

利用模糊近似推論方式構建通勤者 決策行為模式¹

USING FUZZY APPROXIMATE REASONING PROCESSES IN MODELING COMMUTERS' DECISION BEHAVIOR: A CASE STUDY

董啟崇 Chee-Chong Tong²

趙祖佑 Tsu-Yu Chao³

(90 年 8 月 2 日收稿，90 年 11 月 29 日第一次修改，91 年 1 月 15 日
第二次修改，91 年 8 月 28 日定稿)

摘 要

傳統通勤決策行為研究常利用機率性模式處理實際決策不確定性的問題，但近來模糊理論應用於解釋事物存在模稜兩可現象已漸被接受，尤其對於主觀認知與判斷所產生之模糊特性利用模糊理論加以解決已是一主要方法，而在董啟崇、趙祖佑^[1]相關研究中亦證明通勤決策過程中之模糊特性；因此本研究以模糊理論結合近似推論(approximate reasoning)方法為基礎，構建模糊化之旅運行為架構，期望嘗試解釋通勤決策過程中之不確定性，並利用適當之模式來描述模糊通勤決策行為。在實證部分，本研究以平日駕駛小客車通勤於台北-淡水之淡江大學教職員及學生為研究範例之實證對象，利用控制實驗(controlled experiment)方式，以真實的通勤者在模擬的通勤環境下，進行連續數日的決策實驗，對其決策行為過程加以觀察與記錄。本研究利用系統化方式分析出發時間與路徑決策行為，並以模糊化旅運行為架構為基礎，構建六個程

-
1. 本研究承蒙國科會專題補助(計畫編號：NSC86-2416-H032-001)，謹此致謝。
 2. 淡江大學運輸管理學系暨運輸科學研究所副教授(聯絡地址為 251 台北縣淡水鎮英專路 151 號；電話：02-26215656 轉 2081；E-mail：cctong@mail.tku.edu.tw)。
 3. 淡江大學運輸科學研究所碩士(聯絡地址為 408 台中市精誠路 746 號；電話：04-24722334；E-mail：matthew9@ms7.hinet.net)。

序性通勤推論決策模型，解釋通勤行為過程；並以實證樣本為基礎，依目前之條件與限制，在上述六個模式中選取三個，針對決策模型進行模式推論結果與實際決策之符合程度進行實證分析，而結果顯示利用近似推論模式之結果對於實際決策行為之符合度平均達七成以上，此結果說明本研究所構建之模式具有相當程度之適用性。

關鍵詞：模糊理論；近似推論；通勤行為；出發時間與路徑決策；控制實驗

ABSTRACT

Probability or stochastic choice models have been widely applied to address the uncertainty of traveler's decision behavior. On the other hand, Zadeh's fuzzy set theory introduced to address the phenomenon of ambiguous events rather than random nature may be suitable for exploring human decision behavior such as travel decisions. This study is an attempt to apply fuzzy reasoning method to study travel behavior with a case of auto-driving commuters' daily departure time and route choices. Within such framework, driver perceptions of uncertain outcome of attributes affecting their travel choices are due to vagueness rather than randomness. A rule-based reasoning process is therefore applied to model the observed behavior rather than the commonly used utility maximization. Furthermore, a systematic hierarchy approach was implemented to describe commuters' decision process. Observations were established from a controlled experiment in which real commuters were interacting with a simulated traffic context. Six sequential departure time and route decision models were established based on fuzzy inference concepts and those preliminary observations. Each model was then paired with its respective observations. Excluding those with too few observations, three models were validated and showed promising results with matching ratios (between actual decisions and model outputs) higher than 70%.

Key Words: *Fuzzy set theory; Fuzzy approximate reasoning; Travel decision; Departure time and route choice; Controlled experiment*

一、前言

都市交通型態深受道路使用者之影響，尤其通勤旅次影響都市交通甚劇，而為能真正了解交通問題之本質，應當從了解旅運者之旅行(或通勤)決策行為著手，方能規劃出合宜的運輸管理策略與交通控制措施。

在傳統行為決策模式中，其模式基礎大多建立在二值邏輯(bivalent logic)上，除了機率性模式探討決策的隨機性質外，對於事物不確定性及邊界模糊的情況無法完全掌握及探討。就通勤者行為而言，其決策過程亦存在有模糊性，包括對屬性感受之判斷是以語意方式(如：行駛時間非常長、不滿意等)加以判斷等；而在模糊理論逐漸成熟之際，上述問題已迎刃而解；而在模糊性決策模式中，最重要的精神即是採用模糊邏輯(fuzzy logic)方式，以近似於人類自然決策的法則探討其決策行為。

模糊邏輯可視為傳統邏輯系統的擴展，其提供一有效的概念性架構處理有關環境不確定(uncertainty)及不精確(imprecision)情況所產生的問題。模糊邏輯之特點，即是決策過程是依據自然語意方式來加以處理，構建決策者針對事物之決策規則，以「如果…一則…」(“IF…THEN…”)的推論規則(production-rule)組成整個決策；而為了保持規則的適用性與彈性以及了解資料輸入對於規則之影響程度，引用近似推論(approximate reasoning)的觀念；而在模式之處理，則引用了模糊控制(fuzzy control)的概念，包括規則的組合及非模糊化等處理方式，本研究綜合上述之概念以及通勤者決策行為架構，構成了完整的模糊通勤決策架構。

因此本篇報告之主要目的有以下幾項：

1. 以近似推論方法為基礎，構建模糊化通勤旅運行為架構。
2. 以研究範例中實證對象之出發時間與路徑決策行為為出發點，構建通勤者兩決策維度之模糊推論模式。
3. 透過研究範例之實驗觀察決策結果，與模式推論結果進行驗證與比較，分析模式之解釋能力。

而本文章節安排如下：

在第二節將先針對模糊近似推論方法應用在交通運輸領域相關文獻進行回顧；第三節則以模糊近似推論方法為基礎，說明構建模糊化之通勤旅運行為模式之架構與流程；第四節說明研究範例之模式構建，其中 4.1 節介紹本研究所選定之實證對象與範圍，4.2 節則說明控制實驗之架構與流程，並以控制實驗為基礎，進行受試者通勤決策之觀察與記錄，4.3 與 4.4 節則以程序化之方法構建在資訊影響下通勤行為模式與行為樣本之分組；第五節則以模糊近似推論為方法之模式推論結果與實證對象之決策進行符合度驗證與比較；最後第六節為本篇之結論與建議。

二、文獻回顧

「模糊理論」首先於 1965 年由 Zadeh 教授提出，把人類主觀上思考或判斷的過

程模型化，利用所謂模糊集合(fuzzy set)概念，將人類思考或對事件存在的模糊性作量化之處理，並定義隸屬函數(membership function)來界定事件之模糊程度；而後 Zade^[2]與 Mamdani and Assilian^[3]並將模糊集合理論延伸，提出近似推論概念，將傳統邏輯推論方法結合模糊理論，稱為模糊邏輯系統(fuzzy logic system)。

應用模糊邏輯於交通運輸之相關研究迄今已相當廣泛，而首先應用在交通工程或控制方面，如 Pappis and Mamdan^[4]利用近似推論方法探討獨立號誌化路口交通控制策略，並透過與傳統模式比較後發現利用模糊邏輯方式具有較佳之模式結果；而 Nakatsuyama 等人^[5]利用模糊邏輯推導兩連續之號誌化幹道路口之時差(offset)，Sasaki and Akiyam^[6]利用快速道路控制人員工作經驗建立模糊邏輯決策庫，用以進行匝道儀控自動控制；由上述可知交通控制領域開啟模糊邏輯在交通運輸上之應用。

此外，Chen 等人^[7]利用模糊控制器之設計，進行高速公路匝道自動儀控；Chiu^[8]將模糊邏輯模式應用在小型路網的適應性號誌控制系統中；Chang and Shyu^[9]利用模糊專家系統評估個案城市中各號誌化路口是否需要設置交通號誌；Sayers and Bel^[10]利用模糊邏輯求解隨交通量變化之號誌控制策略；Kikuchi and Chakrobert^[11]與藍武王、王日昌及江勁毅^[12]，分別利用模糊邏輯為基礎之推論機制，探討駕駛者之刺激-反應規則，建立模糊跟車模式；Kikuchi and Riegne^[13]與 Kikuchi 等人^[14]利用確定性模式結合模糊推論模式，探討駕駛者在接近路口時，面臨號誌變換期間之決策環境。

而在運輸規劃模式應用方面，Kalic and Teodorovic^[15]利用模糊邏輯推論進行旅次發生率之預測，將蒐集之資料分為兩部分，第一部分用來進行推論規則之產生，第二部分作為控制資料組，該報告並將模糊邏輯模式與類神經網路模式、多元線性迴歸模式進行比較，結果顯示模糊邏輯模式有較佳之估計效果。而 Kalic and Teodorovic^[16]亦利用模糊邏輯方式結合基因演算法進行旅次分布之預測。Xu and Chan^[17]則利用模糊集合方法分析路段混合車流流量資料，以模糊權重進行 O-D 矩陣估計。在交通量指派方面，Akiyama 等人^[18]透過模糊旅行時間之構建，發展模糊化之 Frank-Wolf 演算法，求解使用者均衡下之路網流量；陳惠國、張美香^[19]則是進一步透過模糊均衡指派模式，探討模糊交通資訊對於路網交通流量之影響。

而模糊邏輯應用於旅運行為機制之探討課題方面，大都屬於規範性模式(normative model)，即利用推論規則之組合進行決策行為之描述，並透過決策與推論結果之比較進行最適推論規則權重之校估；最早可見關於路徑決策相關研究首推 Teodorovic and Kikuchi^[20]以模糊推論方式為基礎建立模糊決策屬性與方案偏好強度間之關係，探討在模糊旅行時間影響下駕駛者二元路徑選擇問題；Lotan and Koutsopoulos^[21]利用近似推論結合模糊控制，將模式擴展到三條路徑之決策，並加入即時交通資訊對於路徑決

策行為影響之研究；Vythoulkas and Koutsopoulos^[22] 利用模糊集合結合類神經網路構建個體選擇行為模式，而在隸屬函數型態部分，先利用高斯函數定義隸屬函數，再以類神經方法校估隸屬函數中之最適參數型態；Teodorovic and Kalic^[23] 利用近似推論演算法探討航空運輸的路線選擇問題；Akiyama and Tsuboi^[24] 利用模糊推論探討多元路徑選擇問題，透過實際訪問駕駛者日常自身駕駛經驗與認知建立模糊隸屬函數，其中考慮之模糊決策屬性包括旅行時間、擁擠程度與意外事件發生可能性，並透過類神經網路模式分析不同替選路線間偏好差異與選擇頻率之關係。

而董啟崇、趙祖佑^[1] 及趙祖佑^[25] 為首次以行為觀察(behavior investigation)為出發點研究駕駛者之模糊決策行為，而透過上述之研究發現，駕駛者在通勤過程中對於決策屬性之認知或是方案之偏好的確有模糊特性之產生，因此利用模糊邏輯探討通勤者決策行為有相當之適用性；而本研究承續上述研究之架構與通勤行為實驗，利用模糊邏輯方法將通勤決策行為予以模式化。

模糊邏輯還應用在交通方案評估、特殊事件偵測、服務水準評估、車輛或人員排程派遣及航空運輸等，可知應用層面相當廣泛。

三、模糊決策推論模式構建

3.1 理論架構

根據模糊推論決策架構理論，可將其過程分為三個處理階段(phase)，如圖 1 所示：第一階段(Phase I)：近似推論階段(The Approximate Reasoning Phase)

本階段是處理有關模糊推論決策中，最基本也是最重要之階段；其中包括決策規則之構成，以及屬性變數輸入後結合決策規則加以處理；而輸入項可能包括目前的交通狀況、駕駛者預估之旅行時間或透過廣播或交通資訊系統所提供之資訊等；進而透過決策規則之推演(propagation)，以及近似推論之方式，產生目前交通狀況，或駕駛者預估的情況下，對於每一規則中各方案初步推論結果，以 $(B_i^*(1), \dots, B_i^*(m))$ 來表示，其中 i 為規則數($i=1 \sim N$)、 m 為方案數。

第二階段(Phase II)：內部處理表示階段(The Internal Presentation Phase)

針對各決策規則的推論結果加以結合，產生各方案之模糊評價 $(B^*(1), \dots, B^*(m))$ ，用來作為選擇集合中各方案的偏好程度，做一初步表示。

第三階段(Phase III)：非模糊化階段(The Defuzzification Phase)

由於方案的決策為一離散選擇(discrete choice)，因此將選擇集合中各方案的模糊偏好做一個比較，而偏好最高的方案將會被決策者所選擇。

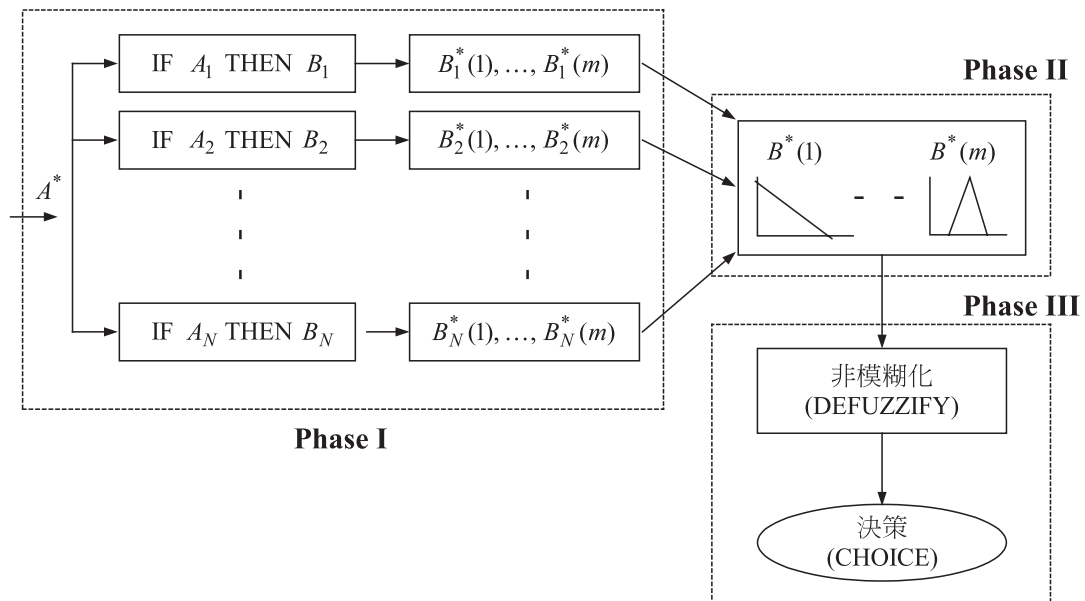


圖 1 模糊決策架構圖

在通勤者對於外在的交通環境狀況與交通資訊之判斷，以及本身對於過去通勤經驗之累積的感受，都存在著不確定性與模糊性，因此本研究以圖 1 模糊決策架構為基礎，構建通勤者模糊推論決策架構如圖 2 所示。

3.1.1 規則構建

在構建決策規則中，最基本的組成單元為系統狀態與決策偏好之間的關係，其型態為「如果 A_i 則 B_i 」(“IF A_i THEN B_i ”)，此方法稱為以規則為基礎的系統(rule-based systems)，常見於構建專家系統之應用，其輸入項必須有其特定的型態；而在模糊推論模式中， A_i 與 B_i 皆為模糊語意集合，因此規則更能以直接且符合人類思考方式，處理有關人類決策；而其中 A_i (即為 left-hand-side, LHS) 是與決策方案相關之交通狀況、交通資訊及其他與替選路線有關之屬性變數(旅行時間、距離、交通資訊等)，而 B_i (即為 right-hand-side, RHS) 是與方案之偏好態度有關的感受或決策；而在本研究之通勤模式中，LHS 是處理有關不同的交通狀況、交通資訊或其他與路線或出發時間決策時的相關影響屬性，而 RHS 是與決策有關，但不直接表示決策，而是對於替選方案的態度或語意偏好。

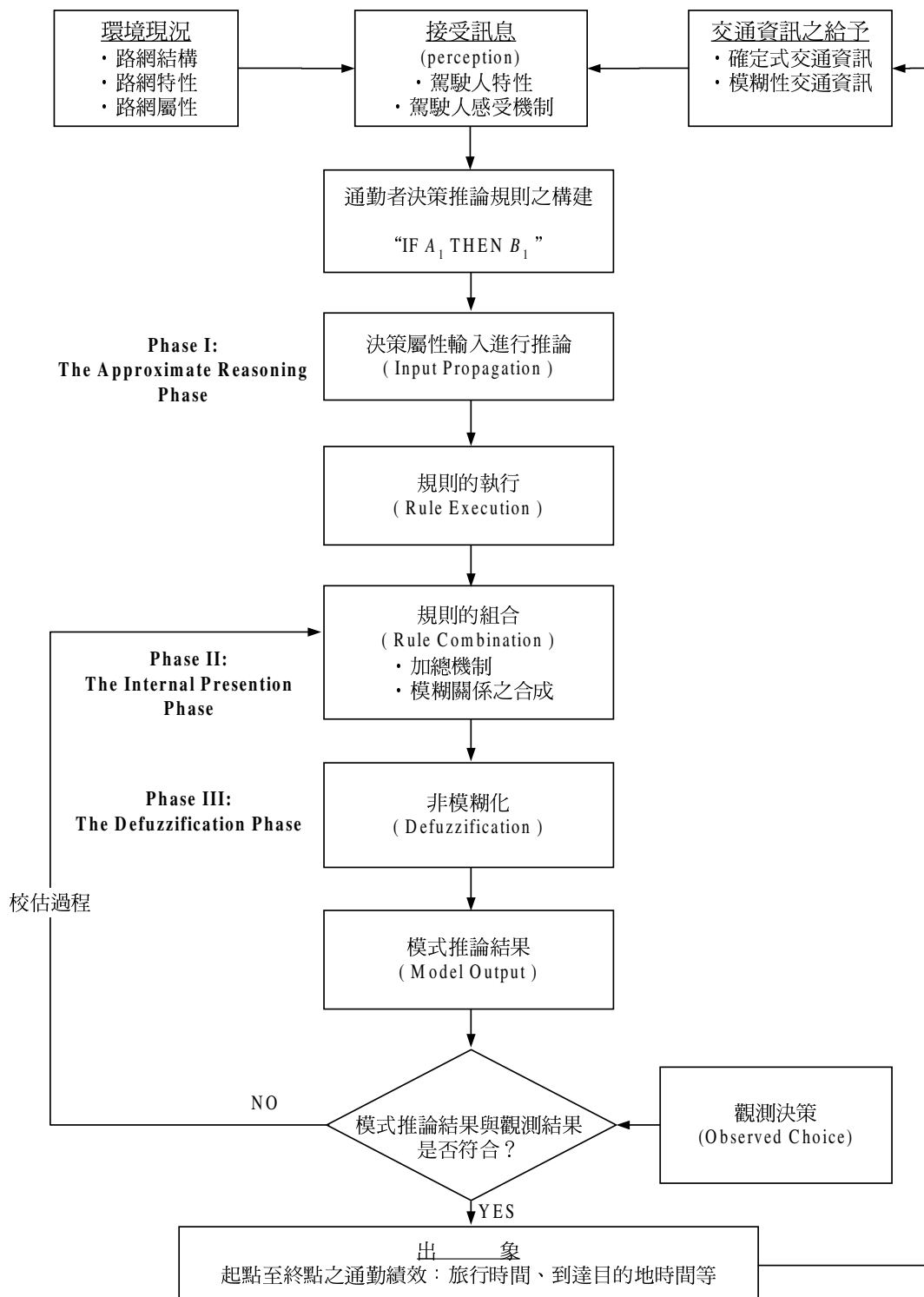


圖 2 通勤者模糊決策架構圖

就決策規則的構造來說，一般化的 A_i 及 B_i 為多維度：

$$A_i = (A_i^1, \dots, A_i^m) \quad (1)$$

$$B_i = (B_i^1, \dots, B_i^m) \quad (2)$$

其中 i 為規則數 ($i=1, \dots, N$) 亦為決策屬性數目， m 為選擇集中之方案數， A_i^j 為 LHS 規則中第 i 個規則對於第 j 個方案的敘述，而 B_i^j 為在 A_i 屬性影響下，對於 j 方案之語意偏好程度。舉例如下：「當路線 1 的旅行時間是短的，我將會行駛該路線」；「當路線 1 的旅行時間比平常差而路線 2 跟平常相同，那我可能會行駛路線 2」。

在 LHS 規則中有關屬性 (A_i^j) 構建方面，乃根據通勤者對於屬性的模糊認知而加以分類，而其型態會受到最大值與最小值區間大小、函數形狀、以及各模糊等級與相鄰等級間重疊區域大小所影響；以某路徑旅行時間的認知為例，把其分為五個模糊等級分類，分別為：「非常短」(very low)、「短」(low)、「普通」(medium)、「長」(high) 與「非常長」(very high)，如圖 3 所示，在這個例子中 $A_j^i \in \{VL, L, M, H, VH\}$ 。

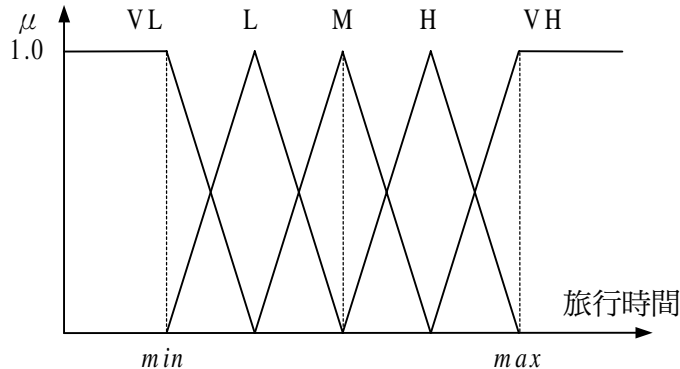


圖 3 模糊旅行時間分類

在 RHS 規則中有關模糊偏好感受 (B_j^i) 的構建，是根據通勤者對於各決策屬性變數的語意偏好程度，其與決策相關但不直接成為決策結果，必須與輸入屬性變數比較以及規則組合後，才能反映受訪者的最後決策；同樣的，如同認知一樣劃分為五個模糊等級，而模糊語意偏好分類之示意隸屬函數如圖 4 所示。

N：我不會(*will not*)採用該方案；

PN：我可能不會(*probably not*)採用該方案；

I：我對於是否採用該方案並無意見(*indifferent*)；

PY：我可能會(*probably will*)採用該方案；

Y：我會(*will*)採用該方案。

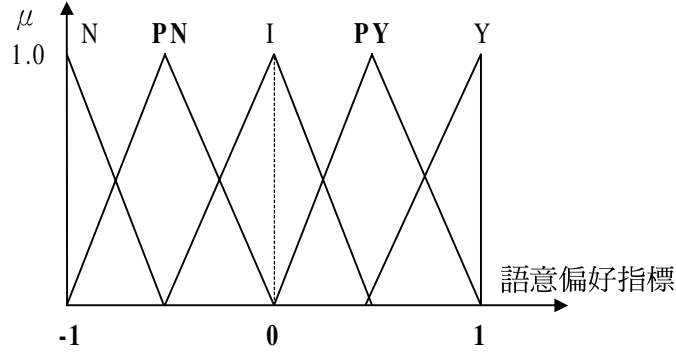


圖 4 模糊語意偏好等級分類

語意偏好指標的尺度定義在-1到 1 之間，-1代表完全不會考慮該方案，1 代表會毫無保留的選擇該方案，而 0 代表對於通勤者而言感受並無差異；然而尺度之定義可依研究目的而定，並非絕對的。

3.1.2 屬性輸入

在決策過程中之輸入項為通勤者考慮之屬性資料，包括預期旅行時間、預計延滯時間(schedule delay)(本研究定義為估計到達時間與實際到達時間之差距)、交通資訊或其他與出發時間或路徑決策相關之屬性，以 A^* 來表示輸入之屬性， $A^* = (A^{1*}, \dots, A^{m*})$ ，其中 m 為選擇集合中之方案數；以規則中考慮旅行時間為例， A^{i*} 表示駕駛者對於路徑 i 預估的旅行時間。下一步驟乃透過屬性輸入資料與各模糊認知分類等級的重疊(overlap)程度，來決定該屬性輸入是屬於何模糊分類等級。而針對屬性輸入型態為確定性或模糊性，其重疊狀況可分為確定性屬性輸入與模糊性屬性輸入兩種(以預估旅行時間 A^* 與模糊旅行時間分類等級之推論為例)，如圖 5 所示。

利用屬性輸入資料與模糊感受分類等級加以重疊，取得各等級之重疊指標($\alpha_{VL}, \alpha_L, \alpha_M, \alpha_H, \alpha_{VH}$)，用以分析屬性屬於何個等級，以下式表示：

$$\alpha_i = \max \min(\mu_{A^*}(x), \mu_i(x)) \quad (3)$$

上式之 α_i 表示模糊資料 A^* 與模糊等級隸屬函數 μ_i 的重疊程度，透過「小中取大」運算，取得重疊值 α_i ；其值會介於 0 到 1 之間，若等於 1 表示兩模糊集合完全的重疊，若等於 0 表示兩者無相同的地方；在圖 5(A)中， α_{VH} 表示預估旅行時間屬於「非常長」

的程度，而 α_H 表示屬於旅行時間「長」的程度；由於 $\alpha_H > \alpha_{VH}$ ，因此目前預計的旅行時間是較屬於「長」的等級；以同樣的方式亦可應用在模糊屬性資料之分類上(如圖 5(B)所示)。透過這個方式可依各等級之隸屬度，把屬性輸入加以分類。

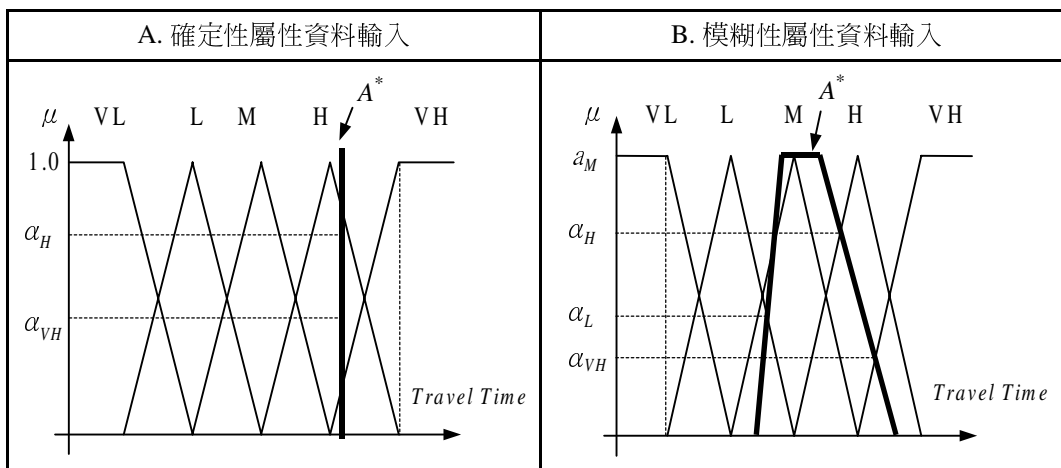


圖 5 屬性資料輸入圖(以旅行時間為例)

3.1.3 規則執行

本部分之處理是希望了解人類如何透過規則的推演及其隱含機制，透過針對輸入之屬性與模糊感受等級之間有具有重疊程度之規則，對其語意偏好之影響程度加以探討，稱為關聯機制(implication scheme)。

在單一規則方面，令 $A^* = (A^{1*}, \dots, A^{m*})$ 為各方案中某屬性輸入資料，而 $A_i = (A_i^1, \dots, A_i^m)$ 為第 i 個規則的 LHS，透過每個方案之輸入資料 A^{j*} 與該方案之模糊感受分類 A_i^j 之符合程度，因此可決定規則 i 的對於決策的執行程度，其過程如式 4 與 5：

$$\alpha_i = \min_j (\alpha_i^j) \quad (4)$$

其中：

$$\alpha_i^j = \max_x \min \left(\mu_{A^{j*}}(x), \mu_{A_i^j}(x) \right) \quad (5)$$

α_i 表示 “ A^{1*} 為 A_i^1 ，且 A^{2*} 為 A_i^2 ，...，且 A^{m*} 為 A_i^m ” 屬於真實的程度，亦可視為規則 i 的強度，並以此來決定規則 i 在決策過程中的重要性；因此當不只一個規則

的 $\alpha_i > 0$ ，也就會有不只一個規則會影響最後的決策。在多規則推論過程中，有多個決策規則($\alpha_i > 0$)被採用，因此必須考慮到這多個規則的組合結果(如圖 6 所示)；從圖中可看出，“PY”與“Y”RHS 模糊感受集合具有最高的隸屬度，因為“PY”與“Y”的偏好指標皆落在 0 到 1 之間，因此該方案將會有正的偏好。

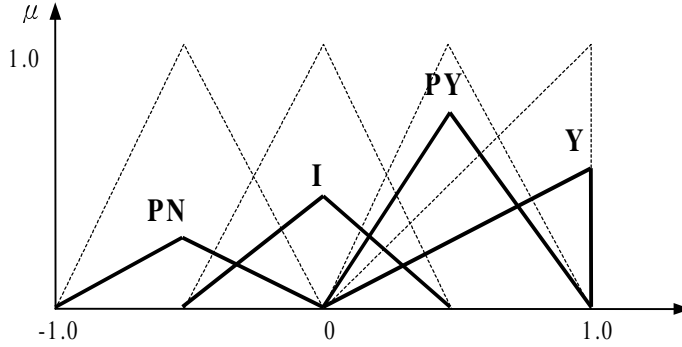


圖 6 決策規則組合之方案偏好圖

3.1.4 規則結合

模糊推論中之規則具有彈性，不但可與實際交通環境加以結合，且可考慮多規則之組合，並透過加總機制(aggregation scheme)來反應最後之決策反應。駕駛者對於方案之偏好是結合數個規則結果而成，而該規則必須具有 α_i 非零的特性，透過規則的結合，可將不同方面之結果加以考慮並成為最後的決策，如圖 7 所示。

3.1.5 非模糊化處理

透過非模糊化過程，將隸屬函數利用一實數值來表示，將加總後之模糊集合 B^{j*} ，化簡為控制決策或行動；在模糊控制領域中最常見的非模糊化方法有二，一為最大值平均法(mean of maximum method)，另一為重心法(center of gravity method)，而本研究採用應用最廣的重心法，求取 B^{j*} 隸屬函數之非模糊化值，如下式所示：

$$z^j = \frac{\int y \mu_{B^{j*}}(y) dy}{\int \mu_{B^{j*}}(y) dy} \quad (6)$$

最後非模糊化後之 z^j 通常代表模糊控制最後的動作，就通勤決策行為而言，非模糊化之結果代表對於方案之偏好度。

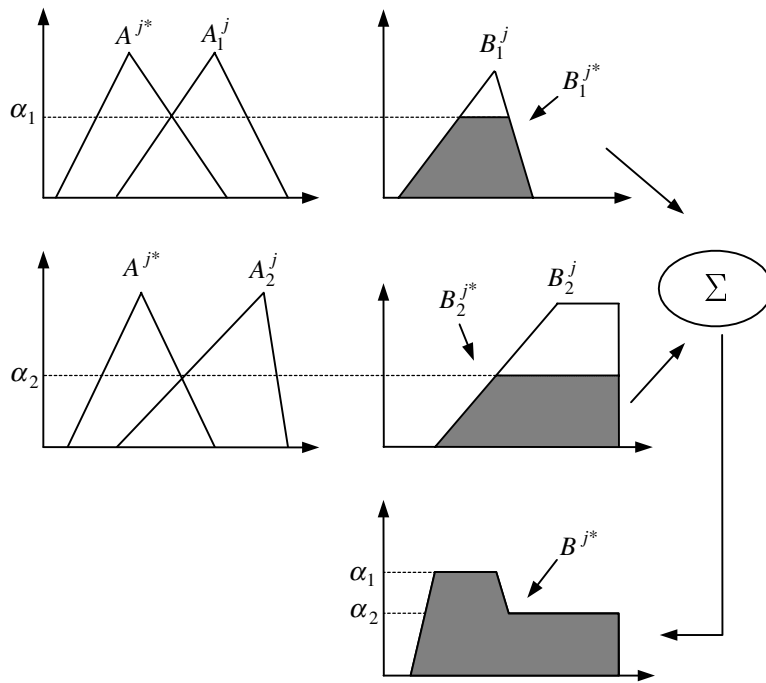


圖 7 決策加總過程圖

3.2 構建通勤決策之模糊推論模式

本節根據通勤決策過程中有關決策維度、決策行為、決策情境、決策層級與通勤樣本行為等相關課題分別加以界定與探討，並以先前研究通勤者出發時間與路徑程序性之決策為例，作為本研究構建推論模式之參考基礎。

3.2.1 決策維度

就駕駛者決策行為而言，其屬日常通勤行為之決策維度一般可分為出發時間決策 (departure time decision)、路徑決策 (route choice) 及運具選擇 (mode choice) 等三部分。其中運具選擇行為除突發性的變換外，較不屬於經常性之選擇或變換情形，因此通勤者日常面臨的決策問題主要在出發時間與行駛的路線。

本研究將探討之通勤行為包括路徑與出發時間兩決策維度，此較為直接影響通勤者每日決策績效，而 Mahmassani and Stephan^[26] 與 Tong^[27] 亦證實此兩維度具有某程度之關連。

3.2.2 決策時間點

駕駛者根據個人通勤經驗或接受的通勤資訊，隨著決策過程之時間點不同，決策

時機可分為行前(pre-trip)決策與通勤途中(en-route)決策，由於現階段駕駛者能接受到之即時交通資訊有限，且通勤途中之決策牽涉到複雜的決策點問題，因此本研究案例以探討行前決策為主。

3.2.3 決策行為

本研究以效用最大規則(utility maximization rule)與滿意規則(satisficing rule)^[27-29]為決策機制基礎，分別定義通勤決策為選擇(choice)與變換(switch)兩種：

- (1) 選擇行為即是在經過所有可替選方案綜合評比後，會選擇最佳之方案；在出發時間選擇方面，是以一間斷時間(time slice)劃分方案(通常以 5 分鐘為劃分基準)，選擇最佳之出發時間方案；而在路徑選擇方面，則是以不同行駛路線作為方案劃分基準，選擇最佳之路徑。
- (2) 變換行為則是針對原有方案加以評估，決定是否「變」或「不變」原有使用之方案；其中在出發時間變換方面，則是評估先前出發時間決策之績效，決定是否變換原有之出發時間，若是決定變換，再利用調整模式將其出發時間提前或延後；而在路徑變換方面，決策者會評估之前之通勤績效，決定是否繼續沿用原先使用之路徑，若決定變換，則在其餘路徑方案中選擇最佳路徑。

透過此機制之採用，能完整考慮通勤過程中之決策行為；因此模式構建基礎根據決策維度與決策行為之組合將有：出發時間選擇、出發時間變換以及路徑選擇、路徑變換等決策模式，進一步之說明可見第 4.3 節個案實證研究。

3.2.4 決策層級

本研究根據通勤者之決策維度、決策行為與決策過程以及實際決策行為之觀察，將路徑決策與出發時間決策分為不同決策層級，而推論模式即以此決策層級為構建基礎，其中分為單一維度決策與雙決策維度：

1. 單一決策維度

- (1) 路徑單一維度決策：通勤者只考慮路徑單一維度之決策，或者出發時間並不影響其路徑決策。
- (2) 出發時間單一維度決策：通勤者只考慮出發時間單一維度決策，或者路徑並不影響其出發時間決策。

2. 雙決策維度

根據廖曉萍^[29]之研究，由於通勤者路徑與出發時間決策之無異帶大小不同，會有兩種決策維度程序性選擇或變換行為產生，因此在雙決策維度中，根據不同維度的決策順序，通勤行為可分為以下三類，此即稱之為程序性決策模式：

- (1) 先進行出發時間決策，再進行路徑決策：通勤者先進行出發時間決策，繼而在已

選擇的出發時間下進行預估之行為，以作為路徑決策之參考。

- (2) 先進行路徑決策，再進行出發時間決策：通勤者先進行路徑決策，繼而在已選擇的路線下進行預估之行為以作為出發時間決策之參考。
- (3) 同時進行出發時間與路徑決策：通勤者根據過去通勤經驗累積或對未來交通狀況加以綜合判斷，在其內在形成出發時間、路徑與交通資訊之間各種組合之交互關係，因此將同時進行其行駛路線與出發時間之決策。然此行為牽涉到交通資訊在內在組合運作等複雜機制，本研究在此暫不探討同時決策行為。

四、研究範例之模式構建

4.1 研究對象與範圍

本研究選擇以通勤於台北—淡水之淡江大學教職員生為主要研究對象，並以簡化之台北—淡水通勤走廊作為實驗通勤區。

4.2 決策行為資料之觀察

為取得駕駛者通勤決策行為資料，本研究以控制實驗(control experiment)取得通勤者決策與交通狀況之交互關係，並配合模糊理論為基礎之問卷，獲取駕駛人對於屬性變數認知與隸屬函數等之資料，作為反應決策行為與模式構建之基礎；問卷詳細內容請參考趙祖佑^[25]。

4.2.1 實驗環境

本研究參考 Mahmassani and Tong^[30]以及其他有關應用控制實驗的相關研究模擬路網為基礎，並參酌實證研究對象之通勤特性，調整通勤區範圍；實驗環境設計如圖 8 所示。

- (1) 本研究將通勤區設定為單一起迄，起點為實驗分配的居住區段，迄點(實驗目的地)為學校；而通勤區劃分為 9 個區段，每個區段為 2 公里；其中區段 1 至 5 為住宅區，有旅次的產生，而最後一個區段(第 9 區段)即為通勤者的目的地。
- (2) 替選路線有二：路線 1 為四車道(每方向兩車道)的快速道路，速限為 60kph，路線 2 為二車道的一般市區道路，速限為 40kph，作為實驗通勤者路徑決策之選擇。
- (3) 上班(打卡)或上課開始時間為上午 8：30 整，由於本實驗探討出發前的決策，因此不考慮通勤途中行駛路線的變換。

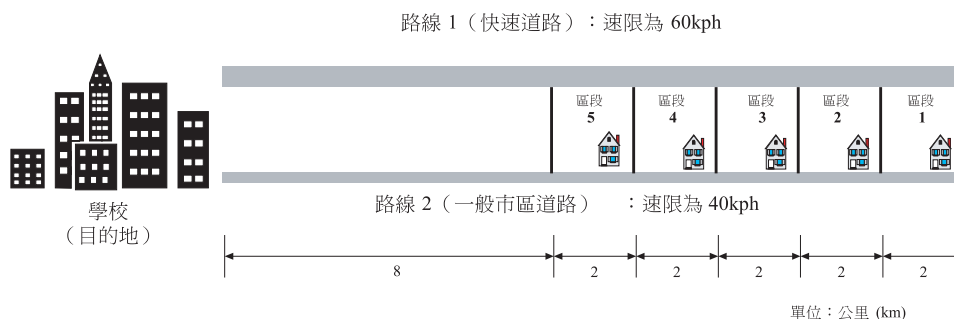


圖 8 實驗通勤區域圖

而為因應行前交通資訊系統之影響，本研究根據通勤資訊量之多寡，將受訪樣本分為有限資訊與完全資訊兩實驗組，以作為完全依據個人通勤經驗以及具備行前資訊之通勤行為進行實驗對照。

而在決策屬性方面，除考慮旅行時間外(趙祖佑^[25]，Horowitz^[31])，延滯時間亦為通勤決策過程中重要考慮因素(Hendrickson and Plank^[32])；所謂延滯時間(schedule delay)為個人實際與期望到達時間之差距，而此亦表示個人之通勤績效，並為變換決策行為之重要基準，因此旅行時間與延滯時間同時為本研究推論模式構建所考慮之決策屬性。

4.2.2 實驗流程

本控制實驗重複進行 20 次，代表受試者 20 天(連續 4 個工作週)的決策過程，如此才有足夠時間讓受試者完整反映出其決策過程；實驗流程如圖 9 所示；其中包含三個過程：

(1) 通勤者認知→評估→決策過程：

受試者透過個人平時通勤經驗累積與設定的實驗交通環境以及可能的交通資訊，經過評估與判斷而作成今日的決策。以本研究來說，包括對於各路線旅行時間以及延滯時間長短的認知、以及每日出發前對於旅行時間或到達時間之預估。除此之外，還包括通勤者對於系統偏好部分，即個人偏好的到達時間，亦即在工作時間的前提下，最希望到達的時間；而受訪者每日之決策結果(包括選擇之出發時間與使用路徑)成為圖 2 推論模式中之「觀測決策(observed choice)」結果，並與模式推論結果進行比較。

(2) 模擬過程及出象：

將個人通勤決策結果加以結合而成為整體效果，模擬每個不同決策點的決策出象，其中包括實際的旅行時間與到達時間以及其他相關旅行成本，作為通勤者決策績

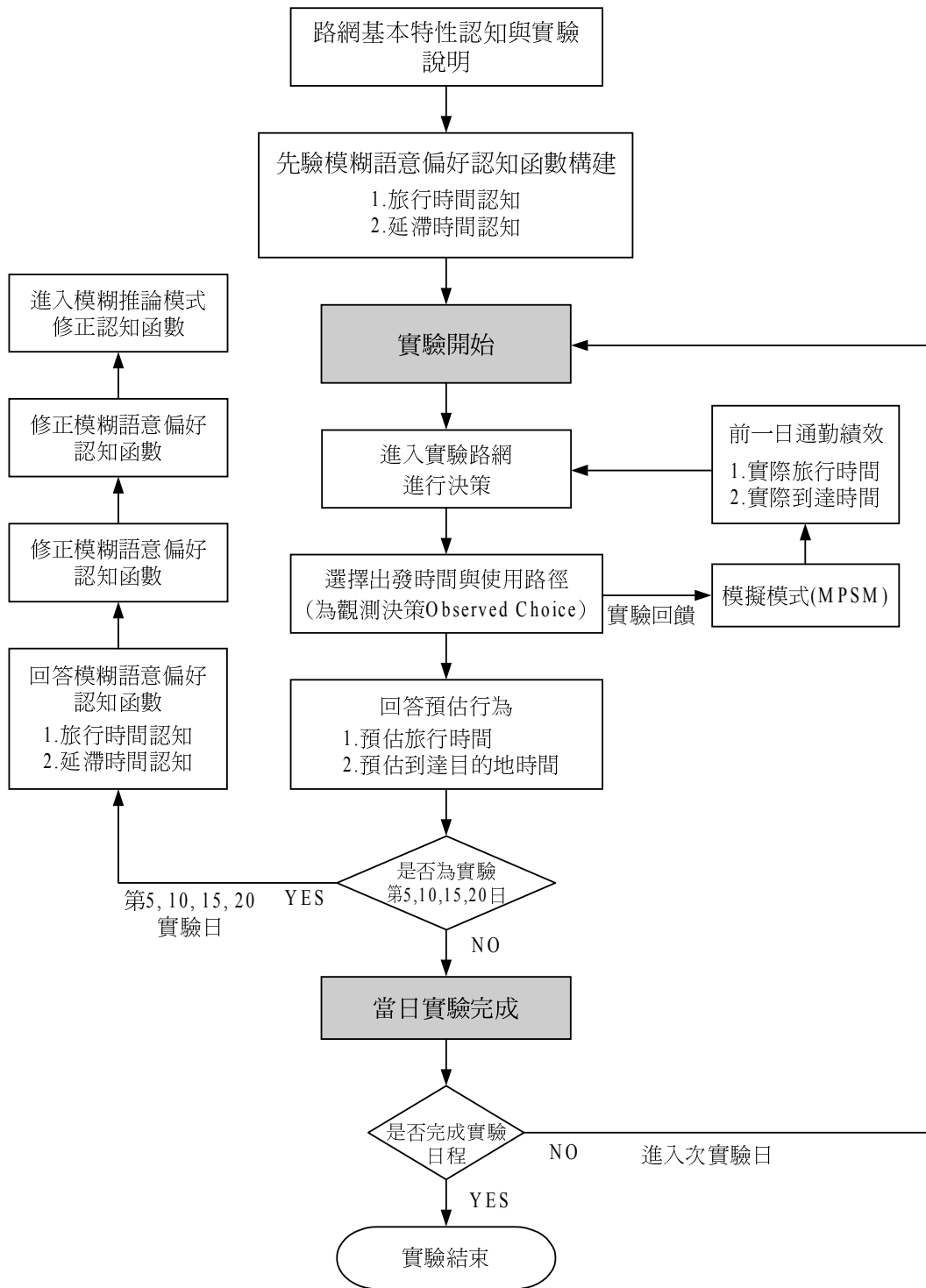


圖 9 實驗流程圖

效結果。而其中模擬模式採用電腦模擬程式(special-purpose fixed-step macroscopic highway traffic simulation model: MPSM [Chang, Mahmassani and Herman^[33]], 依照設計的系統以及車流理論的公式, 模擬每一通勤者的車輛每日依其決策進入本交通系統而在系統內移動的狀況, 其最終結果將可模擬每一通勤者在此一系統內的旅行時間及系統的擁擠狀況, 將提供予實驗參與者作下一日決策的參考, 如此週而復始。

(3) 回饋過程：

通勤者出發時間與路徑決策之整合效果, 透過實驗回饋方式進入模擬模式, 計算通勤績效, 作為下一日決策之參考。

4.2.3 模糊屬性特性之取得

本研究依據 Lotan and Koutsopoulos^[21]提出之模糊屬性隸屬函數構建方法, 並配合前述實驗內容, 利用以下三個問題來描述模糊屬性(以旅行時間隸屬函數構建為例)：

問題 1. 在正常的交通狀況下(如：無不正常的延滯、重要車禍或是天氣問題產生), 請您概略估計從居住地到通勤地點(學校)之行駛時間：大約____分鐘 ~ ____分鐘

問題 2. 在您的通勤經驗(居住地至工作地點)當中, 您曾經有過最長的行駛時間為：大約____分鐘

問題 3. 在您的通勤經驗(居住地至工作地點)當中, 您曾經有過最短的行駛時間為：大約____分鐘

透過問題 1 可得知一般狀況下最有可能的旅行時間, 對應於通勤旅行時間集合中隸屬度最高的值或範圍(也就是隸屬度為 1.0), 如圖 10 中 $[a_2, a_3]$; 而問題 2 表示可能的最長旅行時間, 與問題 3 表示可能的最短旅行時間, 兩者代表旅行時間極端的部分, 分別為圖 14 中的 a_1 與 a_4 , 如此構成某駕駛通勤者對於某起迄點或某路線的模糊旅行時間隸屬函數。

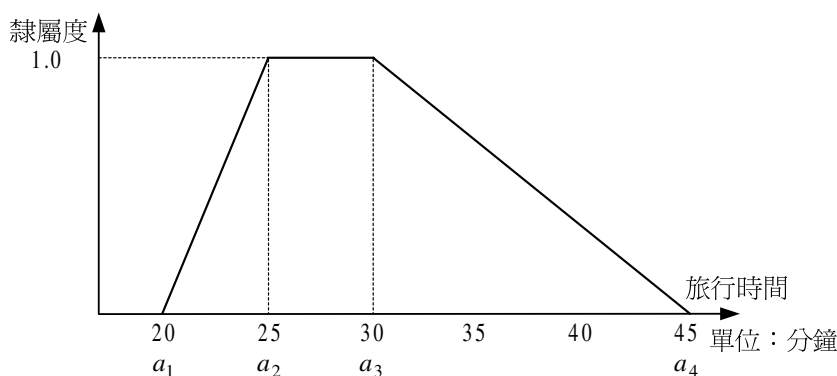


圖 10 模糊隸屬函數

由於本研究認為透過通勤經驗之累積，此函數型態有可能會變化，而先驗經驗發現，若是每天進行此函數調查，可能會造成受訪者之混淆與困擾，因此除了在實驗起始日進行調查外，分別在實驗各週結束，也就是實驗第 5、10、15、20 日進行此函數之修正。

4.3 受測樣本通勤決策行為分析

本研究根據研究範例中受測樣本通勤行為之觀察，以第 3.2 節程序性決策模式架構為基礎分析樣本之決策行為，其中分為單一決策維度與雙決策維度：

1. 單一決策維度

(1) 路徑單一維度決策

在路徑選擇行為方面，受測者根據前一日(以下簡稱昨日)通勤經驗所產生旅行時間($TT_{R(i)}$)與延滯時間($SD_{R(i)}$)或今日預估之旅行時間與延滯時間，作為今日決策之依據，其中， $R(i)$ 代表替選路徑方案，在本研究實驗中有兩條替選路徑，因此 $i=1, 2$ 。而路徑變換行為則是考慮昨日之延滯時間($SD_{R(t-1)}^{t-1}$)，以路徑變換傾向(switch propensity)作為今日是否變換原來路線之基準；其中上標 $t-1$ 代表時間點為昨日，而 $R(t-1)$ 代表方案為昨日使用之路徑(見圖 11)。

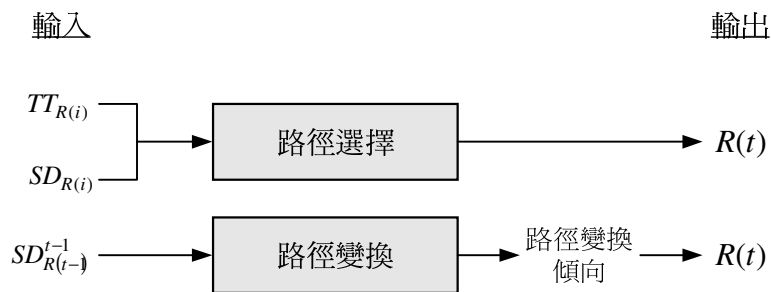


圖 11 路徑單一決策架構圖

(2) 出發時間單一維度決策

在出發時間選擇行為方面，考慮昨日之旅行時間與延滯時間出象($TT_{R(t-1)}^{t-1}$ ， $SD_{R(t-1)}^{t-1}$)，作為今日(t)決策依據；而出發時間變換則同樣是以昨日延滯時間為變換基準，決定今日是否變換出發時間；若是決定變換則透過出發時間調整模式(departure time adjustment model)，決定今日之出發時間調整量(見圖 12)。

在此說明的是，若出發時間選擇是依據今日預估之旅行時間與延滯時間，通勤者內在必須針對所有出發時間與路徑之交通狀況加以綜合考慮，因為出發時間決策同時

也是旅行時間與延滯時間預估之重要影響因素。

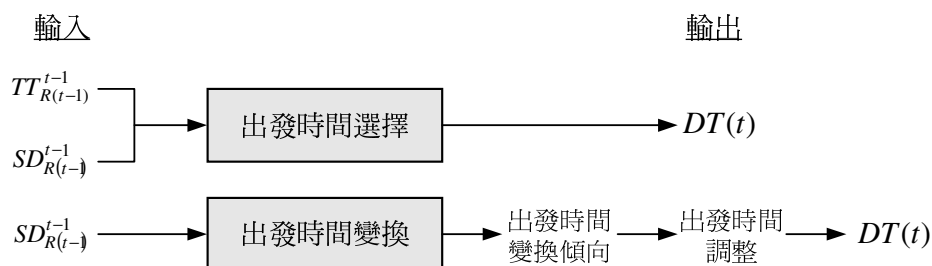


圖 12 出發時間單一決策架構圖

2. 雙決策維度

在雙決策維度中，本研究透過實驗過程之觀察，根據雙維度的決策順序，將受測者通勤行為分為以下三類：

(1) 先進行出發時間決策，再進行路徑決策

出發時間決策又可依據決策行為分為出發時間選擇與變換等四種決策行為模型(見圖 13)：

決策行為模型(一)：在出發時間選擇行為方面，受測者考慮昨日之通勤績效(旅行時間與延滯時間)，決定今日之出發時間(出發時間選擇模式 I)；接下來會根據已選定的出發時間預估今日各路線之旅行時間與延滯時間，作為其今日路徑選擇之參考(路徑選擇模式 I)。

決策行為模型(二)：透過上述之出發時間選擇模式所選定的出發時間下，預估昨日使用路線之延滯時間，作為今日是否變換昨日路線之目標(路徑變換模式 I)。

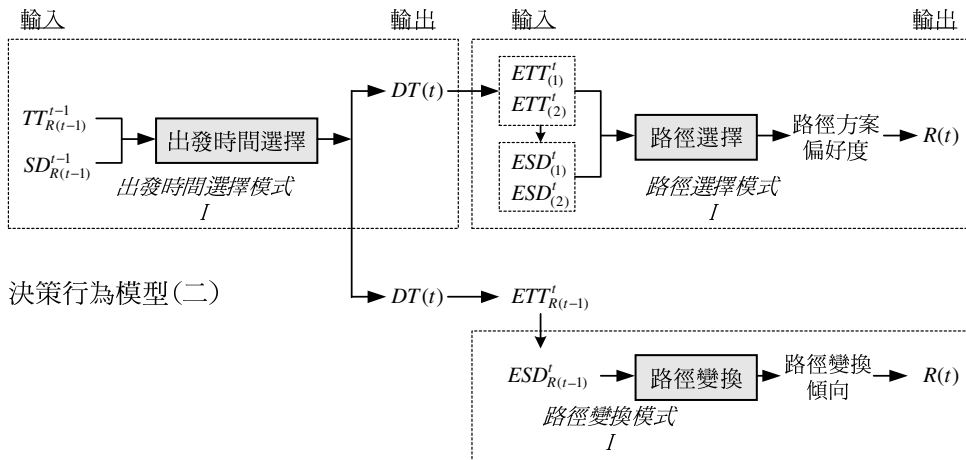
決策行為模型(三)：在出發時間變換行為方面，受測者考慮昨日通勤績效(即延滯時間)是否達到其目標，以決定今日是否變換原有的出發時間；若決定不變換，則以昨日之出發時間為基準，預估今日各路線(或昨日路線)之交通狀況做為路徑決策參考；然而若決定變換原有之出發時間，則透過出發時間調整模式決定調整量，而成為今日之出發時間(出發時間變換模式 I)。

決策行為模型(四)：透過出發時間變換行為所選定的出發時間作為路徑是否變換之參考(路徑變換模式 I)。

(2) 先進行路徑決策，再進行出發時間決策

其中亦根據決策行為分為路徑選擇與變換等兩種決策行為模型(見圖 14)：

決策行為模型(一)



決策行為模型(二)

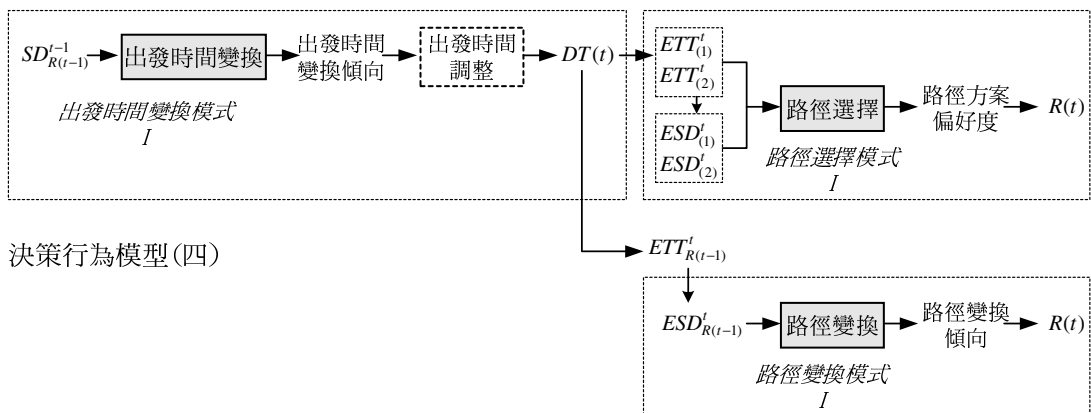
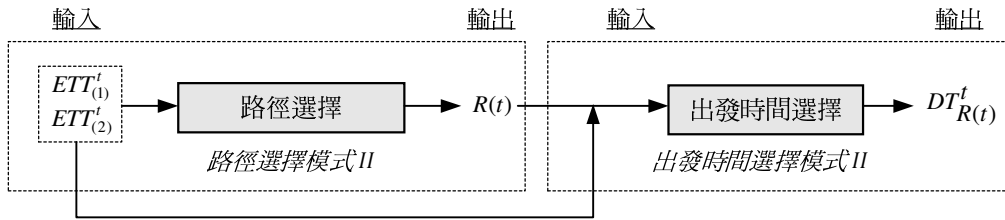


圖 13 先進行出發時間決策再進行路徑決策架構圖

決策行為模型(五)：在路徑選擇方面，受測者會根據今日對於兩條路徑預估之旅行時間進行路徑決策(路徑選擇模式 II)，且出發時間亦以該預估旅行時間作為出發時間決策依據(出發時間選擇模式 II)。

決策行為模型(六)：在路徑變換方面，受測者根據昨日通勤績效是否達到其目標，決定今日是否變換路徑(路徑變換模式 II)；接下來在選定的路線下，預估該路線之旅行時間，作為今日出發時間決策之參考(出發時間選擇模式 III)。

決策行為模型(五)



決策行為模型(六)

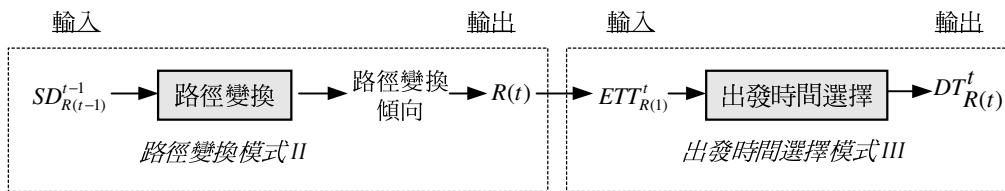


圖 14 先進行路徑決策再進行出發時間決策架構圖

4.4 在資訊影響下決策模式對應分組

本研究依據受測樣本之資訊型態分組以及對於旅行時間或延滯時間的預估行為之不同，而將其劃分兩大類型：

1. 有限資訊樣本

此組樣本主要是針對昨日使用路徑於今日之可能旅行時間進行預測，此行為屬於路徑變換行為；亦即是先進行出發時間選擇後，依據已選定之出發時間對昨日路徑於今日可能之旅行時間(或到達時間)加以預測，作為路徑變換決策之參考，因此本行為組符合決策行為模型(二)。

2. 完全資訊樣本

(1) 僅預測今日已選定路徑旅行時間(或到達時間)之樣本

本組樣本之決策行為是先進行路徑變換決策後，再依據已選定路徑之旅行時間(或到達時間)預測值，作為出發時間選擇決策之參考，而此行為符合決策行為模型(六)。

(2) 對今日兩替選路徑旅行時間(或到達時間)皆預估之樣本

本樣本是先進行出發時間選擇後，再預測今日各替選路徑可能旅行時間(或到達時間)，以進行路徑選擇，此行為符合決策行為模型(一)。

經過上述決策層級說明，本研究將六個決策行為模型以及各通勤決策推論模式與相關輸入屬性與實證樣本彙整如表 1 所示。而其中決策行為模型(三)與(四)中，有關出

發時間變換模式部分，若是通勤者決定變換原有之出發時間，則必須決定變換多少，而此即牽涉到出發時間調整問題，其中包括時間調整量的界定問題，以及出發時間變換方案集合之界定，需另同時構建一出發時間調整模式，因此本研究暫不處理此問題。除此之外，在決策行為模型(五)部分，路徑與出發時間之選擇同時以今日對於兩條路徑之預估旅行時間為屬性考慮，然而旅行時間之預估必須建立在某特定的出發時間與路徑下，而此決策行為牽涉到預估之旅行時間為通勤者本身針對出發時間與路徑綜合考慮之結果，此非本研究之探討範圍。

綜合上述，本研究將針對：決策行為模型(一)、(二)與(六)，進行實證分析。

表 1 決策行為模型之推論模式表

決策行為模型*	推論模式	輸入屬性	實證樣本
一	出發時間選擇模式 I	$TT_{R(t-1)}^{t-1}, SD_{R(t-1)}^{t-1}$	完全資訊 預估兩條路線
	路徑選擇模式 I	$ETT_R^t, \forall R, ESD_R^t, \forall R$	
二	出發時間選擇模式 I	$TT_{R(t-1)}^{t-1}, SD_{R(t-1)}^{t-1}$	有限資訊
	路徑變換模式 I	$ESD_{R(t-1)}^t$	
三	出發時間變換模式 I	$SD_{R(t-1)}^{t-1}$	未探討
	路徑選擇模式 I	$ETT_R^t, \forall R, ESD_R^t, \forall R$	
四	出發時間變換模式 I	$SD_{R(t-1)}^{t-1}$	未探討
	路徑變換模式 I	$ESD_{R(t-1)}^t$	
五	路徑選擇模式 II	$ETT_R^t, \forall R$	未探討
	出發時間選擇模式 II		
六	路徑變換模式 II	$SD_{R(t-1)}^{t-1}$	完全資訊 預估一條路線
	出發時間選擇模式 III	$ETT_{R(t)}^t$	

五、研究範例之實證分析

本研究利用模式推論結果與受試者實際決策行為進行比對，若兩者結果相同，則表示推論結果符合(fit)，其計算公式如下：

$$\text{區段 } n \text{ 推論符合度} = \frac{\text{區段 } n \text{ 推論符合之決策樣本數}}{\text{區段 } n \text{ 決策總樣本數}} \times 100\% \quad (7)$$

而推論結果與實際決策符合與否之比較標準如下：

1. 在出發時間決策比較部分：

透過模式推論的出發時間與受訪通勤者實際決策之出發時間加以比較，其符合與否之比較基準乃利用出發時間變換門檻檢視該出發時間之差距(ΔDT)屬於「未變換」或「變換」之隸屬度，若「未變換」之隸屬度較高，則表示兩出發時間屬於同一出發時間方案中；而根據趙祖佑^[25]第一階段資料分析結果，此變換門檻為 5 分鐘，因此當推論結果與實際決策差距在 5 分鐘內，則模式推論符合。

而出發時間認知分類函數則是以每位受訪通勤者個人出發時間範圍為基礎，找出此人在 20 天中最早與最晚之出發時間，以均等方式加以劃分各分類函數，以進行推論。

2. 在路徑決策比較部分：

路徑選擇行為之實證為經過近似推論之處理，模式輸出為各替選方案路徑之偏好程度(attractiveness)，介於 0~1.0 之間，值愈高表示偏好度愈高。因此將兩條路線之偏好度加以比較，偏好度較高的路徑即是本模式所推論出來之結果(如路徑 1 偏好度為 0.6578、路徑 2 偏好度為 0.3561，則本模式即認為通勤者會選擇路徑 1)，而若偏好度相同，即表示兩路徑都有可能被選擇。

另在路徑變換行為方面，經過推論後之結果為原先使用路徑之變換傾向，本研究則將此結果對應至路徑變換傾向模糊認知函數中，檢驗其位於何項變換分類集合中，具有較高之隸屬度則為該認知；如變換傾向為 0.6756，在「可能會變換原來之路徑」之隸屬度高於「不一定」，則模式結果為「可能會變換原有之路徑」；而若實際受訪通勤者之決策的確變換其原有之路徑，則模式之推論符合。

因此針對決策模式(一)、(二)、(六)實證比較結果分述如下：

1. 決策行為模式(一)：

此模型實證分析樣本為完全資訊之兩替選路徑皆預測之樣本通勤者，其決策行為是先進行出發時間選擇決策，而後根據已決定之出發時間，預測可能的旅行時間與延

滯時間，以作為後續路徑選擇決策之參考，其中包含出發時間選擇模式 I 與路徑選擇模式 I。

決策行為模型(一)之實證結果如表 2 所示；結果顯示，在出發時間選擇模式 I 部分，除區段 1 有較小之符合度，其餘區段之符合度皆在六成左右，而總樣本之符合度為 60.28%；而其中區段 1 由於旅行距離較長，因此出發時間選擇集合範圍較大導致模式誤差加大。

而在路徑選擇模式 I 部分，除區段 2 無樣本外，各區段之符合程度皆有 70%以上，而總樣本之符合程度亦達 76.96%，此表示本模式具有相當程度之適用性。

表 2 決策行為模式(一)符合程度表

	出發時間選擇模式 I	路徑選擇模式 I	Total
區段 1	44.74%	75.96%	62.78%
區段 2	無對應樣本	無對應樣本	—
區段 3	96.55%	72.34%	81.58%
區段 4	58.82%	70.0%	64.86%
區段 5	68.42%	100%	84.62%
Total	60.28%	76.96%	69.88%

2. 決策行為模式(二)：

此模型實證分析樣本為有限資訊之樣本通勤者，其決策行為是先進行出發時間選擇決策，而後依據已決定之出發時間，預測可能之旅行時間與延滯時間，作為後續路徑變換決策之參考，而其中包含出發時間選擇模式 I 與路徑變換模式 I。

決策行為模型(二)之實證結果如表 3 所示；在出發時間選擇模式 I 部分，同樣在區段 1 與區段 2 之符合程度較低，在六成左右外，其餘區段之符合比率皆在 70%以上；此結果亦可印證當通勤距離較長則有出發時間範圍較大之現象，而此將影響出發時間模式之實證能力。

而在路徑變換模式 I 部分，模式推論結果與實際決策結果符合之百分比皆在七成以上，總樣本符合程度亦有 80.95%；由此可看出本推論模式在路徑變換行為之說明具有相當程度之效果。

3. 決策行為模型(六)：

此實證分析樣本為完全資訊之僅預測選定路徑之樣本通勤者，其決策行為是先進行路徑變換決策，而後依據已選定之路徑，預測該路徑可能的旅行時間，作為後續出

發時間選擇決策之參考，而其中包含路徑變換模式 II 與出發時間選擇模式 III。

表 3 決策行為模型(二)之符合程度表

	出發時間選擇模式 I	路徑變換模式 I	Total
區段 1	61.70%	72.34%	67.02%
區段 2	62.37%	78.26%	70.65%
區段 3	70.21%	82.98%	76.60%
區段 4	84.27%	86.36%	85.23%
區段 5	70.37%	85.11%	77.66%
Total	69.70%	80.95%	75.32%

實證結果如表 4 所示；在路徑變換模式 II 部分，除區段 2 外皆達到七成，而總樣本符合程度為 79.23%；由此可看出，此推論模式在路徑變換行為之說明具有相當程度之效果。

而在出發時間選擇模式 III 部分，模式推論結果與實際決策結果之符合度大約有七成或七成以上，總樣本符合度為 77.23%；而由此也可看出，出發時間選擇模式 III 之總樣本符合度高於出發時間選擇模式 III，亦即以今日預估之交通狀況作參考之選擇模式對於出發時間選擇行為之說明較佳於以昨日通勤績效之選擇模式。

表 4 決策行為模型(六)之符合程度表

	路徑變換模式 II	出發時間選擇模式 III	Total
區段 1	74.84%	69.29%	72.34%
區段 2	67.27%	76.77%	71.88%
區段 3	76.27%	81.08%	78.60%
區段 4	89.52%	69.84%	79.60%
區段 5	91.49%	91.74%	91.60%
Total	79.23%	77.23%	78.29%

六、結論與建議

6.1 結論

本研究期望透過模糊近似推論之應用，對於通勤決策所面臨之模糊決策環境加以了解，解釋通勤過程中之不確定性，並構建適當的通勤決策行為模式。而根據各章之研究成果進行彙整可得下列重要結論：

1. 通勤者出發時間與路徑推論模式之構建

本研究利用系統化方式分析通勤者決策行為層級，並將決策行為劃分為六個模型，以建立出發時間與路徑決策維度之先後關係以及各決策行為之考慮屬性；並利用近似模糊推論為基礎，構建各通勤推論決策模式，其中包括屬性考量、模式輸入與決策推論規則，利用一程序性方式藉以描述人類邏輯方式處理通勤決策過程中所產生之模糊行為。

2. 通勤者出發時間與路徑推論模式實證分析

在模式實證部分，本研究結合模糊控制與近似推論方式對各通勤決策行為模式進行實證分析，而實證資料則利用控制實驗中所取得樣本通勤者屬性認知與預估行為，作為模式之輸入進行推論，再將推論結果與實際決策進行比較。

結果顯示利用推論模式之結果對於實際決策行為有相當程度之符合，因此透過推論模式來描述通勤決策過程中之模糊性為一可行之方式。在未來行為預測方面，即可透過先前蒐集通勤者屬性認知模糊型態，並利用本研究所構建之模式預測通勤者所選擇之出發時間與行駛路徑。

6.2 建議

1. 途中決策問題

本研究主要探討行前決策為主，然而駕駛者通勤過程中，會受到即時交通環境影響，可能會變換先前使用之路徑，後續研究可將本研究所構建之模式應用在途中決策問題中。

2. 隸屬函數型態之探討

由於本研究為首次利用模糊推論在通勤者決策行為研究中，對於決策屬性與語意偏好認知隸屬函數型態，乃利用常用之線性三角形與梯形函數作為構建準則，且目前一般模糊推論模式皆利用線性函數進行模式構建，若採用之函數型態擴展至非線性時，所需計算負荷將大幅增加，而後續研究可針對最適隸屬函數型態進一步探討。

3. 程序性模式之鬆弛

在通勤行為中，具有多維度決策之特性，本研究在研究範例中對於出發時間與路徑兩決策維度是以程序性方式處理，而未來可嘗試將程序性模式加以鬆弛，此方向可利用 Grivas and Shen^[34] 中以模糊圖(fuzzy graph)結合模糊關係矩陣(fuzzy relation matrix)，構建不同維度之間決策屬性的交互關係來加以處理。

4. 動態通勤推論模式之構建

通勤決策為一動態過程問題，其中牽涉到動態認知與學習之回饋機制與過程，本

研究初步以通勤者前一日決策績效對於今日決策之影響加以反映與處理。然而更複雜之動態機制研究已由張禎誼延續本研究所構建之模式架構做進一步之探討^[35]。

5. 實地調查之可行性

本研究為首次應用模糊推論方式構建通勤旅運行為模式，因此採用控制實驗以簡化交通環境之複雜度以及控制影響變因，經過本研究證明此為一可行方式；而在未來可嘗試利用真實通勤者在真實的通勤環境下進行決策行為調查與模式構建。

參考文獻

1. 董啟崇、趙祖佑，「通勤者決策行為模糊特性分析」，運輸學刊，第十四卷，第一期，民國九十一年三月，頁 19-50。
2. Zadeh, L., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3, 1973, pp. 28-44
3. Mamdani, E. and Assilian, S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, 1975, pp. 1-13.
4. Pappis, C. and Mamdani, E., "A Fuzzy Controller for a Traffic Junction", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-7, 1977, pp. 707-717.
5. Nakatsuyama, M., Nagahashi, N., and Nishizuka, N., "Fuzzy Logic Phase Controller for Traffic Functions in the One-way Arterial Road", *Proceedings IFAC 9th Triennial World Congress*, 1983, pp. 2865-2870.
6. Sasaki, T. and Akiyama, T., "Traffic Control Process of Expressway by Fuzzy Logic", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 26, pp. 165-178.
7. Chen, L., May, A., and Auslander, D., "Freeway Ramp Control Using Fuzzy Set Theory for Inexact Reasoning", *Transportation Research*, Vol. 24A, 1990, pp. 15-25.
8. Chiu, S., "Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic", *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, 1992, pp. 98-107.
9. Chang, Y. H. and Shyu, T. H., "Traffic Signal Installation by the Expert System Using Fuzzy Set Theory for Inexact Reasoning", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 17, 1993, pp. 191-202.
10. Sayers, T. and Bell, M. H. G., "Traffic Responsive Signal Control Using Fuzzy Logic—A Practical Modular Approach", *Proceedings of the 4th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing*, 1996, pp. 2159-2163.

11. Kikuchi, S. and Chakroborty, P., "Car-following Model Based on Fuzzy Inference System", *Transportation Research Record*, Vol. 1365, 1993, pp. 82-91.
12. 藍武王、王日昌、江勁毅，「模糊控制跟車模式之探討」，運輸，第二十五期，民國八十三年，頁 43-55。
13. Kikuchi, S. and Riegner, J. R., "Methodology to Analyze Driver Decision Environment During Signal Change Intervals: Application of Fuzzy Set Theory", *Transportation Research Record*, Vol. 1368, 1994, pp. 49-57.
14. Kikuchi, S., Perincherry, V., Chakroborty, P., and Takashi, H., "Modeling of Driver Anxiety During Signal Change Interval", *Transportation Research Record*, Vol. 1399, 1995, pp. 27-35.
15. Kalic, M. and Teodorovic, D., "A Soft Computing Approach to Trip Generation Modeling", Proceedings of the 9th EURO Conference Fuzzy Sets in Traffic and Transport Systems, 1997.
16. Kalic, M. and Teodorovic, D., "Trip Distribution Modeling Using Soft Computing Techniques", Proceedings of the 34th INFORMS, 1997.
17. Xu, W. and Chan, Y., "Estimation an Origin-destination Matrix with Fuzzy Weights, Part 1: Methodology", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 17, 1993, pp. 127-144.
18. Akitama, T. and Shao, C. F., "Fuzzy Mathematical Programming for Traffic Safety Planning on an Urban Expressway", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 17, 1993, pp. 179-189.
19. 陳惠國、張美香，「模糊路徑資訊之交通路網流量問題探討」，運輸，第二十五期，民國八十三年，頁 43-55。
20. Teodorovic, D., and Kikuchi, S., "Transportation Route Choice Model Using Fuzzy Inference Technique", Proceedings of the First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, University of Maryland College Park, 1990, pp. 140-145.
21. Lotan, T. and Koutsopoulos, H. N., "Models for Route Choice Behavior in the Presence of Information Using Concepts from Fuzzy Set Theory and Approximate Reasoning", *Transportation*, Vol. 20, 1993, pp. 129-155.
22. Vythoulkas, P. C. and Koutsopoulos, H. N., "Modeling Discrete Choice Behavior Using Concepts from Fuzzy Set Theory, Approximate Reasoning and Neural Networks", Research Report TSU 817, ESRC Transport Studies Unit, University of Oxford, Oxford, 1994.
23. Teodorovic, D. and Kalic, M., "A Fuzzy Route Choice Model for Air Transportation Networks", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 19, 1995, pp. 109-119.

24. Akiyama, T. and Tsuboi, H., “Description of Route Choice Behavior by Multi-stage Fuzzy Reasoning”, Proceeding of Highways to the Next Century Conference, Hong Kong, 1996.
25. 趙祖佑, 「模糊理論應用於通勤駕駛者出發時間與路徑決策行為之研究」, 淡江大學運輸科學研究所碩士論文, 民國八十七年六月。
26. Mahmassani, H. S. and Stephan, D. G., “Experimental Investigation of Route and Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters”, *Transportation Research Record*, Vol. 1203, 1989, pp. 69-84.
27. Tong, C. C., “A Study of Dynamic Departure Time and Route Choice Behavior of Urban Commuters”, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 1990.
28. Simon, H., “A Behavioral Model of Rational Choice”, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 69, 1955, pp. 99-118.
29. 廖曉萍, 「自小客車通勤者出發時間與路徑選擇動態行為之研究」, 淡江大學土木工程研究所碩士論文, 民國八十五年六月。
30. Mahmassani, H. S. and Tong, C. C., “Availability of Information and Dynamics of Departure Time Choice: Experimental Investigation”, *Transportation Research Record*, Vol. 1085, 1986, pp. 33-49.
31. Horowitz, A. J., “The Subjective Value of the Time Spent in Travel”, *Transportation Research*, Vol. 12, 1978, pp. 385-393.
32. Hendrickson, C. and Plank, E., “The Flexibility of Departure Times for Work Trips”, *Transportation Research*, Vol. 18A, No. 1, 1984, pp. 25-36.
33. Gang-Len Chang, Hani. S. Mahmassani, Rober Herman, “Macroparticle Traffic Simulation Model to Investigate Peak-period Commuter Decision Dynamics”, *Transportation Research Record*, Vol. 1005, 1985, pp. 107-121.
34. Grivas, D. A. and Shen, Y. C., “Use of Fuzzy Relation to Manage Decisions in Preserving Civil Infrastructure”, *Transportation Research Record*, Vol. 1497, 1995, pp. 10-18.
35. 張禎誼, 「模糊理論應用於逐日動態通勤行為之研究」, 淡江大學運輸科學研究所碩士論文, 民國八十七年六月。

