTime/ Δt ; Max GreenTime = 120 sec、 Δt = 5 sec)，表示已達最大綠燈時間限制，無論系統總延滯是否判斷要延長或結束現行綠燈，必須無條件進入分相轉換。

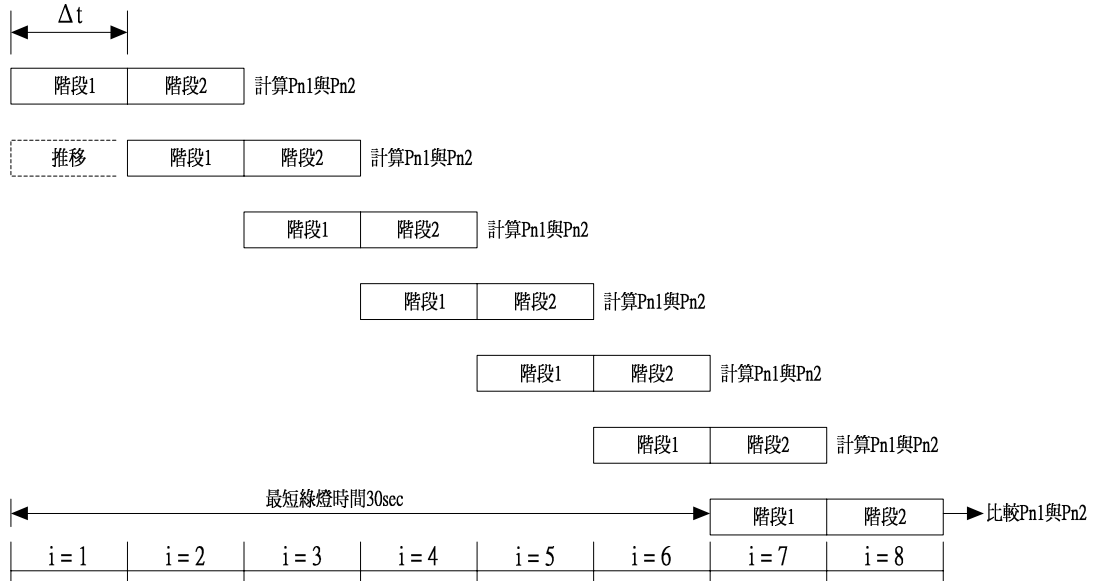


圖 3 推移過程範例

本研究之模式演算流程如圖 4 所示。符號說明如下：

$Pn1(i)$ ：第 i 個轉換順序，第一時相綠燈繼續延長之總延滯；

$Pn2(i)$ ：第 i 個轉換順序，第一時相綠燈轉換第二時相綠燈之總延滯；

$Pn\ min$ ：最小總延滯；

T_0 ：最小總延滯之轉換順序；

T_i ：第 i 個轉換順序；

j ： $\text{Max GreenTime} / \Delta T$ ；

最長綠燈時間：120 sec；

最短綠燈時間：30 sec。

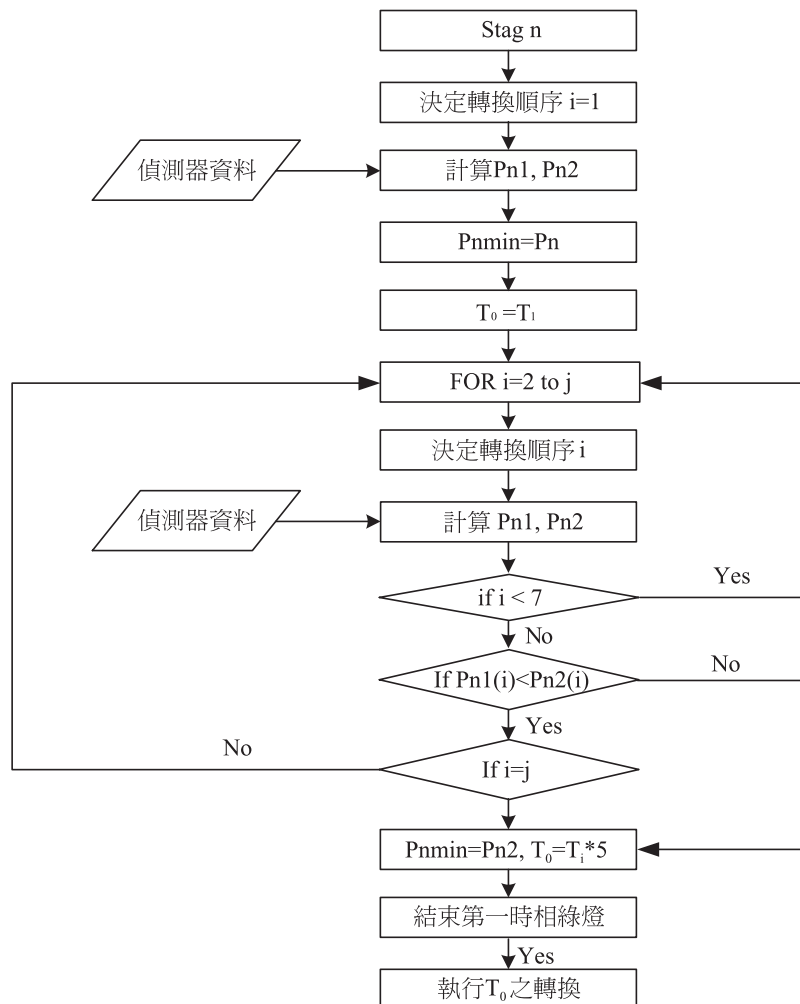


圖 4 模式演算流程圖

3.3 目標函數與限制式

本研究係以各臨近路段之等候線為系統的延滯值，考慮兩時相之各路段的等候線車輛數，以作為獲得綠燈權之參考依據。因此本研究之模式是以發生於獨立路口的臨近路段停止線上，其車輛臨近延滯值的最小化，來做為離散時間下，獨立路口最適化適應性號誌時制分析之目標函數。

目標函數：

$$\text{Min } J = \sum_{k=k_0}^{k_1} (P_1(k) + P_2(k) + P_3(k) + P_4(k)) \quad (2)$$

限制式：

$$P_0(k+1) = P_0(k) + P_1(k+1) + P_2(k+1) + P_3(k+1) + P_4(k+1) \quad (3)$$

$$P_1(k+1) = SWL_1(k) + FA_1(k) - (1 - x_5(k)) \times (EL_1(k) \times (1 - u(k)) + CL_1(k) \times u(k)) \quad (4)$$

$$P_2(k+1) = SWL_2(k) + FA_2(k) - (1 - x_5(k)) \times (EL_2(k) \times (1 - u(k)) + CL_2(k) \times u(k)) \quad (5)$$

$$P_3(k+1) = SWL_3(k) + FA_3(k) - x_5(k) \times (EL_3(k) \times (1 - u(k)) + CL_3(k) \times u(k)) \quad (6)$$

$$P_4(k+1) = SWL_4(k) + FA_4(k) - x_5(k) \times (EL_4(k) \times (1 - u(k)) + CL_4(k) \times u(k)) \quad (7)$$

$$x_5(k+1) = x_5(k) + u(k) - 2x_5(k) \times u(k) \quad (8)$$

$$SWL_i(k+1) = P_i(k+1) \quad (9)$$

變數定義：

$P_0(k)$ ：表示在 k 時段下，獨立路口之系統總延滯值；

$P_i(k), i = 1 \sim 4$ ：表示在 k 時段下，獨立路口於各臨近路段上之延滯值；

$SWL_i(k)$ ：表示在 k 時段下，獨立路口於各臨近路段上，起始車輛等候線長度；

$x_5(k)$ ：表示在 k 時段下，獨立路口的起始燈號狀態。當 $x_5(k) = 0$ ，表示第一時相處於綠燈狀態；當 $x_5(k) = 1$ ，表示第二時相處於綠燈狀態；

$u(k)$ ：表示 k 時段下，是否進行燈態轉換動作。當 $u(k) = 0$ ，表示不進行燈態轉換；當 $u(k) = 1$ ，表示進行燈態轉換；

$FA_i(k)$ ：表示 k 時段下，獨立路口各臨近路段之車輛到達量；

$CL_i(k)$ ：表示 k 時段下，於清道時間內，獨立路口各臨近路段上之車輛紓解量；

$EL_i(k)$ ：表示 k 時段下，於有效綠燈時段內，獨立路口各臨近路段上之車輛紓解量。

3.4 模式求解程序

本研究之運算流程如圖 4 所示，當進入計算 Pn1 與 Pn2 步驟時，起始燈號為第一時相

綠燈狀態，即 $x_3(k) = 0$ ，有以下兩種情形討論：

(1) 若不改變燈號，即 $u(k) = 0$ ，則第一階段四個臨近路段之延滯值為：

$$P_1(1) = SWL_1 + FA_1 - EL_1 \quad (10)$$

$$P_2(1) = SWL_2 + FA_2 - EL_2 \quad (11)$$

$$P_3(1) = SWL_3 + FA_3 \quad (12)$$

$$P_4(1) = SWL_4 + FA_4 \quad (13)$$

因此第一階段路口延滯值 $P(1)$ 為：

$$P(1) = P_1(1) + P_2(1) + P_3(1) + P_4(1) \quad (14)$$

接著計算第二階段各臨近路段之延滯值如下列四式：

$$P_1(2) = P_1(1) + SA_1 - EL_1 \quad (15)$$

$$P_2(2) = P_2(1) + SA_2 - EL_2 \quad (16)$$

$$P_3(2) = P_3(1) + SA_3 \quad (17)$$

$$P_4(2) = P_4(1) + SA_4 \quad (18)$$

可得到第二階段路口延滯值 $P(2)$ 為：

$$P(2) = P_1(2) + P_2(2) + P_3(2) + P_4(2) \quad (19)$$

經由兩階段計算，可以得到第一時相綠燈且不改變燈號之路口總延滯 $Pn1$ 即等於第二階段路口延滯值 $P(2)$ 。

$$Pn1 = P(2) \quad (20)$$

接著計算若改變燈號之路口延滯值 $Pn2$ ，並與不改變燈號之延滯值 $Pn1$ 比較。

(2) 若改變燈號，即 $u(k) = 1$ ，第一階段四個臨近路段之延滯值為：

$$P_1(1) = SWL_1 + FA_1 - CL_1 \quad (21)$$

$$P_2(1) = SWL_2 + FA_2 - CL_2 \quad (22)$$

$$P_3(1) = SWL_3 + FA_3 \quad (23)$$

$$P_4(1) = SWL_4 + FA_4 \quad (24)$$

因此第一階段路口延滯值 $P(1)$ 為：

$$P(1) = P_1(1) + P_2(1) + P_3(1) + P_4(1) \quad (25)$$

接著計算第二階段各臨近路段之延滯值如下列四式：

$$P_1(2) = P_1(1) + SA_1 \quad (26)$$

$$P_2(2) = P_2(1) + SA_2 \quad (27)$$

$$P_3(2) = P_3(1) + SA_3 - EL_3 \quad (28)$$

$$P_4(2) = P_4(1) + SA_4 - EL_4 \quad (29)$$

可得到第二階段路口延滯值 $P(2)$ 為：

$$P(2) = P_1(2) + P_2(2) + P_3(2) + P_4(2) \quad (30)$$

經由兩階段計算，可以得到第一時相綠燈且改變燈號之路口總延滯 $Pn2$ 即等於第二階段路口延滯值 $P(2)$ 。

$$Pn2 = P(2) \quad (31)$$

由以上改變燈號與不改變燈號之路口延滯值計算，可以得到 $Pn1$ 與 $Pn2$ ，如圖 5，進行比較有兩種情形：

- (1) 當 $Pn1 < Pn2$ ，則表示延長綠燈之路口延滯值小於綠燈轉換之路口延滯值，於是進行延長綠燈一個 Δt 長度，並向後推移一個時段也就是一個 Δt 長度，重複進行計算。
- (2) 若 $Pn1 > Pn2$ ，則表示延長綠燈之路口延滯值會大於綠燈轉換之路口延滯值，於是進行燈態轉換，進入清道時間，並向後推移一個時段也就是一個 Δt 長度，重複進行計算。

往後推移一個 Δt 長度，則推移前之第二階段車輛到達量等於推移後第一階段車輛到達量，如下式：

$$FA_i = SA_i \quad (32)$$

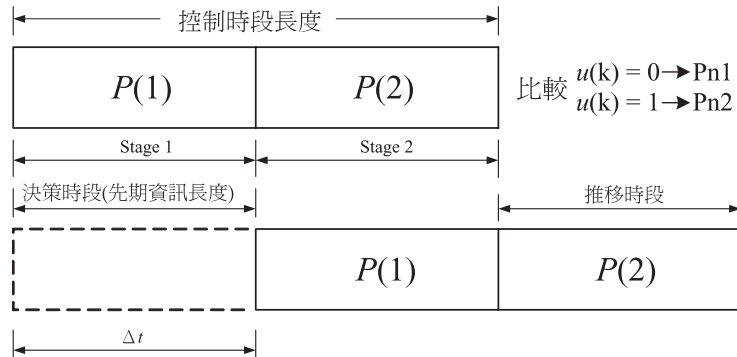


圖 5 延滯值比較圖

而推移後第一階段起始等候線長度為推移前第一階段之各臨近路段之延滯值如下式：

$$SWL_i = P_i(1) \quad (33)$$

四、系統開發

本研究在選擇開發程式的電腦語言時，有很多種電腦語言工具可以供我們做系統開發的選擇，但在選擇時考慮到軟硬體的限制：

- (1) 應用程式必須是開放性架構可以跨平台設置；
- (2) 控制器硬體足以負擔。

因此在這兩項因素的考量下，選擇使用 Java 語言作為本模式的系統開發工具，因為 Java 語言是一種具有物件導向的概念，而且可以跨平台執行的程式語言，對於號誌控制器必須在嚴苛的室外環境下工作，Java 正適合在這平台上作業。因此，利用 Java 語言來開發，是最好的選擇。

因為本研究必須利用布設偵測器的方式取得車流資料，才能進行演算，然而在實際上要應用車輛偵測器取得資料有困難，因此關於車流量資料亦即先期車輛資訊將利用 Java 程式來模擬偵測器產生車輛，並且所模擬產生的車輛到達分配符合普瓦松 (Poisson) 分配。

本適應性號誌控制邏輯主程式架構包含接收車輛偵測器資料後，進行延滯值的計算，再經由延滯值比較的步驟，決定路口績效最佳之執行策略，最後程式輸出是否改變燈態之訊號。主程式之架構如圖 6 所示，其中有關變數定義如下：

- Pn1(i)：第 i 個階段綠燈繼續延長之總延滯；
- Pn2(i)：第 i 個階段綠燈轉換之總延滯；
- T_0 ：綠燈時間；
- T_i ：第 i 個轉換順序；
- Max_Green：最大綠燈時間 120 sec；
- Min_Green：最小綠燈時間 30 sec；
- SOSTC：時相轉換之等候線長度；
- SWL：等候線長度；
- SSS：時相狀態，0：第一時相綠燈、1：第二時相綠燈。

在畫面設計上，主畫面可以設定起始四個路段等候線長度、最大綠燈以及最短綠燈之時間、紀錄區包括累計每一週期時間、偵測器傳入之資料、不改變燈號延滯值 Pn1、改變燈號延滯值 Pn2。主畫面尚有建立、啟動、暫停以及停止四個按鈕，及記錄系統運作週期，包含第一時相以及第二時相的轉換階段，推移了幾個 Δt ，以及記錄第一時相及第二時相

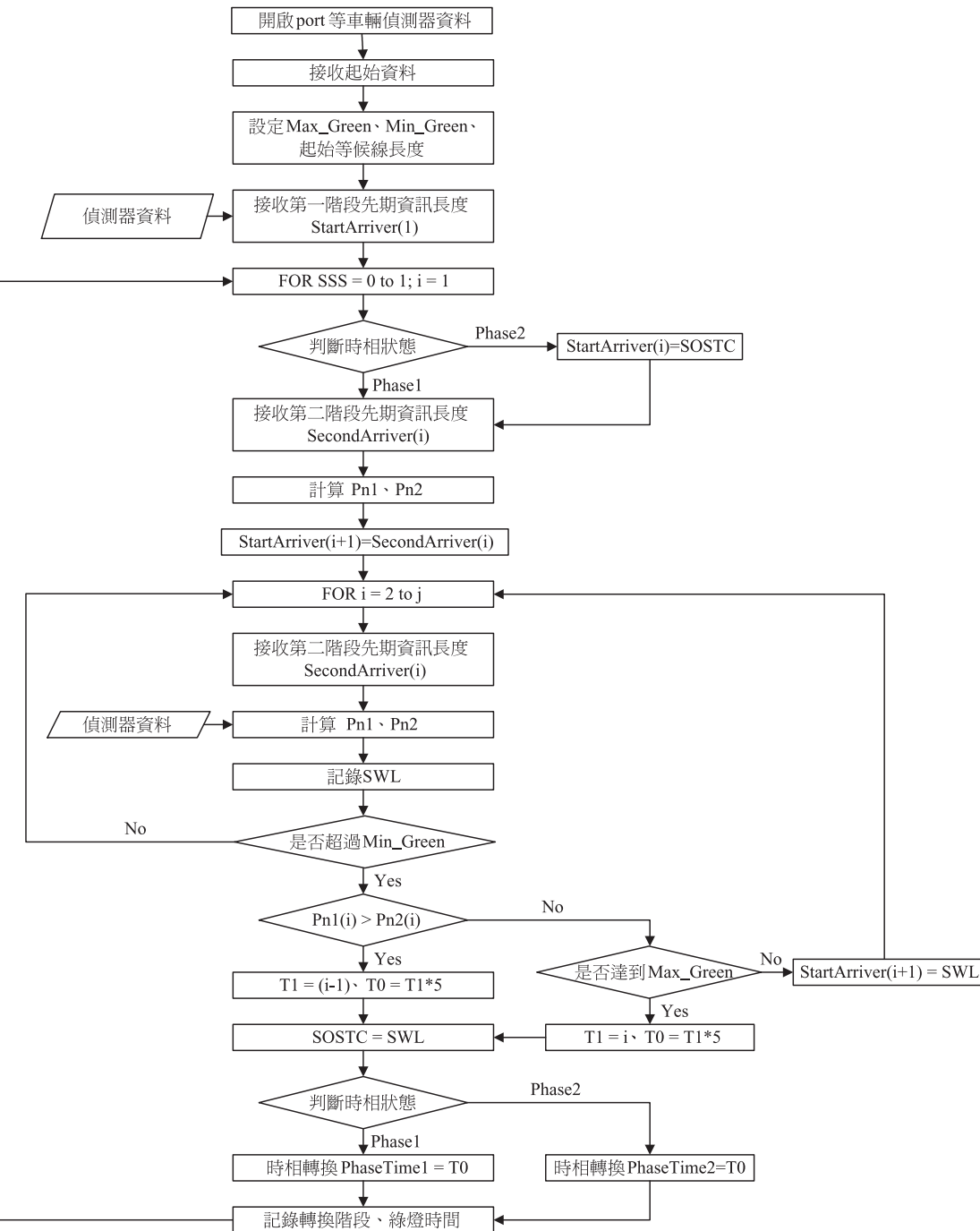


圖 6 程式架構流程圖

之總時間。畫面下方為路口燈態示意圖區，當系統執行時，顯示路口號誌燈態的狀態。因所設計之適應性號誌控制邏輯，必須與車輛偵測器連接，將車輛偵測器傳回之資料轉成先期資訊長度，因此另有模擬車輛產生的畫面，顯示每五秒產生之車流量，傳給主程式進行尋優計算。圖 7 為程式開始執行後之主畫面樣式。

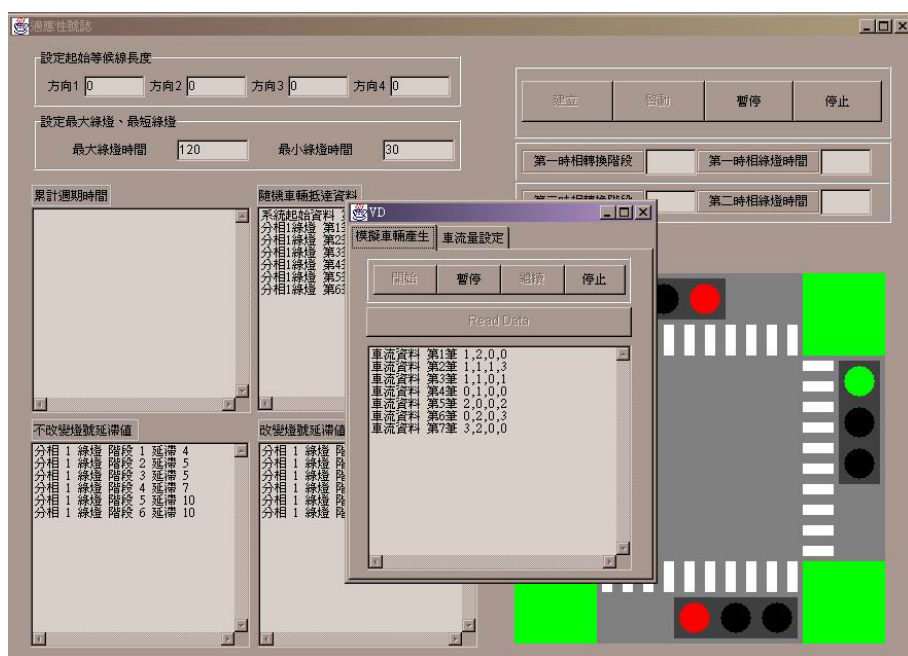


圖 7 起始執行圖例

圖 8 為一讀圖例，當中顯示當第一時相綠燈執行到第 7 階段時，不改變燈號之總延滯為 14，而改變燈號之總延滯為 11，改變燈號之總延滯較小，所以經判斷後，進入清道時間階段，並進行時相轉換。因此總計第一時相綠燈總共執行 7 個階段，綠燈時間總共 35 秒。進入第二時相綠燈後，不改變燈號之總延滯一直大於改變燈號之總延滯，但因為最小綠燈時間限制為 30 秒，所以不進行時相轉換，執行到第 7 階段時，第二時相綠燈時改變燈號總延滯為 25 小於不改變燈號的總延滯 27，因此經判斷進入清道時間，進行時相轉換，因此可以得到第二時相綠燈共執行 6 個階段，綠燈時間總共 30 秒。所以得到第一個週期時間為第一時相綠燈時間加上第二週期綠燈時間再加上兩次清道時間 10 秒，總共週期長度為 75 秒。

經過以上步驟重複進行總延滯之計算與比較，可以得到每一階段的總延滯以及最佳時相設定，並記錄所有週期，如圖 9。

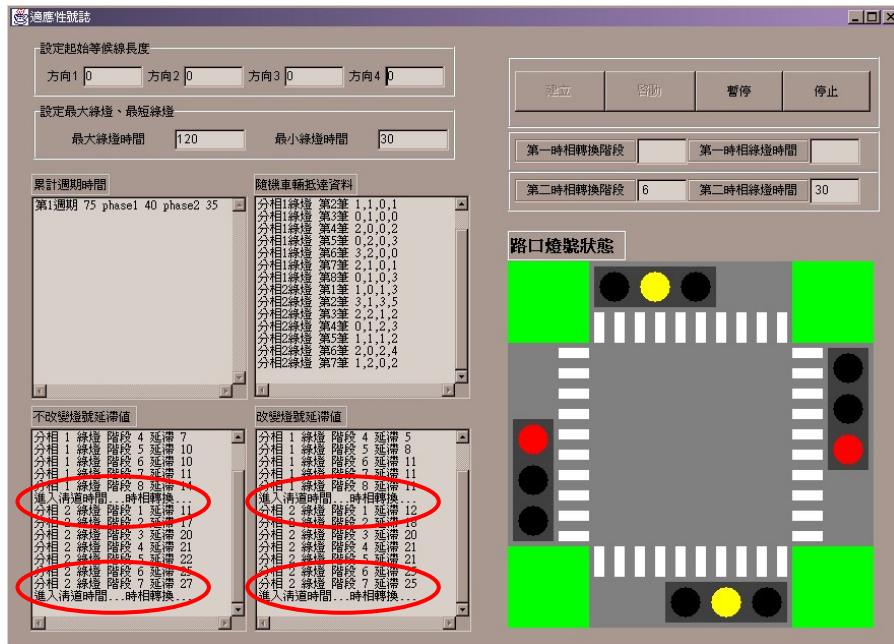


圖 8 時相變換決策例

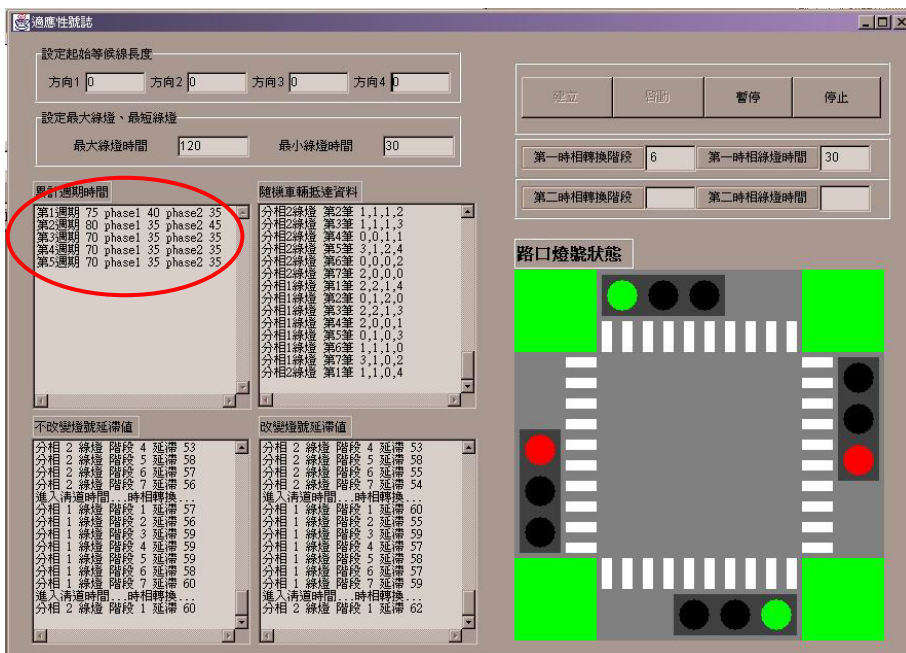


圖 9 週期記錄例

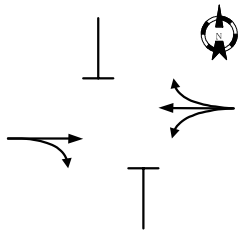
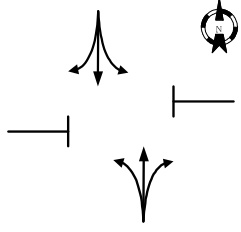
五、實例與評估

本研究選定以台北市長春路與林森北路交叉口為例，利用歷史調查資料與實際調查資料進行實際定時控制與模擬適應性控制之比較。

5.1 資料調查

台北市長春路和林森北路交叉口為簡單二時相控制之路口，長春路為雙車道配置，長春路東往西方向，設定為臨近路段 1，允許直行、右轉及左轉；長春路西往東方向，設定為臨近路段 2，允許直行及右轉，但是禁止左轉。林森北路在近路口處雙向皆配有左轉車道，設南往北方向設定為臨近路段 3，北往南方向設定為臨近路段 4。表 1 為該路口的流向及時制計畫表，其週期長度及各時相之綠燈時間分為尖峰和離峰兩種，在尖峰時間週期長度為 200 秒，離峰時間週期長度為 150 秒，其中包含各時相清道時間，黃燈加上全紅時間共 5 秒。

表 1 台北市長春路和林森北路交叉口流向與時制計畫

	流 動	尖峰綠燈長度	離峰綠燈長度
時 相 1		90 秒	60 秒
時 相 2		100 秒	80 秒

路口定時號誌控制的相關參數和路口績效，採錄影方式及計算求得。本研究總共錄影 45 分鐘，計算資料採其中 AM 08：02 到 AM 08：42 共 40 分鐘的十二個週期資料。因此可以求算每一階段各方向之紓解率，並推算出各方向於各階段之等候線長度，累加後可得路口延滯值之變化。圖 10 所示為路口總延滯變化曲線。

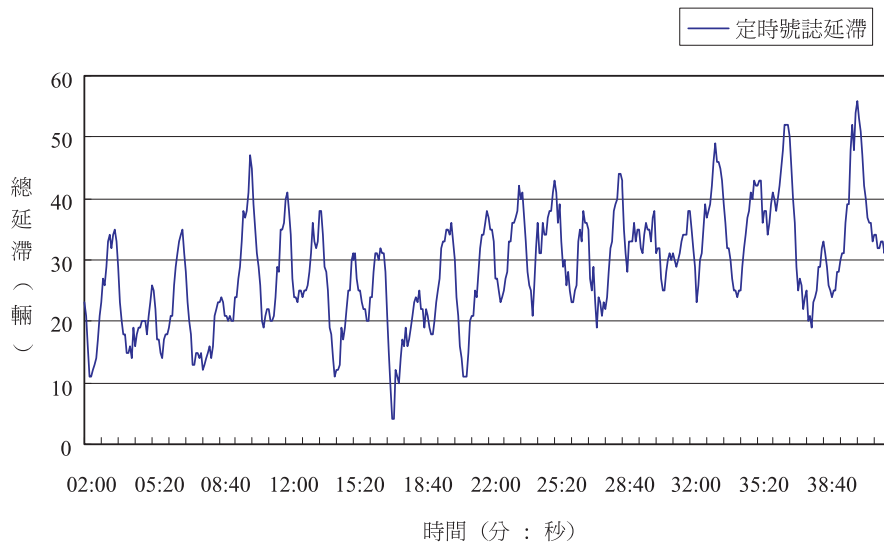


圖 10 實際調查之路口總延滯圖

本研究以電腦模擬方式，模擬各路段車輛到達分配，並以此車輛到達率，分別進行適應性號誌控制及定時號誌控制之路口延滯值演算，進行分析比較。在績效評估方面，將利用歷史資料和實際調查資料為例，進行四部分交叉分析，以驗證本適應性邏輯之可行性。

5.2 現況資料與模擬結果比較

根據調查，當等候車隊在有效綠燈時間以飽和紓解率紓解時，每五秒鐘之紓解量介於 2 到 5 輛之間。經本研究分別用不同有效綠燈時間飽和紓解率 $EL = 3$ 和 4 來模擬分析。結果 $EL = 3$ 之平均總延滯為每車 25.11 秒，較接近實際調查的平均總延滯每車 28.68 秒。依此將所調查之上游臨近路段車輛到達率資料代入程式中，進行適應性號誌控制之模擬，其中最大綠燈時間採 120 秒，最小綠燈時間採 15 秒。模擬結果與實際調查定時號誌及模擬定時號誌之總延滯比較，詳如圖 11 所示。

從圖中可以發現，本研究所提出之適應性號誌控制在大部分時間中可以將路口總延滯有效降低至 10 秒以下，其平均總延滯為每車 5.42 秒，較現況降低 81.1%。在週期變化上，原本定時號誌分為 12 個週期，經模擬適應性號誌邏輯控制則達 59 個週期，表 2 記錄有各週期及各時相的長度。從表中可以發現各時相幾乎在最小綠燈限制為時相長度下即進行時相轉換。

5.3 最大綠燈與最小綠燈限制問題

前節的模擬係在最大綠燈時間 120 秒與最小綠燈時間 15 秒所得之結果。本節將對於不同的最大綠燈及最小綠燈的限制進行交叉模擬分析。由於最大綠燈限制在這個分析例

中，並不會影響到週期變化，因為調查路段的車流量皆未達飽和流量，各路段的等候車隊皆能在一個週期內紓解完畢，所以並不會達到最大綠燈限制。為觀察適應性號誌控制績效變化程度，故僅分別模擬最小綠燈時間限制為 30 秒、45 秒、60 秒、75 秒之情形。

表 3 記錄各種最小綠燈限制情形的平均總延滯、與定時控制平均總延滯比較降低之百分比、及其控制時段之週期數。由表中發現當最小綠燈時間限制秒數增加時，平均總延滯隨之增加，週期數則減少。究其原委係因最小綠燈時間的限制增長將導致當等候車隊以飽和紓解率紓解完後，時相卻未即時更替，競爭時相之路段等候線繼續增加，延滯累積，使得路口總延滯擴增，導致路口績效降低。

從以上分析可以得到，長春路與林森北路交叉口在車流量未達飽和車流量時，若只考慮路口總延滯最小，從平均總延滯降低的幅度來看，最小綠燈時間的限制越小越能得到最小的平均總延滯，但是時相轉換將會過於頻繁。因此考量可忍受的路口總延滯以及行人通過路口時間，本研究認為最小綠燈限制在 30 到 60 秒間、平均總延滯降低 50% 到 70%，皆為可接受之範圍。

5.4 臨近路段飽和度分析

根據朱松偉君^[4]之研究，當 V/C 高於 0.4 時，定時控制之運作績效將會不佳，而適應性邏輯則適用於中、高流量，特別是 V/C 值介於 0.3~0.6 時。因此，以下將進行分析不同 V/C 值在本適應性號誌邏輯的路口總延滯變化。本研究進行 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 五個不同 V/C 值之模擬比較， V/C 值之計算，係依據交通部運輸研究所「2001 台灣地區公路容量手冊」^[13]計算之，是以臨近路段容量為基準，所得結果如表 4 所示。

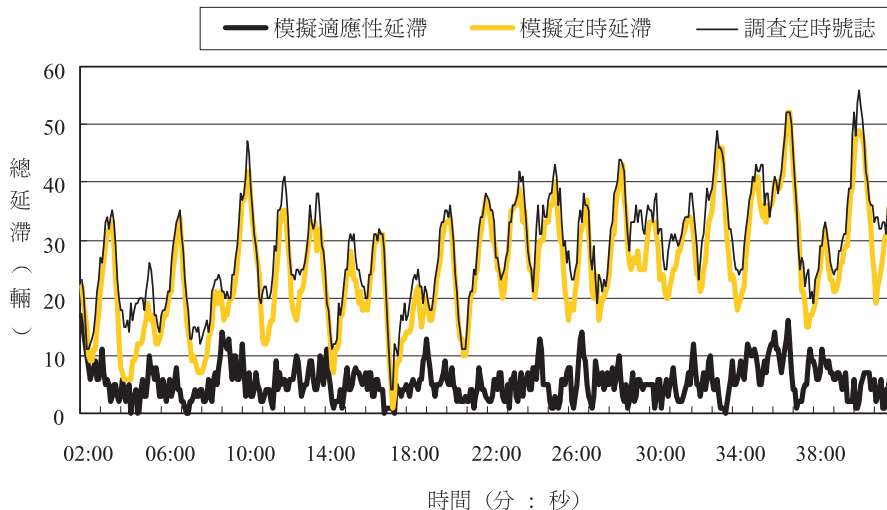


圖 11 實際資料與模擬結果之總延滯比較圖

表 2 模擬適應性號誌週期及時相時間表

單位：秒

	週期時間	時相 1 時間	時相 2 時間		週期時間	時相 1 時間	時相 2 時間
第 1 週期	45	25	20	第 30 週期	40	20	20
第 2 週期	40	20	20	第 31 週期	40	20	20
第 3 週期	40	20	20	第 32 週期	40	20	20
第 4 週期	40	20	20	第 33 週期	40	20	20
第 5 週期	40	20	20	第 34 週期	40	20	20
第 6 週期	40	20	20	第 35 週期	40	20	20
第 7 週期	40	20	20	第 36 週期	40	20	20
第 8 週期	55	20	35	第 37 週期	50	30	20
第 9 週期	40	20	20	第 38 週期	40	20	20
第 10 週期	40	20	20	第 39 週期	40	20	20
第 11 週期	40	20	20	第 40 週期	40	20	20
第 12 週期	40	20	20	第 41 週期	40	20	20
第 13 週期	40	20	20	第 42 週期	40	20	20
第 14 週期	40	20	20	第 43 週期	40	20	20
第 15 週期	40	20	20	第 44 週期	50	20	30
第 16 週期	40	20	20	第 45 週期	40	20	20
第 17 週期	50	20	30	第 46 週期	45	20	25
第 18 週期	40	20	20	第 47 週期	45	25	20
第 19 週期	40	20	20	第 48 週期	50	25	25
第 20 週期	45	25	20	第 49 週期	50	20	30
第 21 週期	40	20	20	第 50 週期	40	20	20
第 22 週期	50	20	30	第 51 週期	40	20	20
第 23 週期	40	20	20	第 52 週期	40	20	20
第 24 週期	40	20	20	第 53 週期	50	20	30
第 25 週期	55	20	35	第 54 週期	45	20	25
第 26 週期	40	20	20	第 55 週期	40	20	20
第 27 週期	40	20	20	第 56 週期	40	20	20
第 28 週期	40	20	20	第 57 週期	45	25	20
第 29 週期	40	20	20	第 58 週期	50	20	30

表 3 不同最小綠燈限制下之適應性控制績效

最小綠燈時間 (單位：秒)	15	30	45	60	75
平均總延滯 (單位：秒／輛)	5.42	7.93	12.63	14.61	17.65
平均總延滯降低百分比	81.10%	72.35%	55.96%	49.06%	38.46%
控制時段週期數	59	34	24	19	15

表 4 不同 V/C 下之平均總延滯變化表

最小綠燈限制 30 秒	V/C				
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
適應性控制平均總延滯	7.20	9.25	14.61	21.10	125.50
降幅	60.24%	63.45%	56.10%	50.53%	-0.02%

表 4 顯示本研究之適應性號誌控制邏輯之延滯值會隨著 V/C 值的增加而增加。在 V/C 值為 0.4、0.5、0.6 時，路口績效都呈現相當穩定的狀態，控制績效也明顯的比定時號誌為佳，當 V/C 值達到 0.7 時，適應性號誌控制的績效開始如定時控制一般上下震盪加劇，並有逐漸升高之趨勢，但整體而言，路口績效仍然優於定時號誌控制。當 V/C = 0.8 時，定時號誌與本適應性控制邏輯的總延滯呈現發散狀態，在一小時之模擬後路口總延滯分別為 125.47 以及 125.5，皆相當不理想。表示在高需求下，定時號誌以及本研究之適應性號誌控制皆無法有效紓解此交通，因此造成總延滯激增，尤其適應性控制在後半段情況比定時控制更糟，總延滯超越定時控制，形成路口塞車的情形。

5.5 最小綠燈限制與 V/C 值交叉分析

本節將針對不同的最小綠燈限制 15、45、60、75 秒以及不同的 V/C 值 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8，進行交叉分析。

表 5 紀錄上述各種情況模擬下之平均總延滯以及平均總延滯之降幅。從表 5 之降幅資料繪製成不同 V/C 值的比較如圖 12。從圖中可以發現在 V/C = 0.5 時，每一種最小綠燈限制都有較佳之路口平均總延滯降幅表現，其次是 0.4，再其次是 0.6。觀察不同最小綠燈時間限制的每一條曲線，皆是大致相同的走勢，從 V/C = 0.4 到 0.5，平均總延滯改善幅度增加，之後又下降，值得注意的是最小綠燈限制為 15 秒的曲線，當 V/C 值從 0.6 變成為 0.7 時，其減少平均總延滯之百分比下降很多，從圖中可以解釋為當車流量多時，頻繁的時相週期轉換並不能大幅減少路口平均總延滯。因此經過分析後可以發現本研究之適應性號誌控制邏輯在 V/C 為 0.5 時有最佳控制效果，可以大幅降低路口總延滯。

表 5 最小綠燈限制與 V/C 值交叉分析表

			V/C				
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
最小綠燈限制	15 秒	定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
		適應性控制平均總延滯	4.58	5.70	9.82	24.23	140.01
		平均總延滯降幅	74.71%	77.48%	70.49%	43.19%	-11.59%
	30 秒	定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
		適應性控制平均總延滯	7.20	9.25	14.61	21.10	125.50
		平均總延滯降幅	60.24%	63.45%	56.10%	50.53%	-0.02%
	45 秒	定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
		適應性控制平均總延滯	9.89	13.53	17.96	27.12	127.47
		平均總延滯降幅	45.39%	46.54%	46.03%	36.41%	-1.59%
	60 秒	定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
		適應性控制平均總延滯	12.23	15.75	23.87	32.06	138.51
		平均總延滯降幅	32.47%	37.77%	28.28%	24.83%	-10.39%
	75 秒	定時控制平均總延滯	18.11	25.31	33.28	42.65	125.47
		適應性控制平均總延滯	15.03	19.55	27.06	37.59	138.73
		平均總延滯降幅	17.01%	22.76%	18.69%	11.86%	-10.57%

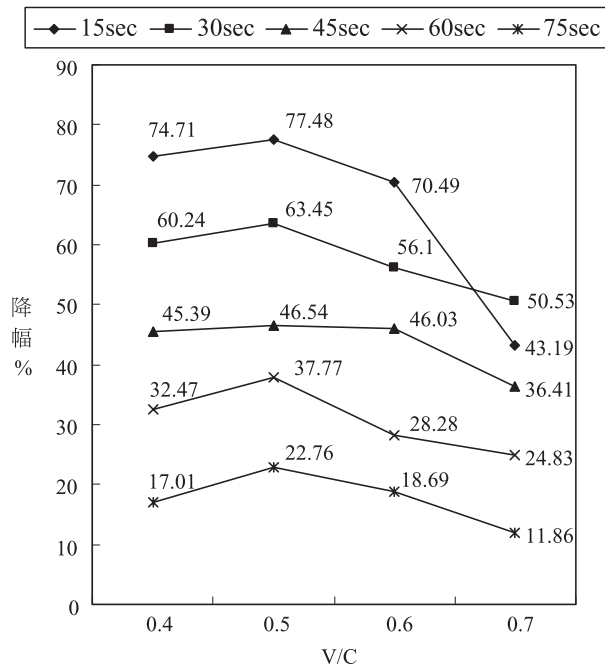


圖 12 最小綠燈限制與 V/C 值交叉分析平均總延滯降幅比較圖

六、結論與建議

本研究利用 OPAC 之計算延滯流程，以及水平推移法，並且加入競爭時相之計算，發展新的兩階段水平推移法，為本研究計算適應性控制邏輯之核心。本法之優點在於縮短控制時段長度，減少偵測器誤差對系統績效計算之影響。本研究之路口績效值係採用路口總延滯為績效指標以各臨近路段之等候線長度總和為系統的延滯值，考慮兩時相之各路段的等候線車輛數，以作為獲得綠燈權之參考依據。

本研究經模擬分析所提之適應性控制邏輯在當最小綠燈時間限制秒數增加時，平均總延滯隨之增加，週期數則減少。理由係當臨近路段未達飽和車流量時，路口績效決定於最小綠燈時間的限制。另外，隨著 V/C 值的增加，延滯值也隨之升高，在 V/C 值為 0.4、0.5、0.6 時，路口績效都呈現相當穩定的狀態，控制績效也明顯的比定時號誌為佳，平均總延滯改善的幅度也隨著 V/C 值之增加而下降。在 V/C 值 0.7 以下時，本適應性號誌控制邏輯可以明顯降低路口總延滯。但當車流量繼續增多時，頻繁的時相週期轉換並不能大幅減少路口平均總延滯，V/C 值達 0.8 時，此適應性號誌控制也將失效。此部分未來可針對固定時相下，研究考慮長週期或短週期對 V/C 值高時對路口壅塞之影響比較。在此高飽和車流狀態，本研究則建議改採 Bang-Bang 控制策略，詳細方法可參見 Chang 和 Lin 相關研究成果^[14]。

本研究雖僅是電腦模擬的結果，但本程式已可在 TCIS 實際上運作，目前正尋求真正在路口進行實驗。另外，本研究並未考慮機車在路段與路口的實際影響，僅將機車數量換算成小汽車當量來計算。後續研究當加入台灣的機車車流特性於模式中，使得模式應用性提升，以符合台灣實際車流特性。

參考文獻

1. 張明惠，「四種現代化適應性號誌控制邏輯 (OPAC、MOVA、SAST、COMDYCS-III) 之比較研究」，成功大學交研所碩士論文，民國八十二年六月。
2. 黃泰林，「構建智慧型適應性網路號誌控制模式之研究」，成功大學交研所博士論文，民國八十三年六月。
3. 康志福，「路口等候線推估與適應性控制整合之研究」，台灣大學土木所交通組碩士論文，民國七十八年六月。
4. 朱松偉，「適應性號誌邏輯微觀分析」，台灣大學土木所交通組碩士論文，民國八十年六月。
5. 邱素文，「最適化控制理論應用於構建獨立路口適應性號誌時制決策邏輯之分析研究」，成功大學交研所碩士論文，民國八十一年六月。

6. Gartner, N. H., "A Prescription for Demand-Responsive Urban Traffic Control", *Transportation Research Record*, 881, TRB, 1982, pp. 73-76.
7. Gartner, N. H., "OPAC: A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control", *Transportation Research Record*, 906, TRB, 1983, pp. 75-81.
8. Vincent, R. A. and Young, J. R., "Self-Optimising Traffic Signal Control Using Microprocessors—The TRRL MOVA Strategy for Isolated Intersections", *Traffic Engineering and Control*, Vol. 27, No. 7, 1986, pp. 385-387.
9. Lin, F. B., "A Comparative Analysis of Two Logics for Adaptive Control of Isolated Intersections", presented at the 67th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, D. C., January 11-14, 1988.
10. 張堂賢，**電腦化交通號誌控制器進階功能之研發策略擬訂**，交通部委託中華智慧型運輸系統協會辦理，民國九十一年四月。
11. 吳榮煌、張堂賢等，**南港經貿園區 ITS 主題公園暨多功能之交通管理資訊中心規劃設計專案**，交通部委託中華智慧型運輸系統協會辦理，民國九十年四月。
12. 張堂賢，**台灣地區智慧型運輸系統實驗城計劃規畫(二)**，交通部委託中華智慧型運輸系統協會辦理，民國九十年四月。
13. 交通部運輸研究所，**2001 年台灣地區公路容量手冊**，民國九十年三月。
14. Chang, T.-H. and Lin, J.-T., "Optimal Signal Timing for an Oversaturated Intersection", *Transportation Research*, 34B(6), 2000, pp. 471-491.

