

信号制御された 2 次元都市交通網における車両の運動

駒田 和史, 小島 健吾, 長谷 隆

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

概要

信号制御された 2 次元都市交通網における旅行時間の経路依存性について研究する. 車はドライバーが選択した経路(直線, ジグザグ, ランダム経路)上に設置された一連の信号群を通過する. 車の運動は選択経路及び信号サイクルタイムによって非常に複雑な挙動を示す. 旅行時間の選択経路及び信号サイクルタイムの依存性を明らかにする.

Modeling and Simulation for Vehicular Traffic in 2-dimensional City Network Controlled by Signals

Kazuhito Komada, Kengo Kojima, Takashi Nagatani

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract

We study the dynamic behavior of vehicular traffic through the series of traffic lights on selected path (one of the straight, zigzag, and random paths). The vehicular traffic exhibits the very complex behavior with varying selected path and cycle time. The dependence of the tour time on the selected path and cycle time is clarified for two-dimensional traffic.

1 緒言

都市交通網での旅行時間の遅れは多大な時間損失・経済損失の原因となっている. 都市交通の旅行時間の遅れの原因には道路工事, 踏切, 交通事故, 渋滞などが挙げられるが, 信号交差点も重要な要因である. 都市交通では車の安全性のため交差点に信号を配置し道路に優先権を与えている. 実際の交通では自動車の旅行時間は信号制御に大きく依存している. 旅行時間の短縮は時間損失・経済損失の縮小につながり, 信号制御戦略の旅行時間への影響を明らかにすることが重要かつ必要である [1,2].

過去の研究は主に 1 車線道路上の一連の信号群を通る交通流に関するものであった. 実際の都市交通は信号制御された 2 次元交通網を車は走行する. 2 次元都市交通網では出発点から到着点への移動に際し, 運転手はさまざまな経路選択が可能である. 旅行時間は選択経路と信号制御戦略に大きく依存する. しかし信号制御された 2 次元都市交通網を走行する自動車交通に関する研究はあまりなされていない. また選択経路及び信号特性が 2 次元都市交通網を走行する車の運動に及ぼす影響を明らかにした研究もほ

とんどない.

本研究では信号制御された 2 次元都市交通網における旅行時間の選択経路(直線, ジグザグ, ランダム経路)及び信号サイクルタイムの依存性を明らかにする [3].

2 2 次元交通の非線形写像モデル

2.1 2 次元信号交通網

信号制御された 2 次元都市交通網における低密度での自動車交通を考える. 低密度のため, 互いに車は相互作用しないものとする. したがって本研究では車一台の運動を支配する力学モデルを考える.

正方向格子上の各サイトに 2 つの信号を設置する. 車は x (東)方向か y (北)方向のいずれかに進み交差点間距離は l で一定とする. また車は平均速度 v で走行するものとする.

図 1 に交差点の概略図を示す. x 方向から来た車が直進したいとき, x 方向の信号が青であれば停止す

ることなく直進，赤であれば青に変わるまで停止する． x 方向から来た車が y 方向に左折したいとき， y 方向の信号が青であれば停止することなく左折，赤であれば青に変わるまで停止する． y 方向から来た車が直進したいとき， y 方向の信号が青であれば停止することなく直進，赤であれば青に変わるまで停止する． y 方向から来た車が x 方向に右折したいとき， x 方向の信号が青であれば停止することなく右折，赤であれば青に変わるまで停止する．

車はドライバーが選択した経路に沿って進むものとする．ドライバーが選択した経路上の信号を上流から下流に $1, 2, 3, \dots, n, n+1, \dots$ と表す．全ての信号は青信号の時間 $s_p \cdot t_s$ ，赤信号の時間 $(1-s_p) \cdot t_s$ で周期的に変化する．ここで t_s は信号のサイクルタイム， s_p は信号のスプリットを表す．

x 方向の信号が青(赤)ならば， y 方向の信号は赤(青)である．すなわち x 方向の信号は y 方向の信号に対して位相差 t_{phase} は $s_p \cdot t_s$ である．本研究では x 方向の信号は同時に変わりまた y 方向の信号も同時に変わるものとする．本研究では信号のスプリット s_p は $1/2$ とし，位相差 t_{phase} は $t_s/2$ となる．

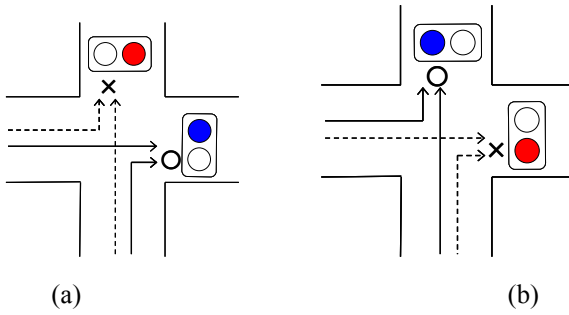


図 1 交差点の概略図

一般に 2 次元都市交通網において運転者はさまざまな経路を選択することができる．そこで図 2 のような 3 つの選択経路を考える．

点 O は出発点，点 D は到着点である．経路により到着点は異なっているが，移動距離(マンハッタン距離)は同じものとする．

本研究では以下の 3 通りの経路の自動車運動への影響を研究する．

図 2(a)での直線経路では車は y 方向に進まないのて，全ての信号において $t_{phase}(n)=0$ である．図 2(b)でのジグザグ経路では，位相差 t_{phase} は奇数(x 方向)の信号 $2n-1$ では $t_{phase}(2n-1)=0$ ，偶数(y 方向)の信号 $2n$ では $t_{phase}(2n)=t_s/2$ である．図 2(c)でのランダム経路では，車はランダムに x 方向，もしくは y 方向に進む．位相差 t_{phase} は車が x 方向に進む時 0 ， y 方向に進む時 $t_s/2$ となる．

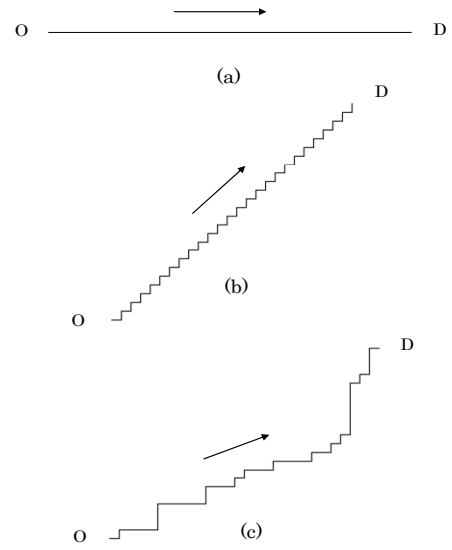


図 2 2次元格子上の 3つの選択経路図

2.2 非線形写像モデル

車が信号(交差点)に到着したとき進みたい方向の信号が赤であればその場で停止し，青に変化したら前進する．車が信号(交差点)に到着したとき進みたい方向の信号が青であれば停止することなく速度を変えずに前進する．

信号 n の旅行時間を $t(n)$ とすると，次の信号 $n+1$ の旅行時間 $t(n+1)$ は次式となる．

$$t(n+1) = t(n) + l/v + (r(n) - t(n)) \cdot H(t(n) + t_{phase}(n) - [\text{int}((t(n) + t_{phase}(n))/t_s) \cdot t_s] - s_p(n) \cdot t_s) \quad (1)$$

ここで

$$r(n) = (\text{int}((t(n) + t_{phase}(n))/t_s) + 1) \cdot t_s - t_{phase}(n) \quad (2)$$

式(1)の右辺第 1 項は信号 n までの旅行時間を表す．右辺第 2 項は信号 n から信号 $n+1$ への移動時間を表す．第 3 項は信号 n での停止時間を表している．ここで $r(n)$ は信号 n が次にちょうど青に変わる時間である． $H(t)$ はヘビサイド関数で， $t \geq 0$ で $H(t)=1$ ， $t < 0$ で $H(t)=0$ となる． $t(n)$ において信号 n が青であれば $H(t)=0$ となり第 3 項は 0 ，赤であれば $H(t)=1$ となり第 3 項は $r(n)-t(n)$ となる．そして信号を 1 つ進むたびに番号 n は 1 つずつ増えていく．

式(1)を l/v で割り，無次元化すると，次式の非線形写像モデルが得られる．

$$T(n+1) = T(n) + 1 + (R(n) - T(n)) \cdot H(T(n) + T_{phase}(n) - [\text{int}((T(n) + T_{phase}(n))/T_s) \cdot T_s] - s_p(n) \cdot T_s) \quad (3)$$

ここで

$$R(n) = (\text{int}((T(n) + T_{\text{phase}}(n))/T_s) + 1) \cdot T_s - T_{\text{phase}}(n) \quad (4)$$

$T(n) = t(n)v/l$, $R(n) = r(n) v/l$, $T_{\text{phase}}(n) = t_{\text{phase}}(n)v/l$, $T_s = t_s v/l$ である。旅行時間を無次元化することで信号間距離や平均速度が変化しても本研究の結果が適用できる。このように車両力学モデルは非線形写像モデル式(3), (4)により記述される。

3 数値シミュレーションと結果

非線形写像モデルを反復させて選択経路上の一連の信号群を通過する1台の車の運動を研究する。図2に示した3通りの経路について車の旅行時間を計算する。3通りの経路についてサイクルタイムに対して旅行時間がどのように変化するか調べる。

スプリットは全ての信号(交差点)において $s_p = 0.5$ で一定とする。3通りの経路について1000番目の信号に到着した時間を計算する。以下、式(3)の第2項で示される移動所要時間1を除いた $T(1000) - 1000$ を旅行時間として示す。

図3に3通りの経路についてサイクルタイム T_s に対する到着時間 $T(1000) - 1000$ を示す。図3(a), (b), (c)はそれぞれ直線, ジグザグ, ランダム経路の無次元化した旅行時間を示す。図3(d)は3つの経路の旅行時間を比較したものである。

直線経路では旅行時間はサイクルタイムに対して刃状分布を示す。

ジグザグ経路では両方向の信号が交互に変化する。旅行時間は $T_s < 2.0$ ではサイクルタイムに対して刃状分布となる。 $T_s > 2.0$ では必ず全信号において車は赤で停車するので、サイクルタイムに比例して停車時間が長くなる。それゆえに旅行時間は T_s に対して直線的に増加する。

ランダム経路では旅行時間は直線経路の刃状分布とジグザグ経路の直線分布の組み合わせとなる。

選択経路により旅行時間は大きく異なるが旅行時間が選択経路に依存しないサイクルタイムも存在する。点aから点bの範囲でジグザグ経路の旅行時間は直線経路と一致する。ランダム経路の旅行時間は点fから点gの範囲で直線経路とジグザグ経路よりも早くなり、点dから点eの範囲で直線経路よりも早くなるがジグザグ経路よりも遅くなる。点hを過ぎると直線経路の旅行時間はジグザグ経路とランダム経路よりも早くなる。点aを過ぎるとジグザグ経路の旅行時間は直線経路とランダム経路よりも大きくなる。サイクルタイムが小さいと選択経路や信号のサイクルタイムによる旅行時間の制御は難しくなるが、 $T(1000) - 1000 = 0$ すなわち、すべての信号を青信号で通過できるサイクルタイム T_s は経路を問わず一致する。

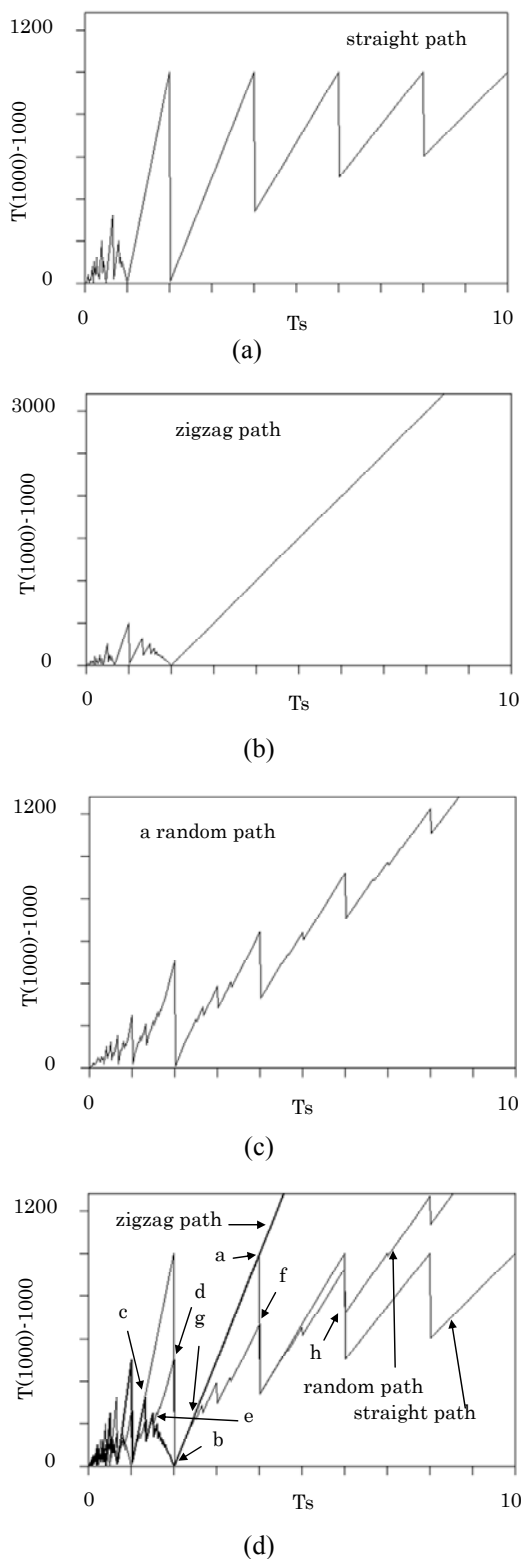


図3 信号 $n=1000$ におけるサイクルタイム T_s に対する $T(1000) - 1000$ のプロット図 (ここで, (a)直線経路, (b)ジグザグ経路, (c)ランダム経路(d) (a)-(c)の3つの経路を示す)

次に上述の条件の下, 信号間移動時間を計算する。信号(交差点) n から次の信号 $n+1$ への移動時間を $DT(n)$ とする。2次元の場合 $n=i+j$ となる (i ; x 方向の移動距離, j ; y 方向の移動距離)。

信号間移動時間 $DT(n)$ はサイクルタイムや選択経路により大きく変化する。図4は図3(a)における500

$500 \leq n \leq 1000$ 範囲内の直線経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図である。もし車が全て青信号を通過するならば、信号間移動時間は 1 の値をとる。 $T_s < 1$ 時に信号間移動時間は自己相似パターンを示す。 $1/(k+1) < T_s < 1/k$ (integer $k=1,2,3,\dots$) の範囲で、 T_s が大きくなるにつれて、車は信号で毎回停車、2 回に 1 回、3 回に 1 回...と停車回数が減少していく。 T_s が $1/k$ に近づいた時は滅多に車は停車しなくなる。また T_s が $1/k$ を少しでもこえると車は必ず停車する。信号間移動距離が 1 であるので、 $1/(k+1) < T_s < 1/k$ の範囲において整数倍で繰り返されるため、自己相似パターンが発生する。図 5 は図 3(b)における $500 \leq n \leq 1000$ 範囲内のジグザグ経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図である。図 5 は図 4 と類似している。図 5 のパターンはスケールファクター 1/2 をかけると図 4 と一致する。

図 6 は図 3(c)における $500 \leq n \leq 1000$ 範囲内のランダム経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図である。信号間移動時間は $T_s=2/k$ (integer $k=1,2,3,\dots$) の時 2, $T_s=4/3, 4/5$ の時 3, $T_s=2/k$ と $T_s=4/3, 4/5$ を除いては複数值をとる。それ故、ランダム経路における信号間移動時間は複雑なパターンを示す。ジグザグ経路におけるサイクルタイムに対する信号間移動時間は直線経路とジグザグ経路に対するものと大きく異なる。以上より信号間移動時間は選択経路とサイクルタイムに大きく依存する。

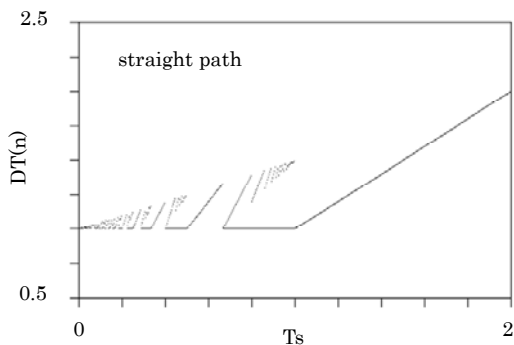


図 4 図 3(a)における $500 \leq n \leq 1000$ 範囲内の直線経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図

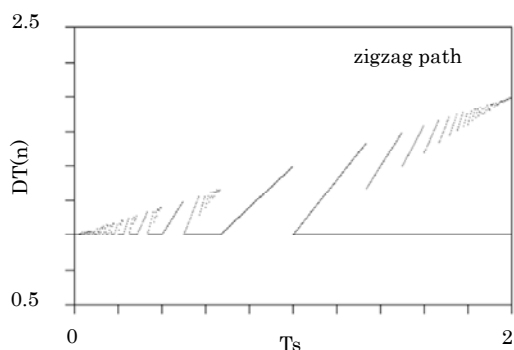


図 5 図 3(b)における $500 \leq n \leq 1000$ 範囲内のジグザグ経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図

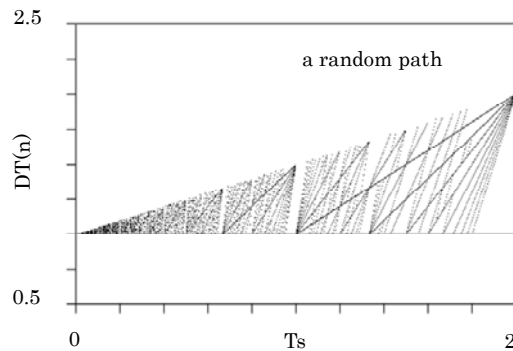


図 6 図 3(c)における $500 \leq n \leq 1000$ 範囲内のランダム経路でのサイクルタイムに対する信号間移動時間のプロット図

4 結言

信号制御された 2 次元都市交通網における車の運動に対する非線形写像モデルを提案した。このモデルを用いて数値シミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- 1) 2 次元都市交通網における車の運動を非線形写像モデルを用いて定式化した。
- 2) 2 次元都市交通網において一連の信号群を走行する車の旅行時間は選択経路及びサイクルタイムにより大きく異なることを明らかにした。
- 3) 信号のサイクルタイムに対する旅行時間の依存性は直線経路ではのこぎりの刃状の分布に、ジグザグ経路では直線分布に、ランダム経路ではよく直線経路とジグザグ経路の組み合わせとなることを示した。
- 4) 2 次元都市交通網における一連の信号群を走行する車の信号間移動時間は選択経路及びサイクルタイム依存性を明らかにした。

この研究は選択経路による旅行時間を見積もることができ、信号制御された 2 次元都市交通網においてドライバーの経路選択に役に立つと考えられる。この手法はカーナビゲーションシステムに応用可能な方法である。

参考文献

- 1) 西成活裕：渋滞学，新潮選書（2006）13-82.
- 2) T.Nagatani.: The physics of traffic jam, Rep. Prog. Phys. 65 (2002) 1331-1386.
- 3) K.Komada,T.Nagatani,2009 IEEE Toronto international conference procceding 66-71