

交差と合流を考慮した経路の割り当てに関する研究

M2018SS002 柏木伸哉

指導教員：三浦英俊

1 はじめに

自動車が道路を走行する際、左側通行の場合では右折はなるべくしない方が良く考えられる。その理由として交差点において右折をしようとすると、対向車がいる場合いなくなるまで待たなければならないため時間がかかることや対向車と衝突してしまう危険がある。海外での事例だが、アメリカの運送会社 UPS では左折をなるべく避けることで年間約 3 億ドルから約 4 億ドルもの燃料費を節約できたという記事 [1] がある。

また、近年では自動運転技術が進展してきている。実際の道路上で無人走行車の走行実験が行われており、工場や倉庫内においては無人搬送車が導入されつつある。都市内や工場内で走行する自動車が増えると交差点で交差や合流が発生することが多くなる。

本研究では、無人搬送車や自動運転車が行き交う将来が到来したとき、右折をなるべくしないような経路を走行することにどのような効果があるのか経路割り当てルールを設定した上でシミュレーション実験を行い考察することを目的とする。

三浦・柏木 [2] は、交差点に信号がない格子状道路網を用いて、道路上を走行している自動車が衝突しないよう交差や合流を考慮した上で、自動車の経路割り当てルールを 4 つ設定し、全ての移動需要が同時に発生した場合において一度に全ての自動車の発車時刻を決定するような同時スケジューリング実験から、円滑な交通をもたらす経路割り当てルールについて考察している。しかしながら、実際の都市においては全ての移動需要が同時に発生するとは言い切れない。

本研究では、三浦・柏木 [2] のように全ての移動需要が同時発生するのではなく、ある一定の時間間隔で 1 つずつ移動需要が発生する場合を考える。移動需要が発生するたびに、1 台の自動車の発車時刻を決定する逐次スケジューリングの数値実験を行う。特に海外の事例 [1] があるため、左側通行の場合、右折経路を走行することがどのような結果となるのか調べたい。

2 モデル

自動車が走行する道路網のモデルは、図 1 を用いる。1 辺の長さが 1 の正方形となるように等間隔に交差点と道路を配置し、道路は上りと下りの車線を 1 本ずつ設ける。

実験では 5×5 の完全な格子状道路網と A と B の 2 本の道路を抜いた格子状でない道路網の 2 種類の道路網を用いて実験を行う。また、実験では交差点を起終点とした人の移動に対して営業所から出発するタクシーがその移動を輸送することを考える。このとき、起点から終点への人の

移動を「OD 需要」と呼ぶことにする。道路網には複数の OD 需要を発生させる。

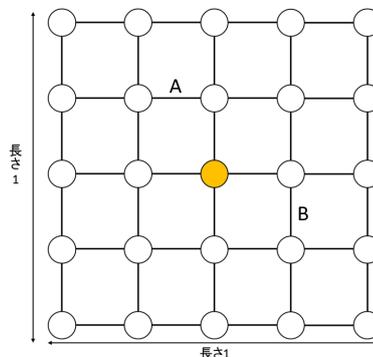


図 1 実験に用いる道路網

3 交差と合流について

3.1 交差・合流の定義

本研究では自動車同士の交差や合流について、交差点において発生するものとして以下のように定義をする。

- 交差：2 台の自動車が異なる方向から交差点に進入し、異なる方向へ退出すること。
- 合流：2 台の自動車が異なる方向から交差点に進入し、同じ方向へ退出すること。

3.2 割り当てる経路による交差と合流の回数

自動車同士の交差や合流の数は少ない方が交差点での衝突を避けることができ、無駄な停止をしないということから目的地へ早く到着できる。選択する経路によっては交差や合流の回数が異なることを例を用いて説明する。

図 2 は 3 つの OD 需要が発生した際の例であり $O_1 \rightarrow D_1$, $O_2 \rightarrow D_2$, $O_3 \rightarrow D_3$ と移動するような 3 つ OD が発生している。図 2 の左図において、 $O_1 \rightarrow D_1$ は右左折のない最短経路を割り当て、 $O_2 \rightarrow D_2$, $O_3 \rightarrow D_3$ は右折 1 回の最短経路を割り当てている。右図は、 $O_2 \rightarrow D_2$, $O_3 \rightarrow D_3$ に左折 1 回の最短経路を割り当てている。

このとき、2 つの OD 需要に右折 1 回の経路を割り当てた左図では経路の交差・合流の回数は共に 1 回となっていることにに対し、2 つの OD 需要に左折 1 回の経路を割り当てた右図では交差や合流は発生していない。

発生した OD 需要に対して、経路の割り当てを変更することによって経路同士の交差・合流を減らすことが可能となり、都市内を円滑に移動することが期待できる。

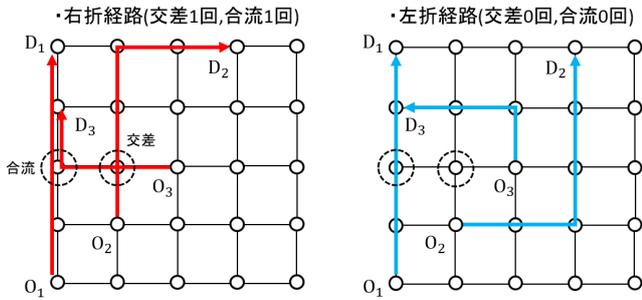


図2 割り当てる経路によって異なる交差・合流回数の例

4 経路の割り当て

OD 需要が発生した際、起点から終点への経路に最短経路を割り当てるとき、最短経路が複数存在するならば、以下の3つの経路割り当てルールに従って割り当てる。

1. 左折のみ：左折回数が1回の最短経路を割り当てる。
2. 右折のみ：右折回数が1回の最短経路を割り当てる。
3. 外回り：左折回数が1回の最短経路と右折回数が1回の最短経路のうち、道路網の中心との距離が遠い経路を割り当てる。ただし、道路網の中心との距離が等しい場合は左折回数が1回の経路を割り当てる。なお、経路と道路網の中心との距離とは、経路上の点と道路網の中心との距離が最小となる距離をさす。

図3に経路割り当ての例を示す。1つのODがOからDに移動する。左折のみは実線、右折のみは破線の矢印である。外回り経路は、経路と道路網の中心との距離を比較すると、右折経路の方が道路網の中心との距離が遠いため、外回りには右折経路が割り当てられる。

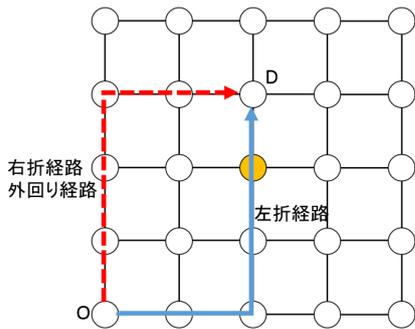


図3 経路割り当ての例

5 逐次スケジューリング実験

5.1 実験の概要

図1のような道路網を持つ都市内を走行するタクシーを考える。都市内にはタクシーのみが走行しているとし、他の自動車は存在しないものとする。

ある一定の時間間隔で1つずつOD 需要が発生し、OD 需要が発生するたびに1台のタクシーが発生したOD 需

要を輸送する。ただし、タクシーは営業所を出発してからODを走行し、営業所まで帰るような最短経路を走行する。

1つのOD 需要が発生するたびに1台ずつタクシーが営業所から出発するのだが、営業所を出発してから他のタクシーと1度も衝突することなく営業所まで帰ってくる事が出来るような出発時刻を、OD 需要が発生するたびに1台ずつ決定する逐次スケジューリング実験を行う。1度も衝突をすることがないとは、交差点で経路が交差もしくは合流をするとき、あるいは同じ道路を走行するとき、安全に交差点を通過することが出来る時間差や車間時間を確保して走行することである。

タクシーの走行速度は1で一定とし、走行途中で加減速はせず、タクシーの営業所は道路網の中心に配置する。

5.2 実験での経路の割り当て

タクシーの経路には、3つの経路割り当てルールを適用する。タクシーの走行する経路は、営業所→O、O→D、D→営業所の3つの最短経路で構成されている閉路とする。

図4に閉路の例を示す。営業所→O、O→D、D→営業所を結ぶ経路を図示している。左折のみルールは営業所→O、O→D、D→営業所を全て実線の左折1回経路で構成され、右折のみルールは営業所→O、O→D、D→営業所を全て破線の右折1回経路で構成されている。外回りルールについては、営業所→Oは実線、O→Dは破線、D→営業所は実線からなる経路で構成される。

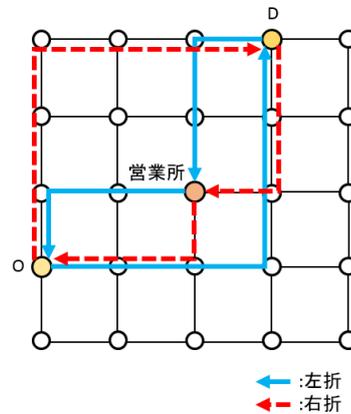


図4 ロボットタクシーの経路

5.3 タクシーの出発時刻の決定

タクシーの出発時刻の決定する決定について、実験ではC言語を用いて出発時刻を決定するプログラムを記述している。出発時刻の決定については図5のフローチャートを用いて説明する。フローチャートに書かれている記号の定義は以下である。

記号の定義

V : ノードの集合

E : リンクの集合

$I = \{1, 2, \dots, N\}$: OD 需要の発生順序集合

t_i : OD 需要 i を走行するタクシーの出発時刻 ($i \in I$)
 s_b : ノードで交差または合流する 2 台のタクシーが安全に通行できる時間差
 s_c : リンクを共有するような経路を走行する 2 台のタクシーが安全に通行できる時間差
 a_{ik} : i 番目のタクシーが出発後ノード k に至るまでの時間 ($i \in I, k \in V$)
 n_h : リンク h の終点ノード ($n_h \in V, h \in E$)

N 個の OD 需要が発生するとき、最初に発生する OD 需要の発生時刻は 0 とする。つまり 1 番最初に発生する OD 需要を輸送するタクシーは時刻 0 に出発をする。それ以降 OD 需要が発生した後、 i 番目のタクシーの経路と、 i 番目より前に発生している i' 番目のタクシーの経路を調べる。 i 番目の経路と i' 番目の経路においてリンクを共有している場合は s_c 以上、交差・合流している場合は s_b 以上の時間差が確保できているか調べ、時間差が確保できている時刻に i 番目のタクシーは出発する。

衝突をせず安全に通行できる時間差の判断については、リンクを共有していて通行の時間差が $|(t_i + a_{in_h}) - (t_{i'} + a_{i'n_h})| < s_c$ であれば安全に通行できる時間差が確保できていないものとして、 s_c 以上になるように出発時刻を遅らせるための待ち時間を計算する。

交差点において互いの経路が交差もしくは合流をしている場合も同様に考え、交差点を通過する時間差が $|(t_i + a_{ik}) - (t_{i'} + a_{i'k})| < s_b$ であれば安全に交差点を通過できないとして、 s_b 以上になるように出発時刻を遅らせるための待ち時間を計算する。これをリンクを共有している回数分、交差・合流している回数分行って i 番目のタクシーの出発時刻を決定する。本研究ではランダムに発生させる複数の OD 需要を入力とし、OD 需要を輸送する各タクシーの出発時刻を出力とする。

5.4 実験の目的

実験の目的は、割り当てルールによってタクシーは出発までにどれほど待つ必要があるのか、OD 需要が発生してからタクシーが営業所を出発するまでの平均待ち時間を比較して、どのルールの出発が早いかわかることである。文献 [2] では複数の OD 需要が同時に発生し、OD を走行する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実験を行っていたが、逐次スケジューリング実験を行う目的は、より現実に近いスケジューリング実験となるよう時間軸を与えた上で、交通を円滑にする経路割り当てルールについて調べることである。

5.5 実験の設定

実験を行うにあたっていくつか設定を行う必要があるため、設定したパラメータについて説明する。

タクシーの経路同士が交差点で交差もしくは合流するとき $s_b = 0.3$ 、リンクを共有するとき $s_c = 0.1$ の時間差を確保するよう設定した。OD 需要が発生する発生間隔

を 0.05, 0.2, 0.8 の 3 通り、OD 需要の発生数を $N = 25, 100, 500, 1000$ の 4 通り設定した。

以上の設定のもと発生間隔、発生数、割り当てルールごとに 20 回実験を行った。

5.6 実験結果と考察

格子状道路網と格子状でない道路網において 1 つの割り当てルールを適用した場合の実験結果をそれぞれ図 6, 図 7 に示す。紙面の都合上 OD 需要の発生間隔が 0.2 のときの実験結果を示す。

図 6, 図 7 をみると、ともに右折のみルールに割り当てられたときの平均待ち時間が左折のみ、外回りルールに割り当てられた場合と比較して長いことが見てとれる。今回の実験結果からどのような道路網においても右折のみで走行することは悪い可能性があることが示唆された。

一方で、左折のみ、外回りルールに関しては両者ともに同程度平均待ち時間が短いことが実験から得られた。ここで注目したいのは外回りルールには右折をして走行している経路も存在しているということである。全ての自動車に右折をすることは良くないがいくつか存在することで経路が分散され道路の混雑が抑えられるからと考えられる。

1 台 1 台で考えると平均待ち時間が短いほど早く目的地に到着できるが、道路網全体で考えると平均待ち時間が短いほど混雑していないことになる。このことから、道路網

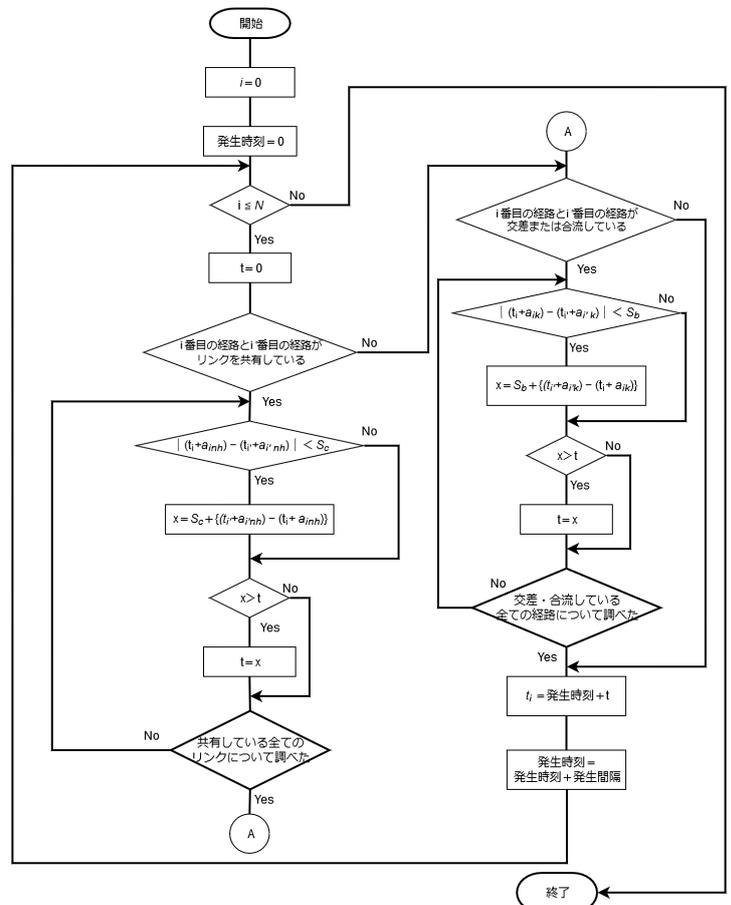


図 5 出発時刻決定のフローチャート

全体で円滑な交通を生むには右折は悪く左折や外回りがよいといえる。

[2] では格子状道路網における 3 つの割り当てルールごとの交差・合流数を調べており、右折、左折、外回りの順で交差・合流数が小さくなっていることを述べている。図 6 から平均待ち時間は割り当てルールによる交差・合流数に依存すると考えられる。

格子状でない道路網においても同様に右折、左折、外回りの順で平均待ち時間が短くなっている。平均待ち時間が割り当てルールによる交差・合流数に依存するのであれば、格子状でない道路網においても交差・合流数は右折、左折、外回りの順で少なくなるだろうと推測される。

また、右折経路で走行するタクシーと左折経路で走行するタクシーが確率 1/2 で混在するような場合で同様の実験を行ったときの実験結果を図 8、図 9 に示す。格子状道路網とそうでない道路網のどちらにおいても、右折経路で走行するタクシーの方が左折経路で走行するタクシーよりも平均待ち時間が長い結果となった。自動車は交差点を右折、左折、直進のいずれかをして通過するが、右折をする時は左折をする時と比較して他の自動車と交差もしくは合流をする場合が多い。このことから、右折経路で走行するタクシーは交差点で衝突を回避する回数が多くなり、平均待ち時間が長くなっていると考えられる。

6 おわりに

本研究では、3 つの割り当てルールを設定し、逐次スケジューリング実験を通して右折をなるべくしないような経路を走行することにどのような効果があるのかを調べた。

格子状道路網と格子状でない道路網で実験を行ったが、どのような道路網でも右折は悪く左折や外回りルールによる割り当てが望ましいことが示唆された。

実験では 5 × 5 の格子状道路網を用いたが、7 × 7 の格子状道路網のように、さらに規模が大きい道路網で実験を行うことでより詳細な知見が得られると考える。本研究においては取り組むことが出来なかったため、今後の課題として規模の大きい道路網で実験を行う必要がある。

また、実際の都市では OD 需要の発生間隔は一定でなく OD 起終点もノード上ではなくリンク上に発生することの方が多い。これらの要素を取り入れて、実験を行うことでより現実的な知見を得ることや考察が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 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 7 月閲覧
- [2] 三浦英俊, 柏木伸哉 : 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, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 62, 2019, pp. 54-70.

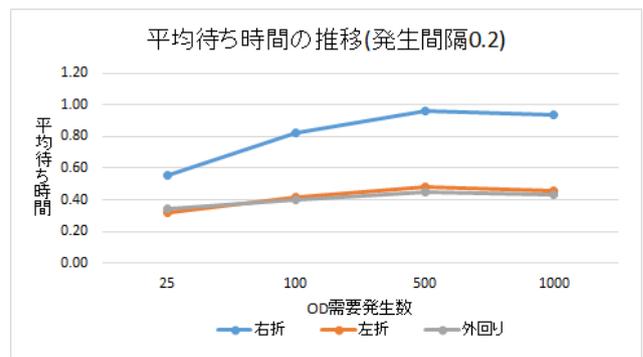


図 6 格子状道路網での実験結果

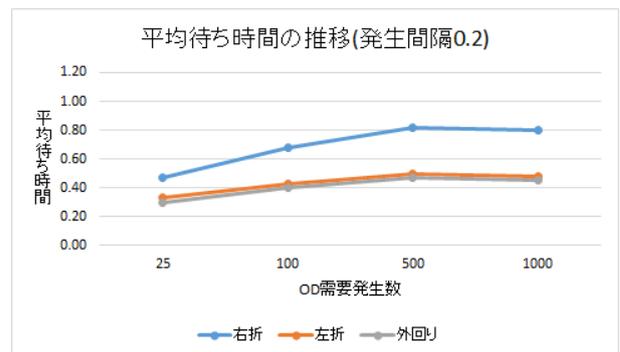


図 7 格子状でない道路網での実験結果

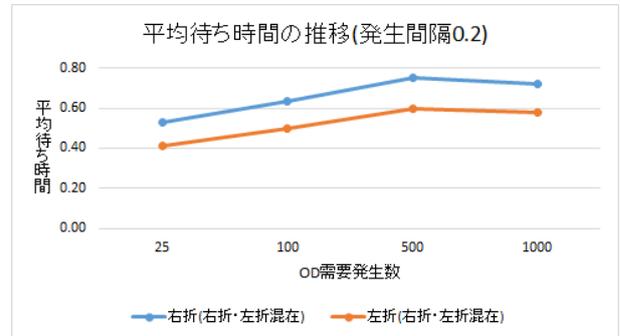


図 8 格子状道路網でルールを混在させた実験結果

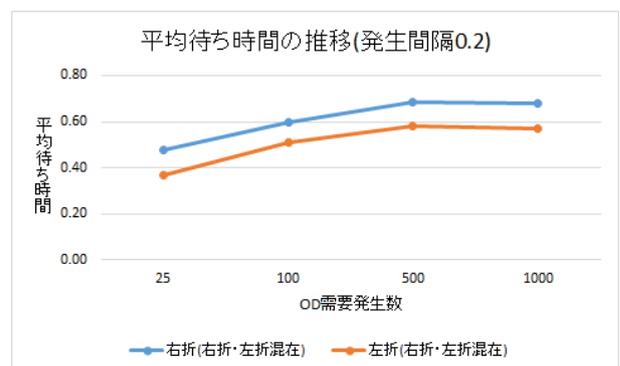


図 9 格子状でない道路網でルールを混在させた実験結果