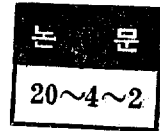


교통신호의 自動最適制御에 관한 연구

Automatic Optimum Control of the Traffic Signal Lights



양 흥 석* 김 호 윤**
(Heung Suk Yang, Ho Yoon Kim)

[ABSTRACT]

The electrical detector and computer systems for traffic flow and speed measurement are demonstrated in this paper. For the best traffic control optimization, linear and non-linear equations in the transition state are dealing with the perturbation of the linear car-following. In the conclusions, we construct a realizable system for the central automatic traffic control with a computer. Furthermore, fixed periodic switching system by manual with the automatic traffic control system is recommended for emergency perturbation.

1. 서 론

최단시간에 최대의 교통량을 안전, 신속, 정확하게 流通시키는 것을 전제로 하고서, 전기적인 조직계통과 아울러 전자계산기를 이용하여 교통량 自動檢知 및 車輛速度 自動測定에 관하여 논하고, 안전, 신속에 관하여는 특히 혼란상태(perturbation state)에서 첫째 앞 뒤 車輛, 둘째 line concentration 上에 존재하는 全車輛간의 간격(spacing) 및 속도(speed)에 관해 성립하는 여러 이론식은 물론 나아가서 교통의 自動制御에 관하여 고찰코져 한다.

2. 交通量 檢知 및 車輛速度測定

正常流通(steady state flow)시의 교통량과 Over Saturation (flow concentration)에 관한 대략의 information data가 얻어진 경우 전기적 System설치를 위한 最適地點이 선정되고 동시에 그 지점에 다음과 같은 시설을 하므로써 정확한 교통량, 운행속도를 측정하게 되고 나아가서 이 data를 적절히 이용할 때 Saturation flow로부터 오는 delay를 사전에 피할 수 있다. 교통량측정방법으로 두가지 단계로 생각하면, 그 하나는 車輛檢知器(Detector)로써 단순히 교통량만 측정하는 방법이 있고, 다른 하나는 Detection은 물론이며 아울러 Automatic Signal Control (Computer 연동장치)까지

접하여 이득을 함께 얻는 방법이 있다. Electrical system으로서는 ① 임피던스 브리지법(Impedance Bridge method, 電磁誘導檢知) ② 超音波式 檢知器(美, 日) ③ 도우프러 레이더법(Doppler Radar method) ④ 環線法(Loop method) ⑤ 고무파이프 (Rubber pipe)에 의한 壓縮空氣壓力檢知(Pari, London 시행) ⑥ 踏板에 의한 압력접촉檢知(美, Chicago, Detroit) ⑦ 光電管(photo tube)에 의한 光檢知 ⑧ Carbon file에 의한 압축저항 변화에 의한 檢知 ⑨ Strain gage에 의한 저항變化檢知 ⑩ FM에 의한 檢知 ⑪ TV檢知등을 들 수 있다. 이 System들의 설치방법에 관해서는 ③, ⑩, ⑪은 주로 路邊에 설치하고 그밖의 것은 대부분 직접 車道面에 매설하고 ⑤의 경우 路面에 노출할 경우도 있고 ⑦은 공중설치법도 있다. 이 중 TV에 의한 방식은 Central Control을 전제로 하는 경우 경제적으로 Cost가 많이 들고 시간적으로 신속성을 기대하기 어렵다. 대체로 Computer에 의한 Recording은 편리하며 이중 Impedance Bridge나 loop method(그림 1참고)는 지금까지 대체로 선진국에서 채택하고 있다. 특히 Loop method는 차량수에 의한 그의 Inductance 변화를 analogue적으로 측정하기도 하고(그림 2)와 같이 직접 Printing할 수도 있다.

多數車輛의 평균속도를 계산함에 앞서 個個 車輛의 속도를 미리 산출해야 하기 때문에 이를 위해서는(그림 1)에서 두 loop, 즉 AB간 Pulse의 duration幅에 의해서 측정되며 평균속도는 식 (2-1)이다.

* 정회원 : 서울공대 전기공학과 교수

** " " 단국대 공대 전자공학과 조교수

$$V_s = \frac{QD}{\sum t_i} \quad (2-1)$$

여기서 단 $\left\{ \begin{array}{l} V_s : \text{평균속도} \\ Q : \text{입의 시간내 통과 차량수} \\ t_i : \text{개개의 pulse 幅 시간} \\ D : \text{Loop 간격} \end{array} \right.$

차량속도측정에 관해서는 Radar의 발사波와 입사波를 이용한 Doppler method 및 앞서 논한 두 Loop 간 走行時間法을 택했는데, Doppler method는 Microwave이므로 약천후에는 효과를 얻지못한다. 또 超音波法은 풍속이 빠른 경우 (15m/s 이상)에 오차가 커져 실용성이 못된다. 다만 FM method를 Doppler 식과 유사 방식으로 이용하던 좋다.

3. 線型的 車輛追從에 있어서 混亂에 대한 安定

이들 논함에 앞서 Lighthill과 Whitham은 traffic

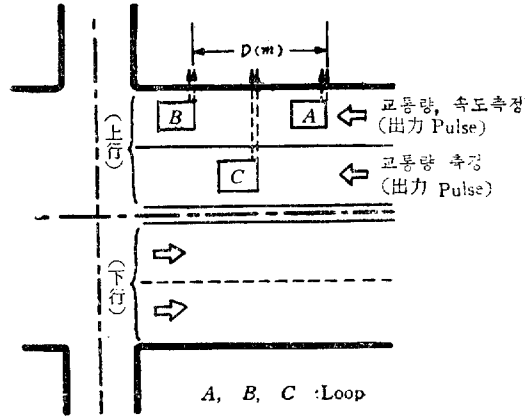


그림 1 路面에 있어서 環線檢知器
Fig. 1 Arrangement of the Loop Detector

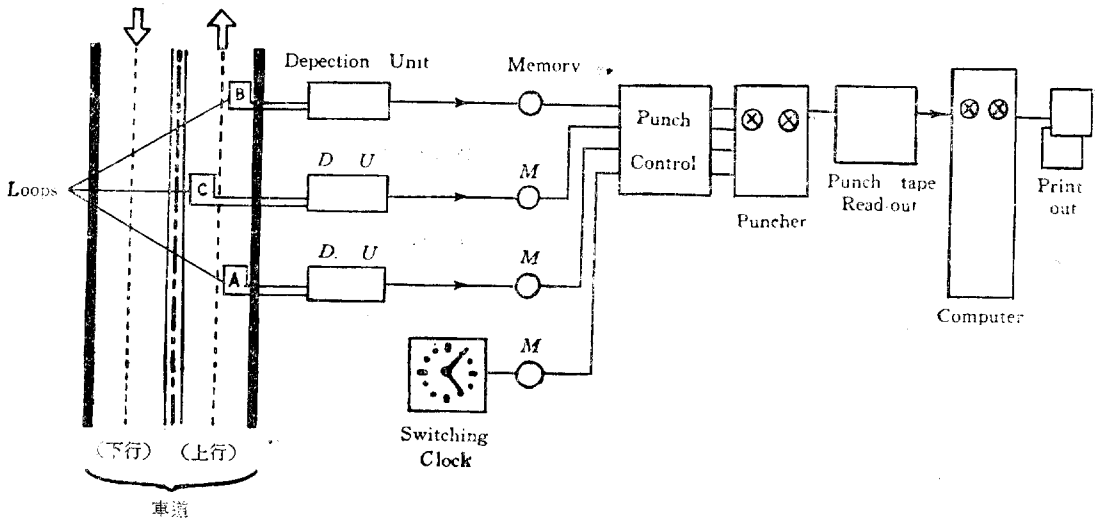


그림 2 檢知器와 記錄計算機
Fig. 2 Detector and Recording Computer

continuum을 논했고 Potts, Rothery 그리고 Denos C. Gazis는 driver가 그 주위로부터의 자극에 대한 반작용발생을 관계식으로 표시했는데 [식 (3-1)] 차량이 concentration 되었을 경우 특히 앞차와 뒷차 상호간에 있어서 성립하는 식 [Eq. (3-2)].

$$(\text{반작용, Reaction})t + T = \lambda(\text{자극, Stimulus})t \quad (3-1)$$

단 t : time T : reaction time lag

λ : sensitivity coefficient

특히 여기서 λ 는 driver에 의해 決定되는 일종의 non-linear coefficient로써 다음 Section 4에서 취급되겠

고 또 reaction은 driver control에 의거 acceleration으로 표현되어

$$\text{곧 } \frac{d^2 X_n(t+T)}{dt^2} \text{가 된다.}$$

따라서 소위 Car-following model로써

$$\frac{d^2 X_n(t+T)}{dt^2} = \lambda \left[\frac{dX_{n-1}(t)}{dt} - \frac{dX_n(t)}{dt} \right] \quad (3-2)$$

가 성립한다. 단 n : platoon에 있어서 Car의 Position number, λ : Const X_n : n'th Car Position 식 (3-2)는 perturbation stream에 對한 stability를 조사하는데 필요한 식이며, stability를 크게 두가지로 분류하여 설

평 할 수 있다.

즉 Local 과 asymptotic stability 로써,

1) Local Stability (Microscopic)

停止한 두차의 位置關係에 있어서 Stability 로써 Eq. (3-2)를 Laplace Transform 을 써서 푸는것으로 곧 얻어진 λT 값으로써 安定, 不安定을 판정하는 것이다.

(Case 1) $\lambda T \leq 1/e$: stable state 단 $e \approx 2.72$

(Case 2) $1/e < \lambda T \leq \pi/2$: unstable... 앞뒤차 Oscillate 곧 amplitude 를 감소시키는 振動이 된다.

(Case 3) $\lambda T > \pi/2$: Unstable ... Over-Compensation 으로 인하여 앞뒤차 Oscillate 곧 시간과 더불어 증가하는 振幅의 振動

2) Asymptotic Stability (Macroscopic)

수많은 車 대열의 속도에 있어서 Sinusoidal perturbation 을 생각하여 조사하는 것으로

(Case 1) $\lambda T > \frac{1}{2}$: Amplitude 증가

(Case 2) $\lambda T < \frac{1}{2}$: Amplitude 감소

더우기 platoon 상태에서 locally stable

하지만 Asymptotic stable 문제는 不安定 하게 되는 경우도 있다.

4. 狀態轉移에 있어서 線型과 非線型

State Transition 의 linear 와 non-linear 的 해석은 driver 의 sensitivity coefficient, λ 로써 설명하며,

$$\lambda = c \frac{\left[\frac{dx_n(t+T)}{dt} \right]^l}{[X_{n-1}(t) - X_n(t)]^m} \quad (4-1)$$

단, c : const (l, m) : integer exponent(특수해)

어떠한 安定상태로부터 약간의 Speed 와 Spacing 의 變化를 수반하는 상태까지 Transition 을 설명하려면 driver 의 Sensitivity 가 일정치 않은고로 non-linear 로 해석한다.

1) Boundary condition 을 고려치 않는 경우

한 State 에서 他 State 로 이동한 Transition 에 걸쳐 spacing 과 speed 가 constant 던 λ 는 linear 的으로 해석되며, 한 State 로부터 他State 로 이동한 transition 에 걸쳐 spacing 과 speed 가 일정한 變化를 하지 않는 경우는 non-linear 的으로 해석된다. 그런데 식(4-1)에서 system speed 의 특성을 나타내는 C 가 변하게 되므로 non-linear 가 된다.

2) Boundary condition 을 고려하는 경우

driver coefficient 를 뜻하는 λ 式은 State transition 에 있어 일정치 않은것이 사실이나 만약 어떤 Boundary Condition 에서 설명할 경우 그결과 즉 어떤 車輛

間의 상대적 속도에 變化가 없었다면 linear 이다. 이때는 상대적 속도변화가 없는 경우라 보므로

$$\left(\frac{dx_{n-1}}{dt} - \frac{dx_n}{dt} \right) = 0$$

곧 speed (v)와 spacing (s) 관계식을 나타냄.

그러나 platoon 에 걸쳐 특히 saturation 으로 말미암아 stop concentration state 에서 signal light 가 green 으로 바뀌어 flow 가 시작되는 순간은 실제 linear 的 해석은 적용될 수가 없는 것이다.

$$K = \frac{1}{S} \quad (4-2) \quad \text{단 } K : \text{Concentration}$$

식 (4-1)에서 Gazis 의 실험식을 인용해 보면 ($l=0, m=1$) model 에 한하여 대표되는 non-linear model 이 된다.

$$v = c \ln (k_j/k) \quad (4-3)$$

단 k_j : jam concentration

따라서 flow : $q = vk = ck \ln (k_j/k)$ (4-4) 으로 표시된다.

5. 飽和狀態에 있어서 速度 傳播 理論

Platoon State 에 있어서 speed propagation 을 생각하면 Light-hill 과 Whitham 의 상태 방정식을 적용하여

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \quad V = \frac{\partial q}{\partial k} : \text{propagation speed} \quad (5-2)$$

참고로 concentraton 에 관한 식을 구해 보면,

$$K = F(X - Vt) \quad (5-3)$$

곧, 식 (5-3)=식 (4-2)

또 concentration 과 flow 의 특성곡선으로부터 propagation speed 를 알 수가 있다 (그림 3 참고)

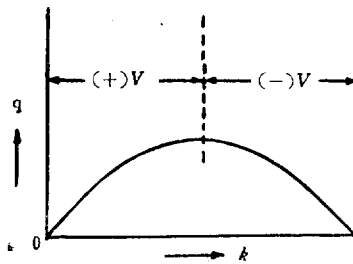


그림 3 q-k 特性曲線
Fig. 3 q-k characteristic curve

6. 過飽和交叉의 最適制御

여기서 Optimum Control 이라함은 demand value 에 대하여 어느만큼 service 를 할 수 있는나에 달려있다.

따라서 만약 stream 수를 i 개라고 할 때 대표적인 전체 demand value 를 I_i 라 하고, 이에 대한 전체의 service value 를 P_i 라고 하면 (그림 4 참고)

$$I_i(t) = \int_0^t q_i(\xi) d\xi \quad (6-1)$$

$$P_i(t) = \int_0^t p_i(\xi) d\xi \quad (6-2)$$

$$p_i = \rho g_i / S_i : \text{service rate}$$

여기서 g_i : effective green phase

ρ : optimum cycle

ξ : Saturation 지속중의 어느 순간

S_i : green light 時 flow 의 최대율

q_i : 최대 flow 時에 있어서 그 노선의 input

$$g_{min} \leq g_i = \frac{\rho p_i}{S_i} \leq g_{max} \quad (6-3)$$

여기서 안전 신속을 전제로 하는 Optimum Control 은 위선 식 (6-3) 조건을 만족시키고 식 (6-1) 및 식 (6-2)에 대한 특성 곡선 (그림 4)로부터 $I_1 P_1$ 및 $I_2 P_2$ 사이의面積 (點表示面積)을 최소로 할 때이다.

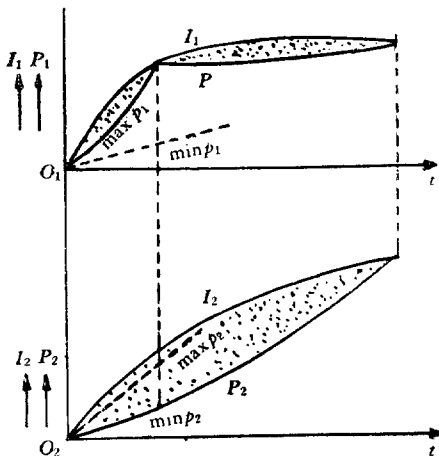


그림 4 I_i-t & P_i-t 특성곡선
Fig. 4 I_i-t & P_i-t Characteristics

7. 電子計算機에 의한 自動交通制御

일반적으로 traffic control 을 세가지 방법으로 나눌 수 있다.

1) 點制御式(Point Control method)

신호의 교차점이 他와 독립적으로 존재하는 상태로써 制御하는 방식

2) 線制御式(Line Control method)

신호의 교차점이 線上에 一次元的 배치상태로써 他와 독립적이지 아닌 路線制御

2) 面制御式(Plane Control method)

신호의 교차점이 街路面上에 二次元的 배치하여 서로 독립적이지 아닌 경우, 따라서 이 세가지 방식을 계통적 制御를 통하여 Computer 에 의한 Automatic Traffic Control 을 하되 하나의 central tower 에서 동시에 감시 統制 (특히 有故時) 할 수 있는 system 을 조직하는것이 합리적이다.

단위 intersection 에 관한 Detector, Computer, Signal Light 의 연동제어장치를 (그림 5) 에 보여주었으며 무엇보다 중요한 문제는 여러 기초 survey 로부터 얻은 data 下에서 가장 이상적인 Network plan 을 하는 것이다.

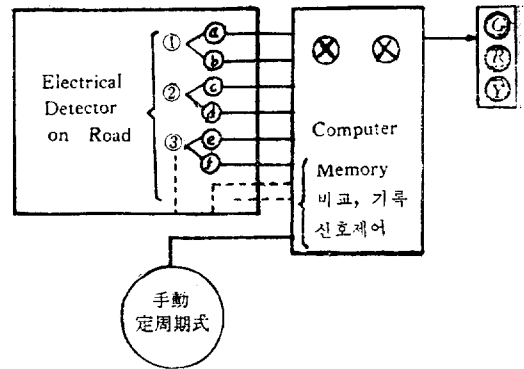


그림 5 檢知器—電子計算機—信號燈系統圖
Fig. 5 Detector-Computer-Signal Lights system

8. 결 론

Optimum Control 문제에 앞서 선행조건은 도로시설 Network plan 이 잘 되어야겠고 보행통행인, 운전자등 제도로 사용자는 교통법규를 철저히 준수해야 함은 물론 앞서 논한 queueing state 에 있어서 성립하는 곧, 안전과 신속문제에 대두되는 non-linear 의 식 (Initial 및 Boundary Condition 고려)으로부터 충분히 이해할 수가 있다. 이러한 전체하에서 Central Control Tower 의 點, 線, 面에 걸쳐 전체적 系統 自動制御方式을 취하는 것이다. 차량이 인간 운전자에 의해 운행되고, 또 인간의 심리상태는 항상 不變이라고 간주할 수 없으며 차량 Computer System 등도 경우에 따라 사고를 유발하므로 이를 대비해서 설계에 고려해 넣어야 하므로 手, 自並行方式으로 定周期式 부대시설도 이상적인 것으로 들 수 있다. 보다 원활한 流通을 위한 Traffic plan 에 있어 Traffic flow (차량수, 속도) detection 은 정확해야 하기 때문에 대표적인 Loop method, Impedance-Bridge method 등 어느 것도 좋겠지만 보다 정확한

detection을 위해서 FM 방식을 위해서 부단히 연구 개발을 시도하고 있다. 실제 운동면에서 Network plan을 잘하여 node 간에 있어서 가장 짧은 route를 신속히 선택할 수 있고, saturation flow 즉 queueing 誘發 直前 Light를 신속 switching 할 수 있도록 하는 Algorithm 개발도 중요하다. 특히 Signal Light Switching cycle time의 maximum 및 minimum value는路線의 사정에 맞추어 實測을 통하여 결정하여 Computer programing에 이 setting time을 필히 넣어야 한다.

참 고 문 헌

1. Ernest Davis, Traffic Engineering Practice, Lon-

don E.&F.N. Spon. Ltd, 1964

2. For wide-range Control Automatic responsive type traffic signal, Koysan'sCatalog, S.I.S. No. 6603 Tokyo, Japan
3. Denos C. Gazis, Mathematical Theory of Automatic Traffic, IBM Watson Research Center, York town Heights, New York 21, July 1967.
4. 都市の交通制御, OMRON, 立石電機株式會社, 東京, 昭和41年 6月
5. 定方希夫, 交通信號の自動化, 計測自動制御學會, Feb. 1969, Vol. 8. p.97 p. 102.