

IV-38

交差点遅れを考慮した利用者均衡配分モデルの構築

北海道大学大学院 学生員 ○内田 賢悦
 北海道大学大学院 学生員 高橋 卓也
 北海道大学大学院 フェロー 佐藤 馨一

1. はじめに

都市部では、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交通配分を行うには、交差点遅れを表現したモデルが必要である。

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、自動車の走行時間には他の道路上の交通量が影響する。

信号交差点の影響を交通配分に取り入れた Meneguzzi¹⁾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交通配分を行う前にわからないため、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²⁾。本研究では、この交差点遅れ推定モデルを取り入れた利用者均衡配分法を構築した。

2. 交差点遅れ推定モデル

はじ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 (図1) を定義する (以下、連結度とする)。連結度関数は式1のとおりである。

$$\mu(q) = (k-1) \frac{q}{C_1} + 1, \quad 0 \leq q \leq C_1, \quad 0 < k < 1.0$$

$$\mu(q) = \frac{k}{1-\alpha} \frac{q}{C_1} + \frac{\alpha}{\alpha-1} k, \quad C_1 < q \leq \alpha C_1, \quad \alpha > 1.0$$

$$\mu(q) = 0, \quad q > \alpha C_1$$

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_1)

は、飽和交通流率に青時間比 (e) を乗じた値である (式2)。

$$C_1 = S \cdot e \quad (2)$$

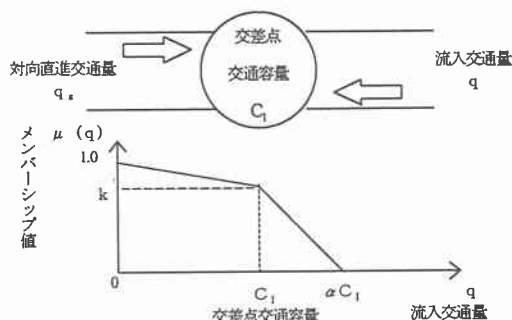


図1. 交差点でのリンク間連結度

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 $T(t_R, t_C, t_L)$ を設定する (図2)。

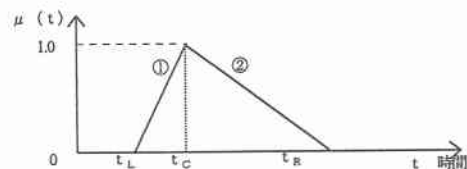


図2. 交差点遅れの基本ファジィ数

ここで t_C は、三角ファジィ数の中心であり、一樣到着での平均遅れ時間として式4で表現する。

$$t_C = \frac{c(1-e)^2}{2(1-e(q/C_1))} \quad (4)$$

c は信号のサイクル時間である。 t_R, t_L はそれぞれ、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) について、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)。

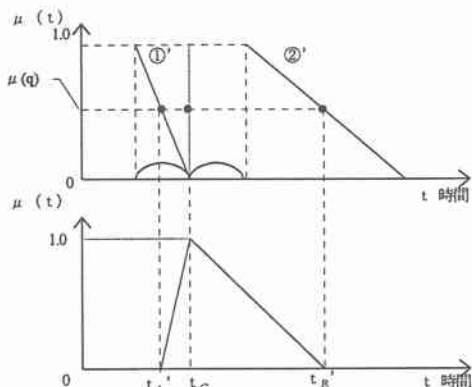


図3. 交差点遅れの推定

$$t'_L = t_C(1 - \mu + \gamma\mu) \quad (7)$$

$$t'_R = t_C\{\beta(1 - \mu) + 1 + \mu - \gamma\} \quad (8)$$

本モデルではファジィ交差点遅れの代表値として、重心値(t_G)を用いることにする(式9)。

$$t_G = \frac{1}{3}(t'_L + t_C + t'_R) \quad (9)$$

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

パラメータ γ が影響するファジィ交差点遅れの左スプレッド(t_L)は中心(t_G)より小さいため、重心値を小さくする作用がある。一方、パラメータ β が影響するファジィ交差点遅れの右スプレッド(t_R)は、重心値を大きくする作用がある。

本推定法では、パラメータ γ が信号が青現示のときに自動車到着するといった、交差点遅れを小さくする要因の影響を表していると解釈できる。パラメータ β は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解釈できる。たとえば、右左折車混入率、縦断勾配などといった交差点遅れを大きくする要因である。連結度はその不確実性が交差点遅れにおよぼす影響の度合いを表している。

図3より、連結度が1のときは、パラメータ γ の影響する度合いが一番大きく、パラメータ β が影響する度合いが一番小さい。こ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(一様到着の式と等しい)。

連結度が0に近づくと、パラメータ γ の影響の度合いは小さくなり、パラメータ β の影響の度合いは大きくなる。このことは、交差点に流入する交通量が増えるにつれて(連結度が小さくなるにつれて)、交差点遅れを減少させる要因の影響は小さくなり、逆に交差点遅れを増大させる要因の影響は大きくなることを示している。すなわち、パラメータ β と γ のバランスによって、ファジィ交差点遅れの重心値がどれくらい中心より大きな値となるのかが決定される。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な値となる。

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。

3. パラメータ値の設定

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、交差点遅れを計測することによって定めることにする。そこで、前もって連結度関数を設定することにする。

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($0 \leq q/C_1 \leq 1.0$)での交差点遅れは、(ファジィ交差点遅れの)パラメータ β の影響は小さく、逆にパラメータ γ の影響を大きく受ける。一方、交通流入率が過飽和($1.0 \leq q/C_1 \leq \alpha$)での交差点遅れは、パラメータ β の影響を大きく受け、パラメータ γ の影響は小さい。たとえば、 $k=0.9$ に設定すると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(一様到着の式)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

な値になることが推測できる。交通流率が飽和以下での交差点遅れは、Webster の式でもわかるように、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と考えられる。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。ただし、飽和交通流率より小さい値にする。

平均交差点遅れ算定に必要な交差点の飽和交通流率は、厳密には右・左折車混入率や対向直進車といった要因を考慮しなければいけない。しかし交通配分を考えると、こういった要因は確定できない。したがって、歩行者、勾配、幅員などといった確定的要因のみで算定することにする。

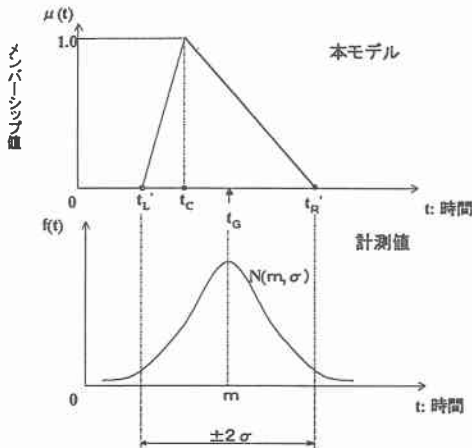


図4. 交差点遅れ計測によるパラメータ設定

次に交通状況が一定のもとで交差点遅れを計測し、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 $N(m, \sigma)$ に従うと仮定する。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 σ が、 $\pm 2\sigma$ 倍となり、さらにファジィ交差点遅れの重心値が計測値の平均値になることを仮定すると、式 13 が成立する。

$$t'_R - t'_L = 4\sigma, \quad (t'_R + t'_C + t'_L)/3 = m \quad (13)$$

式 13 を解くことにより (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 (図 4)。

3. 1 交差点遅れの計測

ファジィ交差点遅れ推定に必要なパラメータ (β, γ) を設定するために交差点遅れの計測を行った。場所は、札幌市の地下鉄東西線、南郷7丁目駅前交差点であり、1998年11月19日の13:00~15:00に計測を行った。

計測方法は、直進、左折および右折の各車線ごとに交差点の流入部と流出部に1台ずつ、計2台のデジタルビデオカメラを設置して、その通過時間の差を交差点通過所要時間とした。さらに、自動車の自由走行速度を 50km/h (法定速度) として交差点遅れを算定した (図 5)。

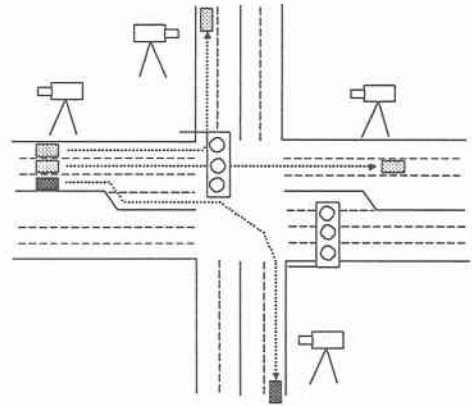


図5. 交差点遅れ計測

表 1 に計測値の統計量と、推定したパラメータを示す。

表 1. 交差点遅れのパラメータ値

	直進	左折	右折
平均 (秒)	33.77	39.18	57.57
標準偏差	28.90	21.98	29.18
最大値	92.12	78.12	116.84
最小値	8.12	11.12	18.84
データ数	162	52	26
平均遅れ (秒)	30.1	24.0	21.9
飽和交通流率 (台/膏 1 時間)	2000	1314	1314
交通量 (台/時)	641.3	195.0	90.0
パラメータ: γ	0.01	0.09	0.76
パラメータ: β	4.84	53.50	53.73

平均交差点遅れの計算に必要な飽和交通流率は、直進については 2000 台/時とし、左折および右折については歩行者の影響を考慮して 1300 台/時とした。求められたパラメータを用いた交差点遅れ関数を図 6 に示す。

表 1 よりパラメータ γ に関しては、直進および左折については小さな値、右折については比較的大

きな値になっていることがわかる。これは、 γ の値が小さい直進と左折は交差点遅れを小さくする要因の影響が大きいことを示している。右折車については信号が青であっても対向車があるため、交差点遅れを小さくする要因の影響が小さいことがわかる。一方、パラメータ β については直進については小さく、左折および右折については大きくなっている。パラメータ β が大きいほど交差点遅れを大きくする作用がある。したがって、左折および右折車の交差点遅れを大きくする要因の影響は同じ程度に大きいといえる。さらに右折車に関しては、対向直進車の影響も連結度として受けるため、左折の交差点遅れより大きな値となっていることがわかる。

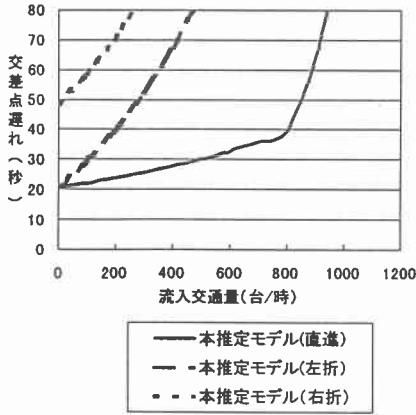


図6. パラメータ推定を行った交差点遅れ

4. 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。

前述の拡張式の代表的なものが Akcelik の式である³⁾。Akcelik の式では過飽和状態での継続時間も考慮して定式化がなされている。

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7)。ここで、パラメータ値は表1に示した値を用いている。

図7における一様到着の式とは、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³⁾。なお、信号のサイクル時間および青時間比をそれぞれ、110(秒)、0.5としている。また飽和交通流率は、2000(台/時)としている。本モデルでの飽和交通流率は、直進を2000(台/時)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。

$$d = \frac{0.5C(1-\theta)^2}{1-\alpha(q/C_1)} + 900(q/C_1 - 1) + \sqrt{(q/C_1 - 1)^2 + \frac{8(q/C_1 - 0.5)}{C_1 T}} \quad (10)$$

$$d = (T/2)(q/C_1 - 1), \quad q > C_1 \quad (11)$$

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2に本モデルの設定値を示す。

表2. 本モデルの設定値

パラメータ	k	α
値	0.9	1.2

図7から本モデルの交差点遅れは、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わかる。

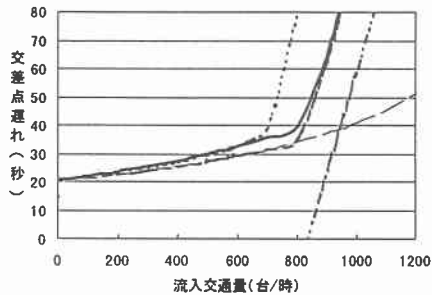


図7. 各種交差点遅れとの比較

5. 交差点遅れの配分モデルへの適用

一般的な利用者均衡配分は、以下のような最適化問題として定式化される⁴⁾。

$$\min Z_p = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (14)$$

$$\text{where } \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - Q_{rs} = 0, \quad \forall rs \in \Omega \quad (15)$$

$$x_a = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall a \in A \quad (16)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad x_a \geq 0 \quad (17)$$

Z_p : 目的関数
 K_{rs} : OD ペア rs 間の経路集合
 k : 経路集合の要素
 A : リンク集合
 a : リンク集合の要素
 Ω : OD ペアの集合
 x_a : リンク a のリンク交通量
 $t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数
 δ_{ak}^n : OD ペア rs 間の第 k 経路がリンク a を含むときに 1, そうでないときに 0 になるダミー変数
 f_k^n : OD ペア rs 間の第 k 経路の経路交通量
 Q_{rs} : OD ペア rs 間の分布交通量

本モデルでは、交差点遅れがファジィ数として表現されるが、その代表値を用いることによって経路コストをクリस्प数として表現できる⁷⁾。

本交差点遅れ推定モデルにおける右折車のリンクコスト関数は、そのリンク上の交通量だけでなく、対向直進車の交通量も影響している。つまり、リンクコスト関数が2変数（リンク交通量と対向直進交通量）で記述されるため、式 14 で示した積分ができない。こうした、リンク間に相互干渉のある利用者均衡配分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⁸⁾、本研究での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は、一般的には不可能であり、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。

Meneguzzer¹¹⁾は、同様なモデルで近似的収束条件を設定し、その条件下では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 (18)、式 (19) で表される。

1) リンク収束条件

$$|f_l^{n+1} - f_l^n| \leq 0.1 f_l^n \quad (18)$$

2) 収束計算の終了条件

$$N_c \geq 0.95L \quad (19)$$

ここで、 f_l^n , N_c , L はそれぞれ Frank Wolf 法による収束計算での n 回目におけるリンク l 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。

6. 交差点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 8, 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⁹⁾。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⁷⁾。

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⁷⁾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。

以下にアルゴリズムを示すが、その前に前提条件としていくつかの説明を加える。

ネットワーク G を $G = (V, A)$ と表現する。ここで、 V, A はそれぞれネットワークを構成するノードとリンクの集合である。ノード j の後ノード k を $k \in \Gamma(j)$ 、ノード j の前ノード i を $i \in \Gamma^{-1}(j)$ と表現する。ノード i を通過しノード j に到着して、さらにノード k に向かうときの動き（直進、左折、右折に対応）を m_k とし、そこまでの最小経路コスト λ_{jmk} を式 (20) で表す。

$$\lambda_{j,m_k} = \min_{i \in \Gamma^{-1}(j)} \{ \zeta(i, j, m_k) + \tau(i, j) + \lambda_{i,m_k} \}, \quad \forall j \in V \text{ and } k \in \Gamma(j) \quad (20)$$

$$\lambda_{j,m_k} = 0, \quad \forall k \in \Gamma(r)$$

ここで、 $\zeta(i, j, m_k)$ はノード i を通過して、ノード j で動き m_k をするときのコスト（交差点遅れ）であり、 $\tau(i, j)$ はリンク (i, j) のコストである（図 8）。

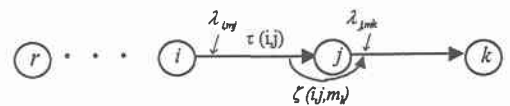


図 8. 経路コストの表現

出発ノードを r としたときの経路 π_{jmk} は、式 (21) で表す。

$$\pi_{j,m_k} = \{(r, m_{n_1}), (n_2, m_{n_2}) \cdots (n_{k-1}, m_{n_{k-1}}), (n_k, m_{n_k})\} \quad (21)$$

アルゴリズム

ステップ 0. 走査可能リスト (Scan Eligible List) に出発ノード r を挿入し、初期化する。さらに、ラベルを次のように初期化する。

$$\lambda_{i,m_j} = \infty, \quad \forall i \in V \text{ and } j \in \Gamma(i)$$

$$\lambda_{r,m_k} = 0, \quad \forall k \in \Gamma(r)$$

ステップ 1. 走査可能リストが空ならステップ 3へ。走査可能リストから最初のノード (ノード i とし、こ

れを現在ノードと呼ぶ) を選択し、これを走査可能リストから削除してステップ2へ。

ステップ2 a. すべてのノード $j(j \in \Gamma(i))$ が既に走査されていたなら、ステップ1へ。そうでなければ、走査されていないノード j を選択し、式22に従い現在ノードを走査する。

$$\lambda_{j,m_k} = \min\{\lambda_{i,m_k}, \zeta(i, j, m_k) + \tau(i, j) + \lambda_{i,m_j}\}, \quad (22)$$

$$\forall j \in V \text{ and } k \in \Gamma(j)$$

λ_{j,m_k} の値が改善された (小さくなった) なら、ノード i と動き m_k をそれぞれ前ノード、前動きとして記憶する。改善されないときは、何もせずに次の動き m_k について続ける。

ステップ2 b. ノード j での動き m_k の代わりに、終了する動きを $|\Gamma(j)|+1$ とし、式17に従い走査する。 $\lambda_{j,|\Gamma(j)|+1}$ が改善されたなら、ノード i と動き $|\Gamma(j)|+1$ をそれぞれ前ノード、前動きとして記憶する。改善されないときは、何もせずにステップ2 cへ。

ステップ2 c. すべてのラベル λ_{j,m_k} が改善されたなら、走査可能リストにノード j を挿入し、ステップ1へ。

ステップ3. アルゴリズムを終了する。ノード j への最小経路コストはラベル $\lambda_{j,|\Gamma(j)|+1}$ に記憶されており、前ノードを探すことで経路が確定される。

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9に信号交差点と接続関係行列を示す。

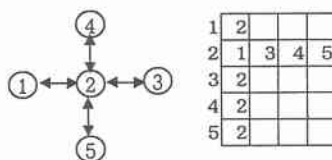


図9. 交差点と接続関係行列

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に接続するのはノード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10、図11、図12)。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10直進関係行列

1	4			
2				
3	5			
4	3			
5	1			

図11左折関係行列

1	5			
2				
3	4			
4	1			
5	3			

図12右折関係行列

7. おわりに

本研究では、交差点遅れを考慮した利用者均衡配分モデルを構築した。また、交差点遅れを考慮した利用者均衡問題を解くために、効率的な最短経路探索アルゴリズムを利用している。そのため、計算時間は通常の利用者均衡配分問題を解くのと比較しても、それほど差がないと考えられる。

交差点遅れ推定に必要なパラメータの設定は、ITS 技術⁹⁾である路車間の双方向通信機能と車両感知器機能を活用することによって、容易に設定が可能となると考えられる。

参考文献

- 1) CLAUDIO MENEGUZZER: AN EQUILIBRIUM ROUTE CHOICE MODEL WITH EXPLICIT TREATMENT OF THE EFFECT OF INTERSECTIONS, TRANSPORTATION RESEARCH 29B, PP329~356
- 2) Ken-etsu UCHIDA, Shin-ei TAKANO, Seiichi KAGAYA and Keiichi SATO: ESTIMATION OF THE ASSIGNED TRAFFIC VOLUME IN CONSIDERATION OF SIGNALIZED INTERSECTIONS, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol2, No3, pp777~793, 1997
- 3) V.FHURDLE: Signalized Intersection Delay Models-A Primer for the Uninitiated, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, No971, pp.96~104, 1984
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 森津 秀夫: 交通ネットワーク表現と最短経路探索法、交通工学, Vol.25, No6, pp21~31, 1990
- 7) ATHANASIOS K. ZILIASKOPOULOS, HANI S. MAHMASSANI: A NOTE ON LEAST TIME PATH COMPUTATION CONSIDERING DELAYS AND PROHIBITIONS FOR INTERSECTION MOVEMENT, TRANSPORTATION RESEARCH 30B, PP359~367
- 8) 桑原雅夫: ITS への期待、交通工学, Vol133, pp19~25, 1998