

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫二：動態交通量指派(II)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC94-2218-E-009-016-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學運輸科技與管理學系(所)

計畫主持人：黃寬丞

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

以車流模型為基礎之交通動態預測技術平台開發-子計畫

二：動態交通量指派(II)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2218-E-009-016

執行期間：94年8月1日至95年7月31日

計畫主持人：黃寬丞

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：交通大學運輸科技與管理學系

中華民國 95年 10月 30日

中文摘要

本計畫延續前一年度的理論架構，基於「追求最小旅行時間行為假設」，及過去研究中曾實際被觀察到的通勤性用路人「逐日學習與適應的旅運決策行為假設 (day-to-day learning and adaptive behavioral assumption)」，在逐日的時間架構下(day-to-day timeframe)提出「動態行前路網流量演變模式」，模式的運作機制主要在於兩個變數，路徑流量(用路人行為，需求面)與旅次起訖點間的預測最小旅行時間(predictive minimal travel time of an origin-destination pair，管理者行為，供給面)，與這兩個行為的逐日學習演變函數(day-to-day learning and adaptive function)。

本研究以動態系統方法(dynamical system approach)構建這個理論的數學模式，由模式的穩態(steady state)分析發現，這個數學模式的均衡解(equilibrium solution)滿足Wardrop使用者均衡(user equilibrium)的原則。經由微分方程理論的基本定理(the fundamental theorem of differential equations)，本研究提出一個輔助定理(Lipschitz lemma)證明這個數學模式滿足微分方程的基本定理，進而確認其解的存在性與唯一性(existence and uniqueness)。本研究同時也應用Lyapunov穩定性定理(Lyapunov stability theorem)，證明這個數學模式的均衡解是漸進穩定的(asymptotic stable)。

關鍵詞：逐日演變、學習與適應性行為、動態交通量指派、Lyapunov 穩定性、存在性與唯一性

Abstract

Based on the theoretical framework proposed in previous year, a pre-trip network flow model is formulated to capture its daily evolution with the behavioral assumption of learning and adaptive process. The key-variables are path flow (user side) and predictive minimal travel time of an origin-destination pair (operator side). The model encapsulates a day-to-day learning and adaptive function to characterize these two variables and their interdependence.

In addition, the author constructs a mathematical model for the theory by using dynamical system approach. The steady state of the model satisfies the Wardrop's user equilibrium. The analysis of existence and uniqueness is also derived by the Lipschitz lemma and the fundamental theorem of differential equations. Finally, a strict Lyapunov function is established to give the asymptotic stability for the equilibrium solution of the proposed model in the sense of Lyapunov stable.

Key words: day-to-day evolution, learning and adaptive behavioral process, dynamic traffic assignment, Lyapunov stability, existence and uniqueness

壹、前言

智慧型運輸系統(Intelligent Transportation Systems, ITS)是目前先進國家為改善交通擁擠與安全問題所大力支持與投入的領域，在運輸研究領域裡ITS 亦須以動態的方法論來建立方法論與模式，是近十年來相當重要的主流研究領域，因此，本計畫不管是在實務應用或理論研究角度，均具有其具體目的與時代背景。其中動態交通量指派更是這個研究領域最被廣為探討的課題之一，動態交通量指派也是預測旅運資訊的主要機制，動態旅次起訖(子計畫1)可以作為動態交通量指派的輸入，動態旅次起訖亦可以接收交通量指派的結果，同時進行動態旅次起訖(子計畫1)與動態交通量指派結果的互動，此外，在動態交通量指派模式中，必須藉由動態車流理論(子計畫2 與子計畫4)計算旅運成本，藉以掌握車流在路網中的時空移動，因此整個系統是相互影響且具有互動的關係。

貳、研究目的

本計畫的目的(第二年)除了持續有關逐日動態交通量指派的文獻回顧，了解傳統動態交通量指派的旅運行為理論基礎及其發展現況之外，主要為延續前一年度的理論架構，基於「追求最小旅行時間行為假設」，及過去研究中曾實際被觀察到的通勤性用路人「逐日學習與適應的旅運決策行為假設(day-to-day learning and adaptive behavioral assumption)」，在逐日的時間架構下(day-to-day timeframe)提出「動態行前路網流量演變模式」。

叁、文獻探討

本計畫(第二年)著重於有關逐日動態交通量指派的文獻回顧。Smith (1979) 針對使用者均衡 (Wardrop, 1952) 提出一個新的概念，他認為用路人每天可能會依循與前一天相同的路徑，然而如果用路人決定更改路徑，他必定會選擇一條路徑成本比他當日實際行走的路徑更低者。這個觀念是以「逐日」的演變為時間分析維度，而且隱含逐日「學習與適應演變」的行為架構，這是目前學術研究文獻上最早提出有關「逐日」交通量演變的觀念。

Chang and Mahmassani's (1988), Mahmassani, Chang, and Herman (1986), Mahmassani(1990)等一系列研究，以模擬指派的方式實際觀察一百位通勤性的私人運具用路人每日的旅運決策行為，實驗觀察結果顯示用路人經由旅運資訊提供，其逐日的旅運決策確實存在「學習與適應」的特質。這些研究成果陸續於ITS 的應用過程中發展軟體、評估方案績效等等，例如Mahmassani and Peeta (1993), Jayakrishnan et al. (1994), Hu and Mahmassani (1995, 1997), Jha et al. (1998)。此外，Mahmassani (2001) 將此方法論作一完整回顧，並介紹著名的軟體DYNASMART 已發展成具備ITS 應用的先進交通管理軟體。

這個以「模擬」為基礎的研究領域最近仍持續有新的研究成果提出，Srinivasan and Mahmassani (2003) 以互動式模擬實驗(interactive simulator experiments)取得用路人路徑轉換行為的資料，經由dynamic kernel logit(DKL)的架構模化此動態路徑轉換行為(route-switching dynamics)，模化的重點在於描述「在ATIS情境下，動態路徑轉換行為如何受「不可觀察」因素的影響(unobserved effects)」作者提出以變異組成的方式(a

components of variance scheme)來模化「不可觀察因素(error-terms)」之間在時間架構上(both within-day and day-to-day time frames)的相關性(correlation)。實驗結果顯示：可觀察的顯著影響因素有即時資訊(real-time information)的及時性(timeliness)、內容(nature)、範圍(extent)與資訊品質(quality)，此外還有替代路徑的服務水準屬性與用路人的經驗(prior traffic experience)。「不可觀察因素(error-terms)」的影響明顯的出現在路徑轉換行為上的異質性(heterogeneity)，作者認為「經驗變數(experience variables)」與「不可觀察因素(un-observables)的相關性」在統計上的顯著性(significance)，正顯示用路人的行為在ATIS情境下具有動態適應與學習(dynamic learning and adjustment)的能力。

Peeta and Yu (2006) 以追求一致性行為 (behavior-based consistency-seeking)建立DTA模式，並應用於資訊提供情境下的即時交通控制 (real-time traffic control)，這個模式是隨機性的 (probabilistic-possibilistic)，且同時考慮「逐日」與「日內」兩種時間架構下的行為演變，此外作者以模糊邏輯與if-then法則來模化具異質性之駕駛者(heterogeneous driver classes)。逐日行為演變機制主要係透過經驗累積以更新模式參數，日內行為則依駕駛者所面臨的情況來改變if-then法則中的行為反應權重，這個調整機制可以確保駕駛者的反應行為與即時交通偵測狀況一致。本研究以模擬實驗方式來測試其具有可應用於即時性路網的效率性。

在解析方法部分則有Friesz et al. (1994)則將Smith (1979)與Mahmassani 系列研究的交通量逐日演變行為，導入個體經濟學中的tatonnement process，並藉以模式化為一個動態系統(dynamical system)，

經由一些變分不等式(variability inequality)與固定點(fixed point)理論性質，可以證明這個動態系統的均衡解滿足使用者均衡(Wardrop 1952)，並引用Lyapunov 的穩定性定理證明該均衡解是漸進穩定的(asymptotic stable)。這個研究有兩個主要的缺點，第一：其模式的演變機制與路徑的擁擠程度無關；第二：這個動態系統解的存在性與唯一性(existence and uniqueness)尚未得到證明。Hwang (2004)與Cho and Hwang (2005a)依循Smith (1979)與Mahmassani 系列研究的交通量逐日演變行為假設，建立一個新的常微分方程組的連續性動態系統，除了改善Friesz et al. (1994)的兩個缺點之外，這個系列研究並針對異質性用路人(multi-class users)以及不同資訊提供策略兩種情境進行解析性(analytical)的分析。Cho and Hwang (2005b)及Cho, Hwang and Chiu (2004)在相同的逐日「學習與適應演變」的行為架構下導入刺激反應模式(stimulus-response model)，並特別考慮不連續反應(discontinuous response)下的均衡解性質，據以提出更一般性的Quasi User Equilibrium(QUE)觀念與定義，並證明QUE 包含Wardrop's User Equilibrium 之條件。Hwang and Cho (2006a) 證明了QUE的穩定性，這個方法不需要單調(monotone)成本函數的限制(尚未發表，NSC 94-2415-H-424-001)。

在動態交通指派領域較新的研究成果有，Zhang et al. (2001) 提出一個「逐日的穩定路段流量(day-to-day stationary link flow pattern)」與「路網均衡流量(traffic network equilibrium)」同義(equivalent)的推論(conjecture)，這個推論的證明過程並沒有對路段旅行時間函數做任何限制條件，並考量三種成本導向的路徑選擇機制(cost-responsive route choice mechanism)，且適用於靜態(static)與動態(dynamic)運輸路網。根據這個推論作者建議：「在ITS的應用中，路網流量的監控與分析是可以在路段(link)

的基礎上進行的(不必以路徑(path)為分析基礎)」。

Hazelton (2002) 在逐日演變的時間架構下(day-to-day volatility)，以反應係數(the coefficient of reactivity, a new analytical tool)描述具有學習機制(learning mechanisms)的旅運行為，並據以建立Markovian交通量指派模式。這個方法可依旅運行為變化的程度(例如：流量的變化)，分析其反應的原因，例如：依「逐日流量演變的程度」來分辨此現象係由於用路人因旅行時間改變所造成，或僅只是偶發性的變動現象。由反應係數所建立的Markovian交通量指派模式，其漸近行為(asymptotic form)很容易分析，在理論分析上有其優點。

Huang and Lam (2002) 針對路徑與出發時間均衡交通指派問題(simultaneous route and departure time choice equilibrium assignment)，以離散時間架構(discrete-time basis)將其模化為一個同義的「零極值」最小化問題(equivalent zero-extreme value minimization problem)，並以先進先出(FIFO)原則描述路口流車的等候(queueing)行為。作者在逐日(day-to-day)時間架構下，以模擬路徑/出發時間改變的路網動態系統的方式，提出此問題的啟發式演算法(heuristic algorithm)，經由這樣的方法可以得到此最小化問題的極值解(an extreme point)。此外，還討論了離散時間動態均衡解的存在性(existence)與演算法的穩定性(stability，非解的穩定性)。

Mounce (2006) 提出一個DTA模式，它的路段旅行時間函數(link cost function)考慮了確定性的車輛等候行為(deterministic queueing)，車輛等候行為假設發生在接近路段的終點處，旅次起迄需求則為給定(given OD demand)，在時間維度上則包括「日內(within-day)」與「逐日(day-to-day)」兩種依時性(time-varying)變數。在「日內」的時間架構(time-frame)中，

以一個非負有界的連續函數(non-negative bounded continuous function)描述車流(flow)在起迄路徑(route)間的傳導(propagation)。在「逐日」時間架構也是以連續函數的方式來描述(approximate)，但是整個逐日動態系統(day-to-day dynamical system)是在使用者均衡(user equilibrium)行為假設下導出。此外，在單一路徑上僅有一個瓶頸點(bottleneck)的假設下，作者證明路徑成本(route cost)是路徑流量(route flow)的單調函數(monotone function)，動態系統也在這個性質下，證明其逐日演變行為收斂於均衡狀態(global convergence to equilibrium)。

這部份的研究成果顯現，逐日與日內的動態交通量指派問題已經趨向於同時考量，車流動態性已逐漸能被解析模型處理，但是這類模型仍然以均衡解為模式構建的重點，並且尚未考量資訊提供與旅運決策間的互動行為，這將會降低其在ITS的可應用性。

肆、研究方法與成果

本研究在逐日的時間架構下(day-to-day timeframe)提出「動態行前路網流量演變模式」，基於「追求最小旅行時間行為假設」，及通勤性用路人「逐日學習與適應的旅運決策行為假設(day-to-day learning and adaptive behavioral assumption)」，構建「路徑流量演變模式」與「預測最小旅行時間演變模式」。變數是定義在每日尖峰時段的總計(Aggregate)變化量，但為了進一步分析尖峰時段內因出發時間移轉(departure time shift)的影響效果，本研究將尖峰時段(例如：一小時)細分為若干個時區(例如：10分鐘)，因此，所有的變數或變量均定義在「時區」上。以下先摘要說明變數定義與註標意義。

- t 時區的指標， $t = \{1, 2, \dots, \bar{t}\}$ ；
 t_d 每日的時間指標；
 w 旅次起迄的指標， $w = \{1, 2, \dots, \bar{W}\}$ ，所有旅次起迄對的集合為 W ， $|W| = \bar{W}$ ；
 p 路徑的指標， $p = \{1, 2, \dots, \bar{P}\}$ ，所有路徑的集合為 P ， $|P| = \bar{P}$ ；
 P_w 所有屬於旅次起迄 w 的路徑所形成的集合；
 $h_p^t(t_d)$ t 時區第 t_d 日路徑 p 的流量；
 $f_a^t(t_d)$ t 時區第 t_d 日路段 a 的流量， $f_a^t(t_d) = \sum_p \delta_{ap} h_p^t(t_d)$ ，路段 a 屬於路徑 p 則 $\delta_{ap} = 1$ 否則為 0；
 $c_a(\cdot)$ 路段 a 的成本函數，則在 t 時區第 t_d 日路段 a 的旅行時間為 $c_a^t(f_a^t(t_d))$ ；
 $\hat{c}_p^t(t_d)$ t 時區第 t_d 日路徑 p 的旅行時間， $\hat{c}_p^t(t_d) = \sum_a \delta_{ap} c_a^t(f_a^t(t_d))$ ；
 $\tilde{c}_w^t(t_d)$ ATIS 在 t 時區第 t_d 日旅次起迄 w 的預估最小旅行時間；
 $T_w^t(\cdot)$ t 時區旅次起迄 w 的需求函數；

本研究對於 t 時區第 t_d 日路徑 p 的路徑流量演變模式表示如式 (1)，

$$\frac{dh_p^t(t_d)}{dt_d} = \alpha h_p^t(t_d) \times (\hat{c}_p^t(t_d) - \tilde{c}_w^t(t_d)) \quad (1)$$

其中，

$$|\alpha| \leq \frac{1}{\sup_{\forall w, p \in P_w, t, t_d} |\hat{c}_p^t(t_d) - \tilde{c}_w^t(t_d)|} \quad (2)$$

不等式 (2) 可維持 $h_p^t(t_d)$ 的非負性。(1) 的行為意義在於當旅行時間與提供的預測資訊產生差異時，用路人會學習這個經驗並反應在次日的旅運決策進而造成路徑流量的改變，此亦為逐日學習演變函數的作用機制。在 t 時區第 t_d 日旅次起迄 w 的預測最小旅行時間演變模式可如式 (3)，

$$\frac{d\tilde{c}_w^t(t_d)}{dt_d} = \beta^t \times \left(T_w^t(t_d) - \sum_{p \in P_w} h_p^t(t_d) \right) \quad (3)$$

其中，

$$0 < \beta^t \leq \frac{1}{\sup_{\forall w, t, t_d} \left| T_w^t(t_d) - \sum_{p \in P_w} h_p^t(t_d) \right|} \quad (4)$$

不等式 (4) 可維持 $\tilde{c}_w^t(t_d)$ 的非負性。(3) 的行為意義在於當旅次起迄需求與實際路徑流量總合(旅次起迄 w) 產生差異時，管理者會學習這個經驗

並反應在次日的最小旅行時間預測，此為管理單位(預測資訊提供者)逐日學習演變函數的作用機制。這兩個模化過程並沒有規範系統演變過程與均衡流量狀態之間的必然性，只著重於系統變數與資訊提供之間的互動行為。然而，經由系統均衡解的性質分析，本研究發現均衡解滿足Wardrop (1952) 使用者均衡原則，但有所差異的是，此時的均衡流量是定義在一個時區內相同起訖點之間的路徑上。

此外，本研究也證明了此動態系統(常微分系統方程式)解的存在性與唯一性。並藉由Lyapunov 定理(Alligood et al. 1997)，證明均衡解(equilibrium solution)的漸近穩定性(asymptotic stable)，詳細內容已整理於Hwang and Cho (2006b, working paper)。

伍、自我評量

本研究成果(Hwang and Cho, 2006)提出一個新的理論描述在資訊提供情境下，旅運決策與資訊提供的逐日學習演變行為，並據以模化「路徑流量」與「預測最小旅行時間」逐日演變模式。由均衡解的特性發現，此與傳統的DTA均衡解相同，但兩種研究方法所依據的行為決策機制與運作情境卻是截然不同的，此外，本研究具備描述路網流量逐日變化的能力，而傳統的DTA則只能求得在路網達到均衡時的單一解，這在ITS情境下的應用是有顯著差異的。這是本研究與傳統DTA方法的主要差異，也是本研究的創新貢獻所在，研究成果亦將在適度微調後投稿。

陸、參考文獻

- Alligood, K. T., Sauser, T. D., and Yorke, J. A., *Chaos : An Introduction to Dynamical Systems*, Springer-Verlag, New York, 1997.
- Chang, G. L. and Mahmassani, H. S., "Travel time prediction and departure time adjustment behavior dynamics in a congested traffic system," *Transportation Research Part B*, Vol. 22, pp.217-232, 1988.
- Cho, H.-J. and Hwang, M.-C., "Day-to-day vehicular flow dynamics in intelligent transportation network", *Mathematical and Computer Modelling* (Accepted), 2004a.
- Cho, H.-J. and Hwang, M.-C., "A stimulus-response model of day-to-day network dynamics", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (Accepted), 2004b.
- Friesz, T. L., Bernstein, D., Mehta, N. J., Tobin, R. L., and Ganjalizadeh, S., "Day-to-day dynamic network disequilibria and idealized traveler information systems," *Operations Research*, Vol. 42, pp.1120-1136, 1994.
- Hazelton, M. L., "Day-to-day variation in Markovian traffic assignment models," *Transportation Research Part B*, Vol. 36, pp.637-648, 2002.
- Hu, T. Y. and Mahmassani, H. S., "Evolution of Network Flows under Real-Time Information: A Day-to-Day Dynamic Simulation-Assignment Framework," *Transport. Research Record* 1493, pp.46-56, 1995.
- Hu, T. Y. and Mahmassani, H. S., "Evolution of Network Flows Under Real-Time Information and Responsive Signal Control Systems," *Transportation Research Part C*, Vol. 5, pp.51-69, 1997.
- Hwang, M.-C., "Day-to-day Network Flow Evolution under Intelligent Transportation Systems," Ph. D. dissertation, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, Republic of China, April 2004.
- Hwang, M.-C., and Cho, H.-J., "Modeling the threshold effect of path flow adjustment on day-to-day network flow evolutions under the scenario of ITS services," working paper, 2006a.
- Hwang, M.-C., and Cho, H.-J., "Evolutions of route choice and department time in Intelligent Transportation Network," working paper, 2006b.
- Mahmassani, H. S., Chang, G. L., and Herman, R., "Individual decisions and collective effects in a simulated traffic system," *Transportation Science*, Vol. 20, pp.258-271, 1986.
- Mahmassani, H. S., "Dynamic models of commuter behavior : experimental investigation and application to the analysis of planned traffic disruptions," *Transportation Research Part A*, Vol. 24, pp.465-484, 1990.
- Mounce, R., "Convergence in a continuous dynamic queueing model for traffic networks," *Transportation Research Part B*, Vol. 40, pp.779-791, 2006.
- Peeta, S. and Yu, J. W., "Behavior-based consistency-seeking models as deployment alternatives to dynamic traffic assignment models," *Transportation Research Part C*, Vol. 14, pp.114-138, 2006.
- Smith, M.J., "The stability of a dynamic model of traffic assignment - an application of a method of Lyapunov," *Transportation Science*, Vol. 18, pp.245-252, 1984.
- Srinivasan, K. K., and Mahmassani, H. S., "Analyzing heterogeneity and unobserved structural effects in route-switching behavior under ATIS: a dynamic kernel logit formulation," *Transportation Research Part B*, Vol. 37, pp.793-814, 2003.
- Watling, D., "A stochastic process model of day-to-day traffic assignment and information," in: Emmerink, R. and Nijkamp, P. ed., *Behavioural and Network Impacts of Driver Information Systems*, Ashgate Publishing Ltd., pp.115-139, 1999b.
- Wardrop, J. G., "Some theoretical aspects of road traffic research," *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II*, pp.325-378, 1952.
- Zhang, D., Nagurney, A., and Wu, J., "On the equivalence between stationary link flow patterns and traffic network equilibria," *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp.731-748, 2001.