

格子状道路網における交差・合流を考慮した自動車の経路の割り当て

三浦 英俊 柏木 伸哉
南山大学

(受理 2019 年 2 月 27 日; 再受理 2019 年 5 月 8 日)

和文概要 自動車の経路は右折(右側通行の国では左折)を避けることによって、目的地までの時間短縮効果がありコスト削減になることが一般に知られている [11][10]. 素朴な疑問として、右折を避けることによる効用を明示的に示すことはできるのだろうか. この疑問を「都市内の交通が円滑となる自動車の経路とはどのようなものだろうか」と、全体最適の視点から一般的な問題としてとらえることとし、この問題を格子状道路網モデルにおける自動車の発車時刻のスケジューリングを用いて考察する. 交差点を起点または終点とする移動需要を輸送する自動車を考えて、自動車の経路に最短経路を割り当てる. 最短経路が複数ある場合は経路割り当てルールとして (1) 左折, (2) 右折, (3) 外回り, (4) 交差・合流最小化, を設定する. そして、道路網を走行する複数の自動車が交差点やリンクで相互に安全上適切な車間距離や時間差を保持し、かつ目的地まで停止することなく一定速度で移動する制約を与えて、全ての自動車の走行が完了するまでの時間が最短となるように発車時刻のスケジューリングを行う. スケジューリングによって得られる、最初の自動車が出発してから全ての自動車が停止するまでの時間を「移動完了時間」とし、これを評価値として経路割り当てルールを比較する. 経路同士の交差および合流が多いほど移動完了時間が長くなることを明らかにし、とくに右折ルールは 4 つの経路割り当てルールのうちで移動完了時間が最も長くなることを示した.

キーワード: 交通, 最適化, スケジューリング, 格子状道路網モデル, 右折, 経路割り当て

1. はじめに

自動車の走行経路はなるべく右折をしないほど良い、とされている. 一般に右折車は交差点における右折待ちに時間がかかるうえ、直進車と衝突する危険がある. 左折車は右折車と比較して直進車と衝突する危険は小さく、右折車よりも円滑に交差点を通行することができる. 右折を避けることは、目的地までの時間短縮効果がありコスト削減にもなる. 社団法人全日本トラック協会はコスト削減の方法として左折運転を奨励している [11]. アメリカの運送会社 UPS がトラックの左折(右側通行なので)をなるべく避けることで年間に数億ドルの燃料費を節約したという報道がある [10].

このように安全や時間短縮のために左折が右折よりも優れていることはよく知られているわけだが、その理由として本研究は左折が右折よりも交差点において他の自動車の経路と交差や合流が少ないことに着目する. 交差や合流を考慮して経路選択をすることによる効用は都市全体でどのくらいあるのだろうか.

ところで、自動車の自動運転技術は近年急速に進展しており、公道を無人で自動車が走行することは遠い将来ではなさそうだ. すでに工場や倉庫などでは自律的に走行する無人搬送車による物資の輸送が一般的なものとなっている. 工場や倉庫だけでなく都市の道路を自動運転車が走行する時代が到来したとき、自動運転車は自律して走行するだけでなく、都市内の交通量が多い時間帯には、カーナビゲーションシステムなどによって、道路混雑を軽減させて全体として円滑な交通となるように経路を推薦されることになるだろう. そのような将

来において、自動運転車が右折をしない経路を選択することにはどのような意味があるのだろうか。

本研究は正方形都市に敷設された格子状道路網を用いて、起点から終点までの移動需要に経路を割り当てるルールを4つ設定し、どのような経路割り当てルールが優れているのかを比較することによってこれらの疑問について考える(図1)。出発地から目的地まで最短経路が1つしかなければ、途中で右折がいくつあろうとも右折しないことは合理的ではないが、格子状道路網には複数の最短経路があるので起点から終点への全ての移動に「右折しない最短経路」や「右折しか許さない最短経路」を割り当てることが可能となり、これらの比較から右折について、さらに自動車の経路と都市全体の円滑な交通について考察する。

都市で発生する流動とそれらの交差・合流を把握するための理論的研究については、矩形や円形の都市を対象に多くの研究がなされてきた。腰塚[6]と腰塚・今井[7]は交差点密度と移動時間やエネルギーとの関係を論じて望ましい交差点密度の存在を示した。流動の交差と合流は道路網の形状や交通主体の経路選択に大きく依存する。Holroyd[4]は稠密な格子状道路網における流動の交差の解析を行った。Holroyd[3]やHolroyd and Miller[5]は稠密な放射環状交通路モデルを用いた解析を行っている。Vaughan[14]にはこれらを含めて稠密な交通網モデルを用いた交通流動の解析的研究の成果が幅広く収められている。鈴木・三浦[13]は、さまざまな経路選択ルールを与えて稠密な格子状交通網と放射環状交通網における交差の密度分布を求めており、三浦・鈴木[9]は、(稠密でない)格子状ネットワークモデルにおける流動量と交差の分布を計算した。ただしこれらの研究は流動の合流に関する解析は行っておらず、これを踏まえて本研究では交差だけでなく合流も扱う。一方、都市内道路の自動車のルーティングとスケジューリングについて考察した研究も数多くある。交差点における交差・合流・衝突の回避を考察したAngelelliら[1]は混雑を回避するように自動車の経路を与える方法を提案し、放射環状道路網および実際の都市の道路網を用いたシミュレーションを行っている。Shenら[12]は都市を交通混雑状態から見て同質な地域に分割する方法を提案した。工場や港湾、倉庫などの無人搬送車のスケジューリングについても多くの研究がなされており、吉田ら[15]は工場内の無人搬送車の経路と運行計画スケジューリングの最適化手法の検討と実験を行った。Correaら[2]は、Constraint programmingと混合整数計画問題を用いて、工場内の無人搬送車のスケジューリング問題を解いている。

本研究はスケジューリングを用いて経路割り当てルールを比較する。まず移動需要の集合に対してそれらを輸送する自動車の経路をルールに従って与える。そして、経路の交差と合流に着目して、自動車同士が衝突することなく走行できるような発車スケジューリングを行い、全ての移動需要の移動が完了するまでの時間を比較する。

経路割り当てルールとして、移動需要の起点から終点まで複数の最短経路がある場合に、(1)左折ルール：左折が1回の経路、(2)右折ルール：右折が1回の経路、(3)外回りルール：左折、右折のうち道路網の中心からの距離が遠いほうの経路、(4)交差・合流最小化ルール：与えられた移動需要の集合に対して道路網全体で経路同士の交差及び合流の回数が最小となる経路を割り当てる、の4つを設定する。自動車に経路割り当てルールを適用して発車スケジューリングを行い、最初の自動車が出発してから全ての自動車が停止するまでの時間を移動完了時間と呼ぶことにして、これを評価値として経路割り当てルールを比較する。ただし道路網には信号はないものとする。これは信号による徐行や停止という「不確実性」を除いて、なるべく単純に経路割り当てルールによる違いを考察したい、というのが理由である。また、交差点に信号がある場合は右折が左折と比べて時間がかかることは明らかである

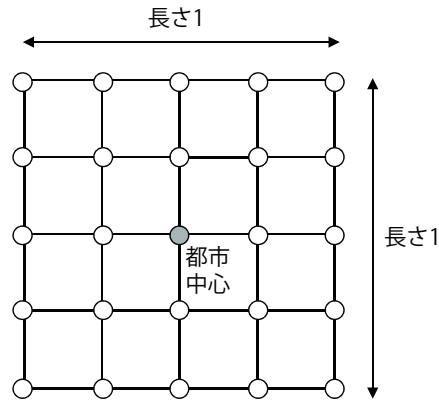


図 1: 格子状道路網を持つ都市モデル

が [8], 自動搬送車の走行する工場・倉庫や自動運転車だけが走行する信号のない未来都市において, どのような経路割り当てルールが優れているのかを比較・考察した研究は見当たらず, この点が本研究の特徴であるといえるだろう。

論文の構成は以下のとおりである。2章では格子状道路網モデルについて, 3章では経路の交差と合流について述べる。4章では経路割り当てルールについて説明し, 5章では道路網の交差点間に一様に移動需要が発生するとして経路選択ルールごとに移動需要に与える経路同士の交差・合流数を比較する。6章では, 複数の自動車が移動需要を輸送する状況を想定し, スケジューリングを用いて4つの経路選択ルールを比較する。7章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. モデル

図1のように長さ1の道路を縦横5本ずつ等間隔に並べた5×5格子状道路網を持つ都市を考える。道路はそれぞれ上りと下りの車線を持つ。交通ルールは左側通行とする。道路が交差する25個の点を交差点とする。都市の中心に位置する交差点を都市中心と呼ぶことにする。この道路網を, 交差点をノード, ノード間を結ぶ車線を有向リンク1本に対応させることとしてネットワークとしてモデル化する。移動需要は交差点ノードを起点または終点とする。これは展開する議論と計算を単純にするためのものである。実際の都市交通を観察したとき, 起点と終点は交差点よりもむしろリンク上にあることが多いようだ。リンク上を起点または終点とする場合と比較すると, 起点から最初の交差点までの移動, および最後の交差点から終点までの移動を切り捨てて交差点ノードを起点と終点としたとみなすことができるが, このとき, これらの交差点で発生する経路同士の交差と合流も切り捨てることになる。したがって, 実際の都市交通と比較して, 発生する交差と合流を少なく数えていることになる。道路網のノード, リンク, 移動需要, および経路の集合の記号を以下のように導入する。

V : ノードの集合

E : リンクの集合

I : 移動需要の集合 ($I \subseteq V \times V$)

J : 経路の集合

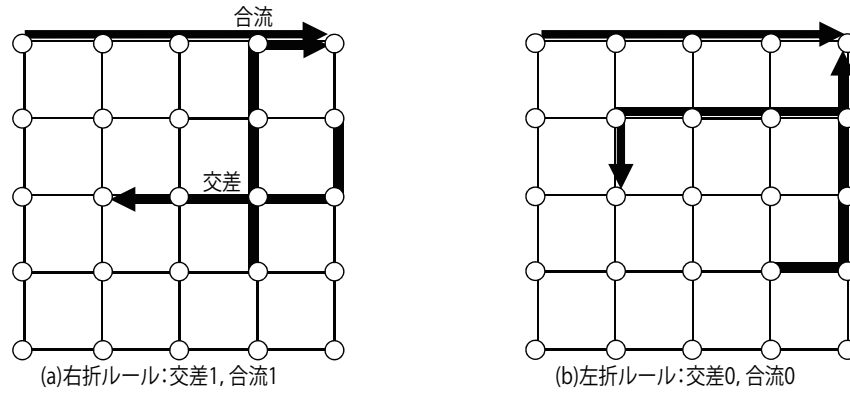


図 2: 3つの移動需要への異なる経路割り当てと交差・合流の例

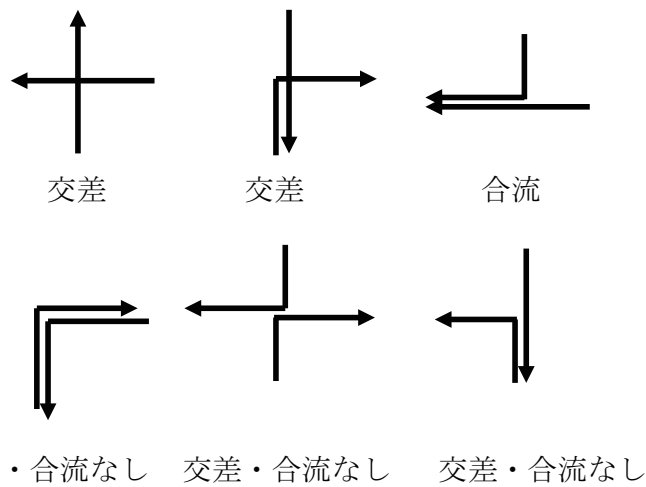


図 3: 2つの経路の交差と合流の例

移動需要は割り当てられた経路に沿って移動することを仮定する。格子状道路網において起点と終点が異なる「筋」にある場合、複数の最短経路がある。したがって移動需要に対して最短経路を割り当てることとしても数多くの割り当ての方法がある。

経路割り当ての違いによって道路網で発生する交差と合流の数に変化する。例として、図 2(a) に示す矢印は 1つの移動需要に右左折のない最短経路を、2つの移動需要に右折 1回の最短経路を割り当てたことを表している。このとき経路の交差と合流は各 1回ずつとなる。しかしこの 2つの移動需要に対して左折 1回の最短経路を割り当てるとき、交差も合流も生じない(図 2(b))。与えられた移動需要の集合に対して、経路割り当てを適切に行うことにより、経路同士の交差や合流を減らすことができる。交差や合流の数が少ないほどそれぞれの移動需要は円滑に移動できることが期待できて、都市全体として好ましい交通状態に近づくだらう。

なお、格子状道路網モデルを使う理由は、実際の都市道路網によく見られる典型的な道路網パターンであることと、距離で比較したときに選択できる複数の最短経路が存在する状況が経路割り当てルールを比較する際に自然だからである。一般の道路網では厳密な意味で最短経路が複数存在することはないので、これから述べる解析方法はもし一般の道路網に適用する場合には、最短距離に適当な距離を加えた範囲の複数の経路を選ぶとよいだろう。

表 1: 交差点に進入する 2 つの経路の交差・合流

	正面から				左から				右から			
	直進	左折	右折	Uターン	直進	左折	右折	Uターン	直進	左折	右折	Uターン
直進 ↑			交差	合流	交差	合流	交差		交差		合流	
左折 ←			合流					合流	合流			
右折 →	交差	合流			合流		交差		交差		交差	合流
Uターン ↻	合流						合流			合流		

3. 経路の交差と合流

3.1. 交差と合流の定義

本研究では経路の交差と合流はどちらも交差点で発生することとし、以下のように定義する。

- 交差：2つの経路が異なる方向から交差点に進入し、交差点で経路が重なった後に異なる方向へ退出する
- 合流：2つの経路が異なる方向から交差点に進入し、同じ方向へ退出する

図3に交差，合流，および交差も合流もないときの例を示す。表1は十字路交差点において下から交差点に進入する経路に対して正面から・左から・右からそれぞれ進入する経路と交差もしくは合流する場合を整理したものである。T字路交差点では「正面から」の交差点への進入を除外すればよい。交差点に進入した経路は直進・左折・右折・Uターンの4方向のいずれかを選択する。このとき正面から・左から・右からの3方向から進入する経路と交差または合流する可能性がある。交差点が起点または終点である場合はほかの経路と交差または合流することはないものとする。ここでUターンを表中に記載してあるのは、経路にUターンを含む場合にも対応するためである。6章で述べるシミュレーション実験ではUターンを含む経路を扱う。

3.2. 交差と合流の判定

経路同士の交差と合流の判定は、2つの経路の交差点への流入リンクと流出リンクを用いて以下のように行う。

経路が通るリンクを起点から数えて順に番号を振り、経路 j が u 番目に通るリンクを $l_{j,u}$ と表す。リンク $l_{j,u}$ の終点を、始点または終点として共有するリンクは図4に示す通り最大で7つあるのでそれらを以下のように表す。

- $l_{j,u}^{(t)}$: $l_{j,u}$ の終点を始点として $l_{j,u}$ から直進方向へ進むリンク
- $l_{j,u}^{(f)}$: $l_{j,u}$ の終点を終点とする $l_{j,u}$ の正面向きのリンク
- $l_{j,u}^{(b)}$: $l_{j,u}$ の始点と終点を入れ替えた $l_{j,u}$ と逆向きのリンク
- $l_{j,u}^{(l.out)}$: $l_{j,u}$ の終点を始点として $l_{j,u}$ から左折方向へ進むリンク

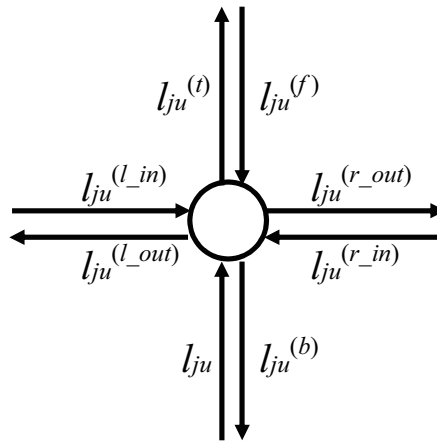


図 4: 経路 j が u 番目に通るリンク $l_{j,u}$ および関連するリンク

- $l_{j,u}^{(l_in)}$: $l_{j,u}$ の終点を終点として $l_{j,u}$ の左から来るリンク
- $l_{j,u}^{(r_out)}$: $l_{j,u}$ の終点を始点として $l_{j,u}$ から右折方向へ進むリンク
- $l_{j,u}^{(r_in)}$: $l_{j,u}$ の終点を終点として $l_{j,u}$ の右から来るリンク

ある交差点への流入リンクをリンク $l_{j,u}$ とすると、次のリンク $l_{j,u+1}$ はその交差点からの流出リンクである。ここで、例えば $l_{j,u+1} = l_{j,u}^{(t)}$ のとき経路 j は交差点を直進することを表し、 $l_{j,u+1} = l_{j,u}^{(l_out)}$ のとき交差点を左折することを表している。2本の経路をそれぞれ j_1, j_2 としたとき、4本のリンク $l_{j_1,u}, l_{j_1,u+1}, l_{j_2,v}, l_{j_2,v+1}$ の相対的な位置関係によって j_1 と j_2 の交差と合流を判定する。表 2 は表 1 に示した経路の交差・合流の判定を行うための条件を整理したものである。

4. 移動需要への経路の割り当て

移動需要の起点から終点への経路に最短経路を割り当てるとき、最短経路が複数ある場合の経路割り当てルールを 4 つ用意する。

1. 左折ルール：最短経路のうち左折回数 1 回の経路を割り当てる。
2. 右折ルール：最短経路のうち右折回数 1 回の経路を割り当てる。
3. 外回りルール：左折回数 1 回の経路と右折回数 1 回の経路のうち都市中心との距離が最大となる経路を割り当てる。これを外回り経路と呼ぶ。ただし両経路の都市中心との距離が等しい場合は左折回数 1 回の経路を割り当てる。なお経路と都市中心との距離とは、経路上の点と都市中心との距離のうち最短となる距離のことである。

図 5 は例としてノード A から B への右左折回数が合計 1 回以下の最短経路を図示したものである (A から B への最短経路の数は $5!/(2!3!) = 10$)。これらのうち、左折 1 回経路は都市中心との距離が 0.25 であり、右折 1 回経路は都市中心との距離が $0.25\sqrt{2}$ となるので、右折 1 回経路が外回り経路となる。外回り経路は最短経路のうち都市中心から最も離れた経路である。外回り経路は Holroyd[4] による稠密な格子状道路網を用いた解析によって経路同士の交差が少ない経路割り当てルールであることが知られている。

4. 交差・合流最小化ルール：道路網全体の経路同士の交差と合流の回数が最小となるように、移動需要に左折回数 1 回の経路と右折回数 1 回の経路のどちらかを割り当てる。この割り当てを求めるために、

表 2: 経路 j_1 と経路 j_2 の交差・合流の判定

経路 j_1	経路 j_2	j_1 と j_2 の交差/合流	条件
直進	正面から右折	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
直進	正面から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$
直進	左から直進	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$
直進	左から左折	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$
直進	左から右折	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$
直進	右から直進	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
直進	右から右折	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$
左折	正面から右折	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
左折	左から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
左折	右から直進	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
右折	正面から直進	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$
右折	正面から左折	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$
右折	左から直進	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$
右折	左から右折	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$
右折	右から直進	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(l.out)}$
右折	右から右折	交差	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(t)}$
右折	右から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(r.out)}$
U ターン	正面から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(f)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$
U ターン	左から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(l.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$
U ターン	右から U ターン	合流	$l_{j_1,u+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$ かつ $l_{j_2,v} = l_{j_1,u}^{(r.in)}$ かつ $l_{j_2,v+1} = l_{j_1,u}^{(b)}$

J_i : 移動需要 i の起点から終点への経路のうち左折と右折の回数が合わせて 1 回以下の最短経路の集合 ($i \in I$)

を導入する.

$f_{j_1 j_2}$: 経路 j_1 と j_2 の交差・合流数 ($j_1, j_2 \in \bigcup_{i \in I} J_i$)

を表 2 より求めてパラメータとし,

$$p_{ij} = \begin{cases} 1: \text{移動需要 } i \text{ の経路を経路 } j \text{ に割り当てる} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (i \in I, j \in J_i)$$

を移動需要へ経路の割り当てを与える決定変数として, 以下の 2 次整数計画問題 A を

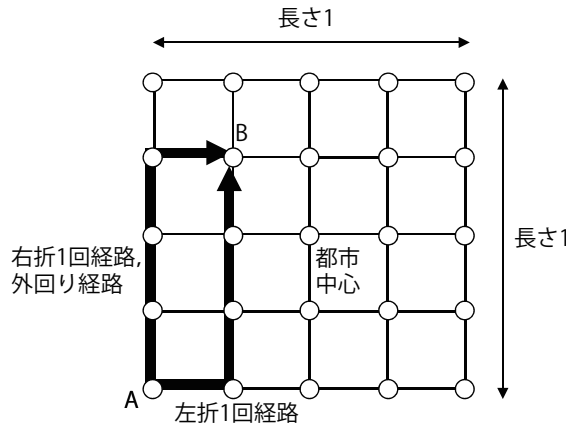


図 5: 最短経路の例

解く.

問題 A

$$\text{minimize } F = \sum_{i_1 \in I} \sum_{i_2 \in I} \sum_{j_1 \in J_{i_1}} \sum_{j_2 \in J_{i_2}} p_{i_1 j_1} p_{i_2 j_2} f_{j_1 j_2} \quad (4.1)$$

subject to

$$\sum_{j \in J_i} p_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$p_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (4.3)$$

交差・合流数 $f_{j_1 j_2}$ は 0, 1, 2 のいずれかである. F は道路網全体の経路の交差・合流数の合計を表し, 式 (4.1) はこれを最小化することを目的とする. 式 (4.2) は移動需要はいずれかの経路に割り当てられることを, 式 (4.3) は変数 p_{ij} の 0-1 制約を, それぞれ表している.

5. 都市内で一様に発生する移動需要の経路同士の交差・合流数

都市内で一様に発生する移動需要に経路割り当てルールを適用して, 経路割り当てルールと都市内に発生する交差・合流の数の関係を調べる.

都市内の全ての交差点ペアを起点または終点とする移動需要を I ($|I| = 25 \times 24 = 600$) とする. この移動需要の集合 I の各移動需要に経路割り当てルールを適用したとき経路同士の交差・合流数の合計は表 3 のようになる. 右折ルール割り当ては左折ルールと比べて交差・合流数が約 4 割多い. 左折, 右折, 外回りのなかでは, 外回りルールの交差・合流数が最も少ない. 外回りルールによる都市中心部から離れた経路の割り当ては, 都市中心部の流動量が減少することはすでに知られているが [13], 都市全体の交差・合流数も少ないことが明らかとなった. 交差・合流最小化となる経路割り当てによって, 交差・合流数は左折ルールの場合の約 6 割となる. 都市内で発生する移動需要があらかじめ分かっており, 問題 A を解いて交差・合流数が最小となる経路の割り当てを求めることができれば, 左折ルールよりも少ない交差・合流数を実現することが可能となる. なおこのときの交差・合流数 8670 は, 左折と右折の回数が合わせて 1 回以下の最短経路の集合から 1 つを選んで移動需要に割り当てた結果であるが, 2 回以上右左折する最短経路を含むあらゆる最短経路から経路を割り当てた問題を解くと, 交差・合流数はさらに減少して 8518 となる.

表 3: 経路割り当てルール別交差・合流総数

経路割り当てルール	左折	右折	外回り	交差・合流最小化
交差・合流数合計	15600	21600	11224	8670

なお、実際には都市内の移動需要は必ずしも一様ではないが、単純な移動需要発生を仮定することにより経路割り当てルールの比較が容易となる。実際の交通のように起点終点ごとに移動需要量すなわち流量が異なる場合には、経路同士の交差・合流数に、さらにそれぞれの経路の流量の積を掛ければよい。

6. 移動需要を輸送するタクシーの発車時刻スケジューリング実験

6.1. スケジューリング実験の概要

前章では都市内で一様に発生する移動需要に4つの経路割り当てルールを適用して交差・合流数を比較した。本章では経路を走行する自動車を考える。経路の交差や合流を考慮して自動車同士が安全に走行するための自動車の発車時刻スケジューリング実験を行い、移動需要を輸送する全ての自動車の走行が完了するまでの時間が経路割り当てルールによってどのように変化するのか考察する。

自動車は全て一定速度で走行し、途中で停止や減速しないと仮定する。交差点とリンク上で他の自動車と安全な距離を保持しつつ通行する制約の下で、全ての自動車が移動を完了するまでに必要な時間を移動完了時間とよぶことにして、数理計画問題を用いて移動完了時間が最も短くなるように発車時刻のスケジューリングを行う。この実験の目的は、移動完了時間が短いほど円滑な交通状態であると考えて、円滑な交通となる経路割り当てルールとはどのようなものか調べることである。

2章の図2を用いて考察する問題の簡単な例を説明する。図2(a), (b)ともに3本の経路の長さは全て1なので、経路に沿ってそれぞれ3台の自動車と同時に出発すれば、(a), (b)とも同じ時刻に移動が完了するように見える。しかし(a)の経路に沿って同時に自動車が出発すると、合流する交差点で2台の自動車は衝突するので、どちらかの自動車の発車時刻を遅くする必要がある。一方で(b)では3台とも交差や合流なく円滑に走行する。したがって(a)は(b)に比べて移動完了時間が長くなり、これは経路割り当ての違いによる交差および合流に起因しているのである。

6.2節では、スケジューリングを行うためのモデルについて、概要と仮定について述べる。6.3節では、スケジューリングを行う混合整数計画問題を定式化する。6.4節では、問題を解いて得られた結果を用いて考察する。なお実験は数理最適化ソルバー SCIP version 6.0.0を用いて行った。

6.2. 2つの実験

図1の都市モデルに信号がなく経路の割り当てが可能な自動車だけが走行していると仮定する。都市内に「起点終点間の道のり距離が0.5以上の移動需要」をランダムに N 個発生させて移動需要の集合 I を作成し、移動需要の起点から終点へ自動車に客を輸送する。ここで取り扱わない「道のり距離が0.5未満の移動需要」とは、隣接する交差点ペアを起点と終点とする移動需要であり、隣接する交差点間を走行する限り、その(最短)経路はほかの経路と交差も合流も生じないので、経路割り当てルールを比較する際に含めないほうが適切であると考えてあらかじめ除いておくのである。自動車の速度は一定で1とし、途中で減速や停止

することはない。あらかじめ起点から終点への経路を割り当て、経路が交差または合流する交差点では自動車同士が安全な通過時間差を保持する制約と、リンク上で自動車同士の安全な車間距離を保持する制約を与えて、最初の自動車の出発から最後の自動車の移動完了までの時間が最短となるように自動車発車時刻スケジューリングを行う。

2種類の実験を行う。第1の起点終点間輸送スケジューリングは、一般の自動車が都市内を走行することを想定し、移動需要の起点から終点まで走行する自動車に4章で述べた方法で経路の割り当てを行い、自動車の発車時刻のスケジューリングを行う。

第2のタクシー営業所発着スケジューリングは、都市中心にタクシー営業所を配置して、自動車としてタクシー(あるいは工場・倉庫内の自動搬送車)を想定し、営業所から出発したタクシーが移動需要の起点から終点まで客を輸送したのちに営業所まで戻るまでの閉路を走行する自動車のスケジューリングを行う。起点、終点における客の乗降時間は0と仮定する。この実験は未来都市の自動タクシーを想定したものであり、また、都心に起終点の端点が多い場合を模した実験という目的もある。

タクシー営業所発着スケジューリングでは、営業所→起点、起点→終点、終点→営業所、の3本の最短経路によって構成される閉路を走行する自動車を扱う。次のように経路割り当てルールを用いて閉路となる経路を構成する。

1. 左折ルール：営業所→起点、起点→終点、終点→営業所、の経路全てに左折回数1回経路を割り当てる。経路全体を左折閉路と呼ぶ。
2. 右折ルール：営業所→起点、起点→終点、終点→営業所、の経路全てに右折回数1回経路を割り当てる。経路全体を右折閉路と呼ぶ。
3. 外回りルール：営業所→起点、起点→終点、終点→営業所、の経路全てに外回り経路を割り当てるが、都市中心に営業所があるため、営業所→起点と終点→営業所の経路については左折回数1回経路と右折回数1回経路がともに外回り経路となるので、左折1回経路を割り当てる。経路全体を外回り閉路と呼ぶ。
4. 交差・合流最小化ルール：移動需要 $i (i \in I)$ についての左折閉路、右折閉路、外回り閉路からなる集合 J'_i を作成し、 J'_i を二次整数計画問題 A の最短経路の集合 J_i と置き換えて、閉路同士の交差・合流数が最小となるように移動需要に閉路の割り当てを行う。割り当てた経路を交差・合流最小化閉路と呼ぶ。

図6にタクシー営業所発着スケジューリングにおける閉路の例を示す。起点、終点、タクシー営業所とそれらを結ぶ経路を図示した。左折閉路は、営業所→起点、起点→終点、終点→営業所がすべて左折1回経路(破線)によって構成される。右折閉路は、営業所→起点、起点→終点、終点→営業所がすべて右折1回経路(実線)によって構成される。外回り閉路は営業所→起点が破線、起点→終点が実線、終点→営業所が破線となる経路によって構成される。

6.3. スケジューリング問題の定式化

混合整数計画問題を用いて自動車のスケジューリングを行う。まず

I_j : 経路 j に含まれる交差点ノードの集合 ($j \in J$)

として、以下のように自動車の出発時刻や所要時間に関するパラメータを導入する。移動需要 i と経路 j を区別して、パラメータ p_{ij} によって両者の結びつきを記述する。

$$p_{ij} = \begin{cases} 1: \text{移動需要 } i \text{ の自動車は経路 } j \text{ を走行する} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (i \in I, j \in J)$$

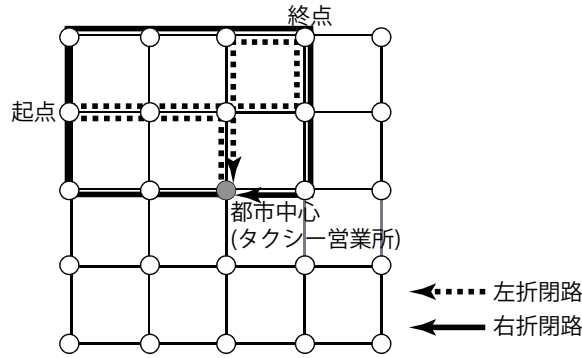


図 6: タクシー営業所発着経路

d_j : 経路 j を走行する自動車の出発から停止までの移動時間 ($j \in J$)

$$a_{jk} = \begin{cases} \text{経路 } j \text{ を走行する自動車が出発後ノード } k \text{ に至るまでの時間 } (j \in J, k \in I_j) \\ \text{十分大きい正数 } M (j \in J, k \notin I_j) \end{cases}$$

n_h : リンク h の終点ノード ($n_h \in V, h \in E$)

$$b_{j_1 j_2 k} = \begin{cases} 1: \text{経路 } j_1 \text{ と } j_2 \text{ がノード } k \text{ で交差または合流する} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (j_1, j_2 \in J, k \in V)$$

$$c_{j_1 j_2 h} = \begin{cases} 1: \text{経路 } j_1 \text{ と } j_2 \text{ がともにリンク } h \text{ を利用する} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (j_1, j_2 \in J, h \in E)$$

s_b : ノードで交差または合流する経路を走行する 2 台の自動車が安全に通行できる時間差

s_c : リンクを共有する経路を走行する 2 台の自動車が安全に通行できる時間差

決定変数は,

t_i : 移動需要 i を輸送する自動車の出発時刻 ($i \in I$)

とする.

以上の記号を用いて, スケジューリングを行う混合整数計画問題 B を以下のように定式化する.

問題 B

$$\text{minimize } T = \max_{i \in I, j \in J} t_i + p_{ij} d_j \quad (6.1)$$

subject to

$$|(t_{i_1} + a_{j_1 k}) - (t_{i_2} + a_{j_2 k})| \geq s_b p_{i_1 j_1} p_{i_2 j_2} b_{j_1 j_2 k} \quad (6.2)$$

$$|(t_{i_1} + a_{j_1 n_h}) - (t_{i_2} + a_{j_2 n_h})| \geq s_c p_{i_1 j_1} p_{i_2 j_2} c_{j_1 j_2 h} \quad (6.3)$$

$$t_i \geq 0 \quad (6.4)$$

$$(\forall i, \forall i_1, \forall i_2 \in I, \forall j_1, \forall j_2 \in J, \forall k \in V, \forall h \in E)$$

目的関数 (6.1) の $t_i + p_{ij} d_j$ は移動需要 i を輸送する自動車が経路 j を走行したときの到着時刻を表しており, 最後に停止する自動車の停止時刻 T が先に述べた移動完了時間に当たる. パラメータ p_{ij} は経路割り当てルールに従って割り当てられた移動需要 i の経路を表してお

り、2種類の実験それぞれについて経路または閉路の割り当てを行う。式(6.2)は2台の自動車が交差点で交差・合流の時間差を確保する条件を表しており、移動需要 i_1 の経路 j_1 と移動需要 i_2 の経路 j_2 がノード k で交差または合流するならば、それぞれの移動需要を輸送する自動車のノード k の通過時間差は s_b 以上としなければならない。右辺にある $p_{i_1j_1}$, $p_{i_2j_2}$, $b_{j_1j_2k}$ が全て1の場合のみ意味のある制約となっている。式(6.3)は2台の自動車が同じリンクを走行するときの時間差を確保する条件であり、移動需要 i_1 の経路 j_1 と移動需要 i_2 の経路 j_2 がリンク h を共有するとき、それぞれの移動需要を輸送する自動車のノード n_h における通過時間差は s_c 以上必要である。最後に式(6.4)は、自動車の移動開始は時刻0以降である条件を表す。

ただし、(6.2)は十分大きい正数 M と0-1変数 $y_{i_1i_2k}$ を導入し、離接制約を用いて、絶対値符号を使わずに同じ内容の条件となる2本の線形制約

$$s_b p_{i_1j_1} p_{i_2j_2} b_{j_1j_2k} + ((t_{i_1} + a_{j_1k}) - (t_{i_2} + a_{j_2k})) \leq M y_{i_1i_2k} \quad (6.5)$$

$$s_b p_{i_1j_1} p_{i_2j_2} b_{j_1j_2k} - ((t_{i_1} + a_{j_1k}) - (t_{i_2} + a_{j_2k})) \leq M(1 - y_{i_1i_2k}) \quad (6.6)$$

に置き換える。同様に(6.3)についても0-1変数 $y_{i_1i_2n_h}$ を導入して、

$$s_c p_{i_1j_1} p_{i_2j_2} c_{j_1j_2h} + ((t_{i_1} + a_{j_1n_h}) - (t_{i_2} + a_{j_2n_h})) \leq M y_{i_1i_2n_h} \quad (6.7)$$

$$s_c p_{i_1j_1} p_{i_2j_2} c_{j_1j_2h} - ((t_{i_1} + a_{j_1n_h}) - (t_{i_2} + a_{j_2n_h})) \leq M(1 - y_{i_1i_2n_h}) \quad (6.8)$$

を代わりに使う。

なお、信号がない都市モデルを用いて実験を行うのは、自動運転車が走行するような未来社会を想定していることが理由であるが、現実の都市交通との対応については、信号や交通ルールによる徐行や停止に関わる「不確実性」を除いて実験を行い、なるべく単純に経路割り当てルールによる違いを実験で確かめたい、というのが理由である。

6.4. 実験結果と考察

$N = 25$ 台の自動車同士が、経路が交差・合流する交差点を $s_b = 0.3$ 以上の時間差となるように通過し、経路がリンクを共有する場合には $s_c = 0.1$ 以上の時間差となるように車間距離を空けて、速度1で走行するというパラメータ設定の下に実験を行った。交差点間の距離は0.25であるから $s_b = 0.3$ はかなりゆとりを持った設定であるが、交差点における交差・合流の発生による移動完了時間が経路割り当てルールによってどのくらい異なるのかを明確に見たいため、このように設定した。

表4は移動需要の集合 I を20セット作成してスケジューリング実験を行った結果を示す。各行は、1つの移動需要集合に対して4つの経路割り当てルールごとに2種類の実験を行ったときの移動完了時間を表している。スケジューリング実験による移動完了時間を評価値として、右折ルールによる経路がどの程度効率的でないのか、他の経路割り当てと比較する。なお、交差・合流最小化となる経路の組合せを求める問題Aの解は必ずしも唯一ではなく、したがって別の解を用いてスケジューリングを行ったとき移動完了時間は異なる可能性がある。ここで示す結果は、問題Aの解のうちの1つを用いて問題Bを解いた結果を示してあることに留意していただきたい。

起点終点間輸送スケジューリングの結果を見ると、右折ルールのほうが左折ルールよりも移動完了時間が短い場合が4つあり(表中⁺)、交差・合流最小化が4つのルールのうちで最小となっていない場合が3つあるが(表中^{*})、最下行に記載した移動完了時間の平均値は5

章の表3と同様に右折ルールの時が最大で、右折、左折、外回り、交差・合流最小化の順に小さくなる。交差・合流回数は、時間を無視して自動車を通る経路同士が交差または合流する回数を数えたものなので、時間を考慮して、自動車の相対的な位置を考慮してスケジューリングを行うと、このように交差・合流最小化した解よりも移動完了時間が短くなる経路の組合せはありうる。この結果から、都市内に一様に移動需要が発生するとき、スケジューリングによって移動完了時間を短くするためには左折ルールによる一定の効果があり、交差・合流数が最小となる経路の割り当てと外回り経路は同じ程度に有効であることが明らかとなった。

右折ルールは左折よりも平均で時間0.11(6%)ほど移動完了時間が長いですが、この数値の差はパラメータ値の設定と自動車の台数にも依存するので、実際の道路網や自動車台数を用いて議論するためにはより詳細な実験が必要となるだろう。

表4右側に示したタクシー営業所発着スケジューリングの結果も同様の結果を示しているが、右折ルールが左折よりも移動完了時間が短い場合や交差・合流最小化ルールが最小となっていないといった「逆転現象」は起こらなかった。移動完了時間の平均値は、左折ルールの場合を100として右折120.3、外回り99.5、交差・合流最小化96.4であり、起点終点間輸送スケジューリングのときよりも経路割り当てルール間の相対的な差が大きい。これは、タクシー営業所発着スケジューリングのほうが自動車(タクシー)の移動距離が長く、また都市中心に配置した営業所周辺の道路の自動車走行台数が多いことから、経路の交差や合流が起点終点間輸送スケジューリングよりも多く発生しており、これが自動車のスケジューリングに影響しているためと考えられる。これは裏返せば、自動車の密度の低い道路網では右折ルールでも左折ルールよりも良い発車スケジュールが得られる可能性が一定程度あることを説明している。

図7は20セットの実験についての交差・合流数と移動完了時間の散布図を、表5は経路の交差・合流数と移動完了時間の平均を示す。これらを用いて経路割り当てルールごとの交差・合流数と移動完了時間の相関を調べる。交差・合流数と移動完了時間には、経路割り当てルールや2種類の実験の違いに関わらず、一定の相関関係が認められる。タクシー営業所発着スケジューリングは、交差・合流数が起点終点間輸送スケジューリングよりも大幅に増加し、特に右折ルールでは移動完了時間がほかの3ルールの1.5倍から2倍程度となる。

以上の実験結果から、スケジューリングによって短い移動完了時間を得るためには、交差・合流数をなるべく少なくするほうがよく、そのためには右折を含む経路は不利で、左折や外回りによる経路割り当てが望ましく、交差・合流最小化となる経路割り当てが最も優れている、ということが明らかとなった。さらに、都市内で発生する移動需要があらかじめ分かっており、交差・合流が最小となる経路の割り当てを求めることができれば、左折ルールよりも少ない交差・合流数を実現することが可能となるだろう。

7. おわりに

本稿は、どのような経路が移動需要全体の交通を円滑にすることができるのかという問題を、経路の交差と合流に着目し、経路割り当てルールを4つ設定して、スケジューリング問題を用いて解析した。解析に先立ち、経路の交差点への流入リンクと流出リンクの組み合わせを用いて、直進・左折・右折・Uターンの組合せごとに交差または合流を判定する方法を示した。次に、格子状道路網を持つ正方形都市内に一様に移動需要を想定して都市全体の交差・合流数を数え上げ、右折ルールで経路割り当てを行うと、左折ルールの場合と比べて交

表 4: 2つの実験による移動完了時間

セット番号	起点終点間輸送スケジューリング				タクシー営業所発着スケジューリング			
	左折	右折	外回り	交差・合流最小化	左折	右折	外回り	交差・合流最小化
1	1.75	1.90	1.75	1.75	4.20	5.10	4.30	4.20
2	1.85	1.80 ⁺	1.75	1.75	4.30	4.90	4.20	3.90
3	2.00	2.10	2.00	2.00	4.50	4.90	4.40	4.20
4	1.85	1.85	1.55	1.55	4.40	5.10	4.40	4.30
5	1.75	2.35	1.75	1.75	4.10	5.30	4.20	4.00
6	2.10	1.95 ⁺	1.80	1.70	4.40	5.10	4.40	4.20
7	1.60	1.85	1.60	1.65 [*]	4.10	5.40	4.10	4.10
8	1.80	1.90	1.80	1.80	4.10	5.30	4.30	4.10
9	1.65	1.85	1.50	1.50	3.90	4.70	3.80	3.70
10	1.60	1.75	1.50	1.55 [*]	3.70	4.90	3.80	3.80
11	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	4.70	4.10	4.00
12	1.60	1.95	1.60	1.55	4.10	5.10	4.10	4.10
13	1.80	1.65 ⁺	1.60	1.60	4.00	4.80	3.90	3.90
14	1.75	1.90	1.75	1.75	4.10	4.50	3.90	3.80
15	2.05	2.00 ⁺	2.00	2.00	4.10	5.30	4.10	4.00
16	1.85	1.95	1.75	1.80 [*]	4.70	4.90	4.60	4.20
17	1.75	1.85	1.75	1.75	3.60	4.70	3.80	3.60
18	1.60	1.80	1.60	1.60	3.80	4.90	3.60	3.60
19	1.80	1.85	1.75	1.75	4.20	5.10	4.00	3.80
20	1.90	1.85	1.85	1.85	4.30	4.70	4.20	4.00
平均 (標準偏差)	1.80 (0.149)	1.91 (0.140)	1.73 (0.150)	1.73 (0.148)	4.13 (0.259)	4.97 (0.241)	4.11 (0.249)	3.98 (0.202)

差・合流数が4割増加することを示した。続いて、道路網の交差点間に発生する移動需要を輸送する自動車が、交差点やリンクで相互に安全上適切な車間距離や時間差を保持し、かつ目的地まで停止することなく一定速度で移動する制約を与えて、全ての自動車の走行が完了するまでの時間が最短となるように発車時刻のスケジューリング実験を行った。移動需要の起点から終点まで自動車輸送する起点終点間輸送スケジューリング実験を行って、全ての自動車が移動完了するまでにかかる時間が、右折ルールは左折ルールと比較して平均して1割程度増加することを示した。都市中心にタクシーの営業所を配置し、移動需要を営業所を出発して再び戻ってくるタクシーの出発時刻をスケジューリングするタクシー営業所発着スケジューリング実験によって、自動車の移動完了時間が、左折ルールの場合と比較して、右折ルールは2割程度増加することを明らかにした。

以上の結果は、著者らの直感とおおよそ一致したものであったが、自動車の経路と発車時刻をモデリングによって記述して数値的に示した点に本研究の意義があったものと考えている。とくに、自動車の移動完了時間が交差・合流数とおおよそ比例して増加し、右折ルールの場合にとくに交差・合流数が増加することは強調しておきたい。

今後の課題について述べる。6章で述べたタクシー営業所発着スケジューリングの交差・合流最小化ルールでは、営業所を出発してから戻るまでの閉路に左折閉路、右折閉路、外回り閉路のいずれかを割り当てた。しかし営業所→起点、起点→終点、終点→営業所のそれぞれについて、左折、右折、外回りの異なる経路を適用するほうが交差・合流数を小さくでき

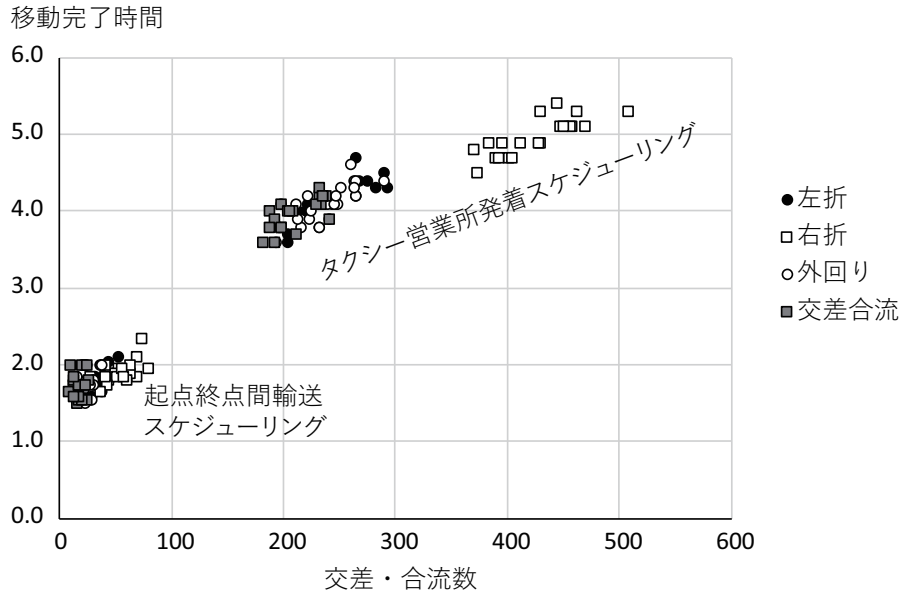


図 7: 交差・合流数と移動完了時間の散布図

表 5: 20 セットの実験についての交差・合流数の平均値

平均	起点終点間輸送スケジューリング				タクシー営業所発着スケジューリング			
	左折	右折	外回り	交差・合流最小化	左折	右折	外回り	交差・合流最小化
交差・合流数	33.5	54.6	23.5	17.9	242.6	425.6	240.8	212.6
移動完了時間 (再掲)	1.80	1.91	1.73	1.73	4.13	4.97	4.11	3.98

るだろう。問題の規模が大きくなるので実用的な計算時間で解を得ることができなかつたため、今後の課題としたい。

本研究の解析は、自動運転車が走行する未来の都市道路や無人搬送車による物資の輸送を行う工場や倉庫を想定し、道路網の信号はないものと仮定して行った。これは、移動需要の経路に焦点を当てるための単純化でもあったわけだが、実際の道路は当然ながら信号があり、混雑による渋滞が発生する。自動車の経路や速度は各々異なり、自動車の目的地が明らかとなっている場合は多いとは言えない。これらをモデルに組み込み効率よい解析を行って見通しの良い結果が得られるような工夫を行う必要がある。

本研究で行ったスケジューリングは全ての自動車の発車時刻を一度に決定する同時スケジューリングである。より現実に接近するスケジューリング実験として、時間軸上にランダムに移動需要が発生するとして、そのたびごとに1台ずつ自動車の発車時刻と経路を決定する逐次スケジューリングに取り組みたい。

謝辞

匿名の査読者から、問題の記述や結果の解釈について大変貴重なコメントをいただくことができました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] E. Angelelli, I. Arsik, V. Morandi, M. Savelsbergh and M.G. Speranza: Proactive route guidance to avoid congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, **94** (2016), 1–21.
- [2] A.I. Corr ea, A. Langevin and L.-M. Rousseau: Scheduling and routing of automated guided vehicles: A hybrid approach. *Computers & Operations Research*, **34** (2007), 1688–1707.
- [3] E.M. Holroyd: Theoretical average journey lengths in circular towns with various routing systems. *Road Research Laboratory Report*, **43** (Ministry of Transport, UK, 1966).
- [4] E.M. Holroyd: Routing traffic in a square town to minimize route-crossings. *Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **86** (1968), 175–183.
- [5] E.M. Holroyd and A.J. Miller: Route crossings in urban areas. *Proceedings of 3rd Conference ARRB*, 394–419 (Australian Road Research Board, Sydney, 1966).
- [6] 腰塚武志: 走行時間や走行エネルギーを最小にする道路密度. 日本都市計画学会学術研究論文集, **29** (1994), 319–324.
- [7] 腰塚武志, 今井和敏: 平均走行速度と信号密度. 日本都市計画学会学術研究論文集, **26** (1991), 547–552.
- [8] 交通工学会: 改訂 交通信号の手引 (丸善, 2006).
- [9] 三浦 英俊, 鈴木 勉: 格子状交通ネットワークモデルにおける移動経路と流動交差量の分布について. 都市計画論文集, **52(3)** (2017), 717–722.
- [10] J. Prisco: Why UPS trucks (almost) never turn left. <https://edition.cnn.com/2017/02/16/world/ups-trucks-no-left-turns/index.html>, 2019年2月閲覧.
- [11] 社団法人 全日本トラック協会: コスト削減に向けた取り組みについてわかりやすい節約のポイント. <http://jta.or.jp/yuso/cost/cost-cutting.pdf>, 2019年2月閲覧.
- [12] Z. Shen, K. Wang, F.-Y. Wang and C.L. Philp Chen: GPU based genetic algorithms for the dynamic sub-area division problem of the transportation system. *Proceedings of the 19th World Congress* (The International Federation of Automatic Control, 2014), 5115–5120.
- [13] 鈴木 勉, 三浦 英俊: 都市内の移動経路と流動量密度・交差密度の空間分布. 都市計画論文集, **51(3)** (2016), 909–914.
- [14] R. Vaughan: *Urban Spatial Traffic Patterns* (Pion, 1987).
- [15] 吉田 琢史, 林 久志, 西成 活裕: シミュレーションによる最適化手法を用いた大規模ジョブショップ型工場における搬送効率の改善. *コンピュータ ソフトウェア*, **31(3)** (2014), 130–140.

三浦英俊

南山大学 理工学部システム数理学科

〒466-8673 愛知県名古屋市昭和区山里町18

E-mail: hmiura@nanzan-u.ac.jp

ABSTRACT

VEHICLE ROUTE ASSIGNMENT WITH CONSIDERATION OF
CROSSING AND MERGING IN GRID ROAD NETWORK

Hidetoshi Miura Shinya Kashiwagi
Nanzan University

In this paper, we compare four routing systems with respect to traffic crossing and merging at intersections. Right turn generates more crossings at intersections than left turn in general and the crossings (and mergings) obstruct smooth traffic and make journey times longer. This paper analyzes some routing systems in terms of travel times for movement demands, paths of them, and crossings and mergings of paths. When there are plural shortest paths among origin and destination pairs in a grid road network, we assume four routing systems: left turn, right turn, outer turn, and minimum crossing and merging assignment. The four routing systems are compared by a scheduling problem to minimize the maximum arrival time for a set of origin-destination pairs. In the scheduling problem, fixed times for safety passing at intersections and proper inter-vehicle distance on links are set as constraint conditions. The results show the right turn system is the worst and minimum crossing and merging assignment system is the best in terms of the averages of maximum arrival times through numerical experiments using problem instances.