

メンバーシップ関数を用いた交差点遅れ推定モデルの構築*

Development of Estimation Model of Intersection Delay Using Membership Function*

内田 賢悦**、岸 邦宏***、佐藤 馨一****

By Ken-etsu Uchida, Kunihiro Kishi, Keiichi Satoh

1. はじめに

これまで交通配分モデルの拡張は、Wardrop 均衡をそのままの形で解くことが可能なように定式化されているのが一般的であった。たとえば動的モデル¹⁾、交通容量解析を導入したモデル¹⁾、ファジィリンク所要時間を導入した配分モデル²⁾が挙げられる。

交通現象として信号交差点での車の挙動を考えると、右折車の交差点遅れが対向直進車の影響を受けるように、一般にリンクコスト関数にはリンク間相互干渉がある。また、都市部のネットワークでの交通現象を考えると、交差点遅れが経路所要時間に占める割合は無視できないほど大きい。したがって、都市部ネットワークでの交通配分には、リンク間相互干渉がある交差点遅れを表現したモデルが必要である。

Meneguzzer³⁾は信号交差点を詳細に表現したモデルを提案している。このモデルでは、リンクコスト関数にリンク交通量相互間の干渉があるため、最適化問題として一意的な解を求めることができない。しかし、近似的均衡状態ではリンク交通量パターンが安定していることが分かっている。

信号交差点の影響を交通配分に取り入れた Meneguzzer のモデルでは、交差点容量解析によってあらかじめ飽和交通流率算定して交差点遅れを表現している。しかし、交通配分における飽和交通流率は、信号交差点流入部での右・左折車混入率や対向直進交通量が事前に分からないため、算定できないのが普通である。それらの要因は、最終的な配分結果より推定するものであり、したがって交通配分モデルでの交差点遅れは、不確実な要因を含んだ形で表現する必要がある。

こうした背景から、内田らはメンバーシップ関数を用いた交差点遅れ推定モデルを開発してきた。本モデルでは、交差点遅れを右・左折車混入率などの不確実な要因を仮定してファジィ数で表現している。本研究は、この交差点遅れ推定モデルを交通配分に取り入れた、都市部における交通現象解析法を提案するものである。

2. 交差点遅れ推定モデル

(1) 推定方法

初めに信号交差点における直進車と左折車について、交差点交通容量と流入交通量で、交差点でのリンク間連結度 μ を定義する(以下、連結度とする)。

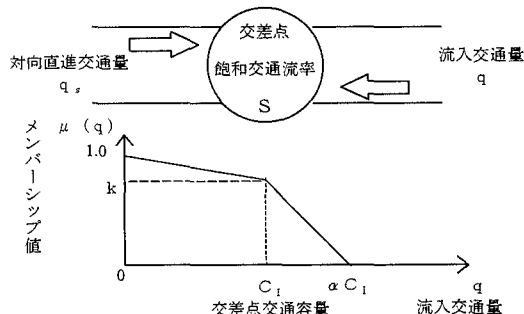


図1. 交差点でのリンク間連結度

ここで、連結度関数は式1で示す。

$$\begin{aligned} \mu(q) &= (k-1) \frac{q}{C_I} + 1, & 0 \leq q \leq C_I, & 0 < k < 1.0 \\ \mu(q) &= \frac{k}{1-\alpha} \frac{q}{C_I} + \frac{\alpha}{\alpha-1} k, & C_I < q \leq \alpha C_I, & \alpha > 1.0 \\ \mu(q) &= 0, & q > \alpha C_I \end{aligned} \quad (1)$$

飽和交通流率(S)は、交差点形状などの確定的要因で算定した値である。さらに交差点交通容量(C_I)は、飽和交通流率に青時間比(e)を乗じた値である(式2)。

$$C_I = S \cdot e \quad (2)$$

右折車については、ここで求めた連結度と対向直進車(q_s)の連結度との積とする。つまり直進車、左折

*キーワード 配分交通、経路選択、ネットワーク交通流

**学生員 修(工) 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北13条西8丁目、Tel 011-706-6822、Fax 011-726-2296)

***学生員 修(工) 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北13条西8丁目、Tel 011-706-6216、Fax 011-726-2296)

****フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北13条西8丁目、Tel 011-706-6209、Fax 011-726-2296)

車の連結度は $\mu = \mu(q)$ で、右折車の連結度は $\mu = \mu(q) \times \mu(q_s)$ である (式3)。

$$\mu(q) < \mu(q) \times \mu(q_s), \quad q_s > 0 \quad (3)$$

次に、推定の基本となる三角ファジィ数 $T(t_g, t_l, t_r)$ を設定する (図2)。

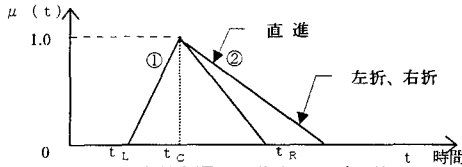


図2. 交差点遅れの基本ファジィ数

ここで t_C は、三角ファジィ数の中心であり、一様到着での平均遅れ時間として式4で表現する。

$$t_C = \frac{c(1-e)^2}{1-e(q/S)} \quad (4)$$

ここで、 c は信号のサイクル時間である。 t_R, t_L は、三角ファジィ数の右スプレッド、左スプレッドである。右スプレッドは、パラメータ β を交差点での進行方向 (直進、左折、右折) それぞれ $\beta_s, \beta_L, \beta_R$ ($1 \leq \beta_s \leq \beta_L \leq \beta_R$) を用いて式5で表す。

$$t_R = \beta \cdot t_C \quad \beta \geq 1 \quad (5)$$

左スプレッドはパラメータ γ を交差点での進行方向それぞれ $\gamma_s, \gamma_L, \gamma_R$ ($1 \leq \gamma_R \leq \gamma_L \leq \gamma_s$) を用いて式6で表す。

$$t_L = \gamma \cdot t_C \quad 0 < \gamma < 1 \quad (6)$$

図2は、 $\beta_s \leq \beta_L = \beta_R, \gamma_R = \gamma_L = \gamma_s$ の場合を表している。

図2で、中心より左側の直線①を、 $\mu(t)=0.5$ の軸で対称に折り返した直線①'に変換し、さらに中心より右側の直線②は、中心から左スプレッド間の時間を右にシフトさせた直線②'に変換する (図3上)。こうしてできた直線と連結度が交わる時間をファジィ交差点遅れの推定値 (中心: t_C 、左スプレッド: t_L' および右スプレッド: t_R') とする (式7、式8および図3下)。

$$t_L' = t_C(1 - \mu + \gamma\mu) \quad (7)$$

$$t_R' = t_C\{\beta(1 - \mu) + 1 + \mu - \gamma\} \quad (8)$$

ファジィ交差点遅れの代表値として重心値 (t_G) を取り上げると式9で表される。

$$t_G = \frac{1}{3}(t_L' + t_C + t_R') \quad (9)$$

$$= \frac{t_C}{3}\{-\mu(\beta - \gamma) + \beta - \gamma + 3\}$$

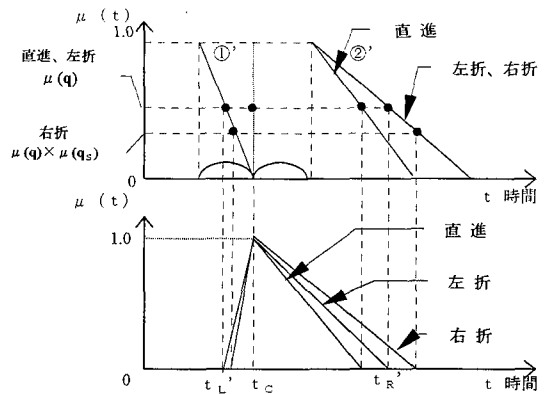


図3. 交差点遅れの推定

本推定法では、パラメータ β および γ が交差点の飽和交通流率の不確実性が交差点遅れにおよぼす影響を表している。連結度はその不確実性の度合いを表し、1のときにその度合いが一番小さく、0に近づくにつれて大きくなる。

連結度が1のときのファジィ交差点遅れは、中心に対して左右対称なファジィ数となっており、その代表値としての重心値は中心と一致する (次節で説明する Webster の関数と等しい)。これは、右・左折車混入率といった不確実な要因が交差点遅れにおよぼす影響が小さいことを示している。

連結度が小さくなると、右・左折混入率などが交差点遅れにおよぼす影響が大きくなると考えられる。そのため、交差点遅れに対するパラメータ β, γ の影響が大きくなるので、ファジィ交差点遅れの左・右スプレッドとともに右にシフトする。このとき、ファジィ交差点遅れの重心値は中心よりも大きな値となる。特に右折車の場合は、対向直進車が連結度に影響するため、直進車や左折車より交差点遅れの重心値は大きい。

このようにメンバーシップ関数を用いて交差点遅れを表現することによって、交差点での飽和交通流率の不確実性を含んだ交通配分が可能となる。

(2) 各種交差点遅れ関数との比較

交差点遅れ関数の代表的なものに、Webster の式が挙げられる。Webster の式では、飽和交通流率が過飽和状態で交差点遅れが無限大になるため、より現実的な式への拡張が試みられてきた。こうした拡張式の代表的なものが Akcelik の式である。

ここでは、本交差点遅れ推定モデルの妥当性を調べ

るため、交差点遅れの代表的な式との比較を試みた(図4)。

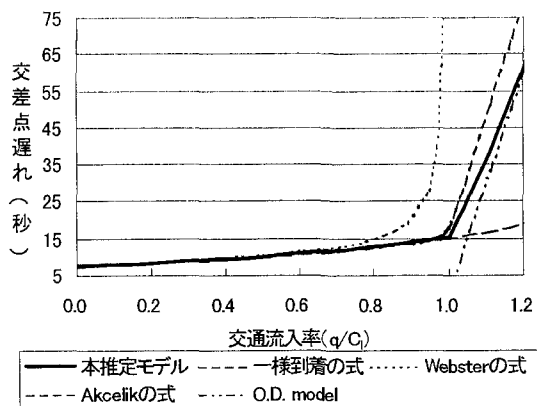


図4. 各種交差点遅れ式の比較

図4で一樣到着の式とは、式4で表されるファジィ交差点遅れの中心である。O.D.(Overflow Delay)モデルは、過飽和状態の交差点遅れの平均値である。なお、飽和交通流率、信号のサイクル時間および青時間比をそれぞれ、3,600 (台/時)、60 (秒)、0.5としている。Akcelik と O.D.モデルはそれぞれ、式 10 および式 11 で表される。

$$d = \frac{0.5C(1-e)^2}{1-\alpha(q/C_i)} + 900(q/C_i - 1) + \sqrt{\frac{(q/C_i - 1)^2 + 8(q/C_i - 0.5)}{C_i T}} \quad (10)$$

$$d = (T/2)(q/C_i - 1) \quad (11)$$

ここで、Tは交通流の過飽和な状態が続く時間であり、10分として設定している。

表1に本モデルの設定値を示す。

表1. 本モデルの設定値

パラメータ	β	γ	k	α
値	7.0	0.1	0.9	1.2

図4より本モデルによる交差点遅れは、設定値を適切に決定すると過飽和状態においても(Akcelik と O.D.モデルの値に近い) 妥当な値となることが分かる。

(3) パラメータ設定

ファジィ交差点遅れのスプレッドを決定するパラメータは、交差点遅れ観測によって定めることにする。そのため、最初に連結度の関数を設定しておく必要がある。

連結度関数のパラメータkを1に近い値にすると、交通流入率が飽和以下 ($0 \leq q/C_i \leq 1.0$) での交差点遅れは、(ファジィ交差点遅れの) パラメータ β およ

び γ の影響をそれほど受けない。逆に交通流入率が過飽和 ($1.0 \leq q/C_i \leq \alpha$) での交差点遅れは、パラメータ β および γ の影響を大きく受けることになる。このことは図4で $k=0.9$ に設定しているため、交通流率が飽和以下での交差点遅れの重心値はファジィ交差点遅れの中心(図4における一樣到着の式)と近い値をとり、過飽和になったときにはファジィ交差点遅れの中心よりかなり大きな値になることから推測できる。交通流率が飽和以下での交差点遅れは、Webster の式でも分かるように、ファジィ交差点遅れの中心値とそれほど差がない。よって、パラメータkは0.8~0.9に設定するのが妥当である。パラメータ α の値は、交差点遅れの定義域と考えられ、交通状況に応じて適切な値を設定しておくといよい。

次に交通状況が一定のもとで交差点遅れを観測し、その確率密度関数を平均が m で標準偏差が σ である正規分布 $N(m, \sigma)$ 従うと仮定する。同じ状況で推定されるファジィ交差点遅れを $T(t'_r, t_c, t'_l)$ とする。このとき、 t'_r および t'_l は式12で表される。

$$\begin{aligned} t'_L &= f(t_c, \mu, \gamma) \\ t'_R &= g(t_c, \mu, \gamma, \beta) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで f, g は関数である。このときファジィ交差点遅れの広がり、正規分布における標準偏差の6倍となり、さらにファジィ交差点遅れの重心値が観測値の平均値になることを仮定すると、式13が成立する。

$$t'_R - t'_L = 6\sigma, \quad (t'_R + t_c + t'_L)/3 = m \quad (13)$$

式13より (t_c, μ が所与のため) ファジィ交差点遅れのパラメータ β, γ を決定できる。

3. 交差点遅れの配分モデルへの適用

リンクコストがBPR関数で表現される確定的交通配分法に、交差点遅れを導入することにする。リンクコストはクリスプ数で、交差点遅れコストはファジィ数で表現されることになるが、拡張原理を用いることその和としての経路コストをファジィ数として表現可能である。さらに、経路コストの代表値を重心値とすることで交通配分の均衡問題を定式化できる。

交差点遅れ推定モデルでは、リンク上の交通量だけでなく、対向直進車の交通量も交差点遅れに影響している。こうした、リンク間に相互干渉のある利用者均衡配分法を最適化問題として解くための条件は、リン

クコスト関数のヤコビアン行列が対称行列であることであるが¹⁾、本交通配分モデルはこの条件を満たさない。このような均衡問題は、最適化問題として解くことが不可能であり、さらに初期実行可能解によって複数の均衡解が存在することが分かっている¹⁾。

Meneguzzer³⁾は、同様なモデルで近似的収束条件を設定し、その条件下でリンク交通量は安定しており、初期実行可能解に関わらず相応な均衡状態のリンク交通量パターンが再現されていることを示している。

そのため本交通配分モデルにおいて、Meneguzzerの近似的収束条件を均衡状態とする。この条件は、式(14)、式(15)で表される。

1) リンク収束条件

$$|f_i^{n+1} - f_i^n| \leq 0.1 f_i^n \quad (14)$$

2) 収束計算の終了条件

$$N_c \geq 0.95 L \quad (15)$$

ここで、 f_i^n 、 N_c 、 L はそれぞれ FrankWolf 法による収束計算での n 回目におけるリンク 1 の交通量、収束したリンク数、ネットワークの全リンク数である。

4. 交差点遅れを考慮した効率的経路探索法

交通配分における交差点の詳細表現は、(ノード数 6, リンク数 16 の) ダミーノード、ダミーリンクを用いるのが一般的である。この表現法では、交差点での進行方向別交差点遅れを取り入れることが可能であるが、ネットワーク表現が複雑となるため計算効率性が良くない。

そのため、本研究ではペナルティ関数を用いた最短経路探索アルゴリズム⁴⁾を用いることにする。同アルゴリズムでは交差点を 1 つのノードとして表現可能である。したがって、交差点遅れを考慮した最小コスト経路を効率的に求めることができる。

このアルゴリズムを交通配分に適用するには、交差点での進行方向(直進、左折、右折)を表現する必要がある。そのため、3つの接続するノードに対して交差点での進行方向を対応させる関係行列を考案した。

関係行列は、接続関係行列、直進関係行列、左折関係行列および右折関係行列の4つの行列からなる。接続関係行列の定義は、連続する2つのノードが接続されているかを表現するものである。さらに、直進関係行列、左折関係行列、右折関係行列の定義は、接続関

係行列により2つのノードが接続されている場合、3つ目のノードへの進行がそれぞれ、直進、左折および右折であるかを表現するものである。

図5は、信号交差点と接続関係行列を示している。

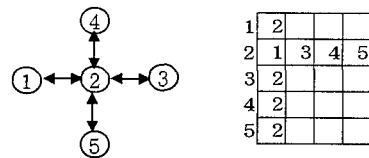


図5. 信号交差点と接続関係行列

接続関係行列では、行番号をノード番号に対応させ、その列に接続するノード番号を入れる。たとえば図5で、ノード2に続するのはノード1, 3, 4および5である。ここで、ノード5からノード2に車が進入するとする(接続関係行列の5行1列)。このとき、ノード4は直進、ノード1は左折、そしてノード3は右折に対応するので、直進関係行列、左折関係行列および右折関係行列の5行1列にそれぞれノード番号4, 1, および3を入れる(図6、図7、図8)。これら4つの行列により、交差点での進行方向を表現することが可能となる。

1	3			
2				
3	1			
4	5			
5	4			

図6. 直進関係行列

1	4			
2				
3	5			
4	3			
5	1			

図7. 左折関係行列

1	5			
2				
3	4			
4	1			
5	3			

図8. 右折関係行列

5. おわりに

本研究では、ファジィ交差点遅れを導入した都市部の交通現象分析法を提案した。本モデルでは交差点遅れにリンク間相互干渉があるため、解の安定性を調べる必要がある。交差点遅れ観測を行い、推定モデルのパラメータ設定も同時に行う必要がある。

参考文献

- 1) 交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解法-, 土木学会
- 2) 秋山孝正: ファジィ経路情報に基づくネットワーク解析, 土木学会論文集, No449/IV-17, pp. 145~154, 1992
- 3) CLAUDIO MENEGUZZER: AN EQUILIBRIUM ROUTE CHOICE MODEL WITH EXPLICIT TREATMENT OF THE EFFECT OF INTERSECTIONS, TRANSPORTATION RESEARCH 29B, PP329~356
- 4) A NOTE ON LEAST TIME PATH COMPUTATION CONSIDERING DELAYS AND PROHIBITIONS FOR INTERSECTION MOVEMENT, TRANSPORTATION RESEARCH 30B, PP359~367