

格子状道路網における 情報拡散時間に関する考察

平成 29 年度卒業論文

千葉大学工学部都市環境システム学科

指導教員：塩田 茂雄

13T0250A

南川 雅人

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
第2章	路車間通信	4
2.1	路車間通信とは	4
2.2	路車間通信による情報拡散	5
第3章	数理モデル	6
3.1	はじめに	6
3.2	数理モデルについて	7
3.3	情報転送時間の算出	8
3.3.1	2つの独立経路に沿った情報転送時間	8
3.3.2	斜めの経路に沿った情報転送時間	14
第4章	情報転送時間測定シミュレータ	16
4.1	シミュレータの概要	16
4.2	シミュレータの精度分析	19
4.3	シミュレーション状況	20
4.4	シミュレーション結果	21
4.4.1	シミュレーション結果：格子の端まで転送する場合	21
4.4.2	シミュレーション結果：格子内に転送する場合	26
4.4.3	シミュレーション結果：発生間隔 λ を変化させた場合	29
第5章	結論	33
謝辞		34
参考文献		35

第1章 序論

1.1 研究背景

自動車通信ネットワークは近年の移動通信技術と自動車技術の発達により、注目を集めている。

国土交通省が勧める ASV(先進安全自動車)推進計画など自動車運転の高度安全化・効率化・快適化を実現するため、車両のための情報通信基盤の充実に対する要求が高まっている。自動車通信ネットワークには主に車両と車両が直接通信する車車間通信[1], [2], [3]と、車両と設置されたサーバ間の通信である路車間通信がある。

路車間通信の実用例として、高速道路における自動料金収受システム (ETC) が挙げられる。

また、ホテルやショッピングモールのような商業施設の広告を、空港や駅周辺を走行しているバスやタクシーなどの乗客に伝えることや、市街地を走行している車両のワイパーの稼働状況からゲリラ豪雨の発生エリアを特定する試みなどがある。このように様々な分野での応用が期待されている。

広告、事故情報などの情報を発信元から目的の場所までに送る際にかかる情報転送時間を可視化することで、路車間通信システムの応用性を高められ、送信者が送る情報を選定する際に役立つことが期待される。

1.2 研究目的

本研究では車車間通信（図 1.1）ではなく，路車間通信による情報拡散時間に焦点を当てる．

情報を送信する交差点から目的地の交差点までの時間を表す理論式を数理モデルにより考察する．

情報の転送時間を理論式による近似値とシミュレーションによる実測値で比較し，理論式から得た近似値を評価することが目的である．

またシミュレーション条件を変化させた時の理論式の精度検証も行う．

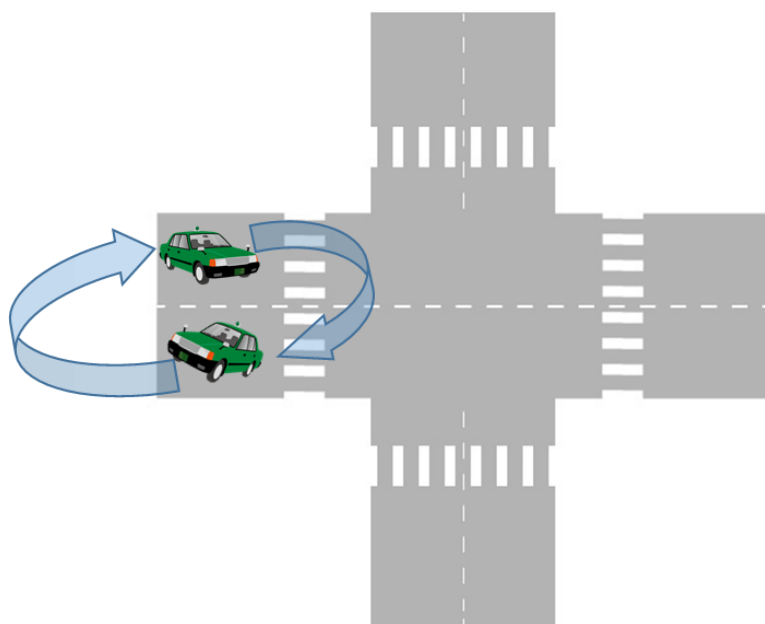


図 1.1 車車間通信のイメージ

1.3 論文の構成

第1章 本章であり，本研究の背景と目的，構成について述べた．

第2章 路車間通信の概要と路車間通信を利用した道路網上で情報拡散について述べる．

第3章 数理モデルの概要とその導出過程を述べる．

第4章 シミュレーションの概要と様々な条件下での結果を基に理論式の精度を検証する．

第5章 本研究の結論と今後の課題について延べる．

第2章 路車間通信

2.1 路車間通信とは

車両とインフラ設備（路側機など）との無線通信（図 2.1）によって，信号情報や道路情報，歩行者情報などの情報をやり取りすることである。

現在，レーザーレーダーやミリ波レーダー，車載カメラなどを用いた運転支援システムが開発されているが，センサーの検知範囲内の物しか対象にできなく，事故の多い見通しの悪い交差点などでは対象物を認識しづらい。

対して路車間通信では情報をサーバから直接取得することで安全運転を支援することができる。

使用される通信機能の中心となるのは，ISO（国際標準化機構）やITU（国際電気通信連合）で国際標準化している 5.8GHz 帯 DSRC (Dedicated Short Range Communication: スポット通信) により効率的に行われている。[11]

更なる普及に向けた課題としてインフラ設備の整備費用の問題を解消することがあげられる。路車間通信を普及させるその他の利点として，災害などで通信ネットワークが破壊された場合や重大な輻輳状態で通信ができなくなったときに路車間通信ネットワークを利用した通信路への転用が可能としても注目を集めている。

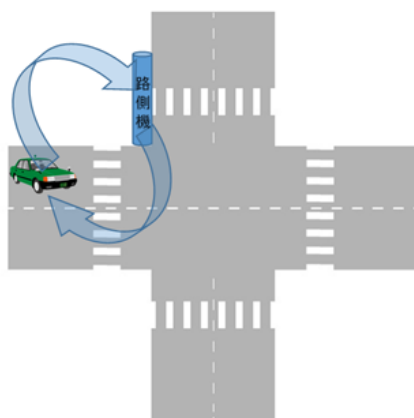


図 2.1 路車間通信のイメージ

2.2 路車間通信による情報拡散

車両が交差点を通過する際、サーバと車両間で互いが持つ情報を無線通信により交換する。交差点に置かれているサーバ同士のみで直接通信はできず、交差点を通過する車両が情報を直接運ぶことにより隣接する交差点に情報を転送する。

こうすることで、路車間通信による情報拡散を行う手法が提案されている。

[4]このような通信ネットワークは遅延耐性ネットワーク Delay Tolerant Network (DTN) と呼ばれ様々な研究がなされてきた。[5], [6], [7]

道路網上でネットワークは車両の移動により時々刻々と変化しているため、エンドツーエンドで常時送信元と送信先は接続されていない。

このような状況下のとき耐遅延性ネットワークの一種である路車間通信による情報拡散は有効な手法である。

この仕組み（図 2.2）により、交差点のサーバの持つ情報は、交差点を通過する車両を介して隣接する交差点のサーバに転送される。

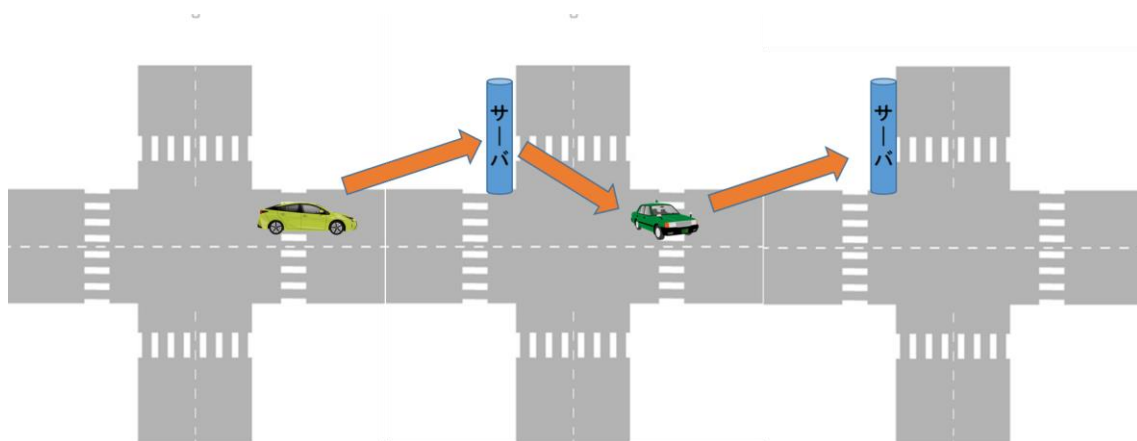


図 2.2 路車間通信による情報拡散

第3章 数理モデル

3.1 初めに

本研究では情報を車両の移動を用いて拡散させるモデルを考えている．車両の到着率という不確実性を伴う事象に数理モデルを用いて定量的に表現することで情報選定に役立つだろう．[9]

数理モデルを定義する前に用語の確認をする．

ポアソン過程

ポアソン過程とはランダムに生起する事象を表す基本的な確率過程である．客の到着や，生命の出生死滅などを表現したい場合用いる．

本研究の車両の到着率もランダムな事象であるので，ポアソン過程に従うものとして考える．またポアソン過程に従う事象の発生間隔は指数分布に従うことが成り立つことが知られている．

アーラン分布

互いに独立で同一の指数分布に従う事象が n 回発生するとき，それら全体の分布関数を n 次のアーラン分布で表す．ガンマ分布のパラメータ α が整数の特別な場合である．ガンマ分布は主に工業製品の寿命分布，待ち行列のサービス時間，所得分布等にあてはまる．

3.2 数理モデルについて

本研究で扱う路車間通信による情報拡散時間は車両の交差点到着率と車両の交差点間の移動時間により決定される。

交差点 i と交差点 j が隣り合っているとするとき、交差点 i から交差点 j に向かう車両は到着率 λ_{ij} のポアソン過程に従って到着するものとし、以下 $\lambda_{ij} = \lambda$ とする。

また車両が隣の交差点に移動するのにかかる時間 T は一定とする。ある交差点から上下左右の隣接する交差点のサーバには時間 T に加えてそれぞれ独立な指数分布に従う時間が経過した後に情報が転送されることとなる。

2つの交差点が同一直線上にある場合を除き、2ホップ以上離れた交差点間には複数の経路が存在する。それらの経路すべてを考慮した分布関数を求め転送時間を近似することは容易ではないため、本研究では独立な2つの最短経路による理論式(1)と目的地を分割した斜めの経路に沿った解釈の理論式(2)に焦点を当てそれぞれの理論式を導出する。

3.3 情報転送時間の算出

情報発信元から、 k ホップ離れた交差点のサーバに情報が転送されるまでの時間を考え数理モデルによって近似することを目標とする。

3.3.1 2つの独立最短経路に沿った情報転送時間

2つの交差点が同一直線上にある場合を除き、2ホップ以上離れた交差点間には独立な最短経路が必ず2つ存在するので、これを経路1および経路2と呼ぶことにする。

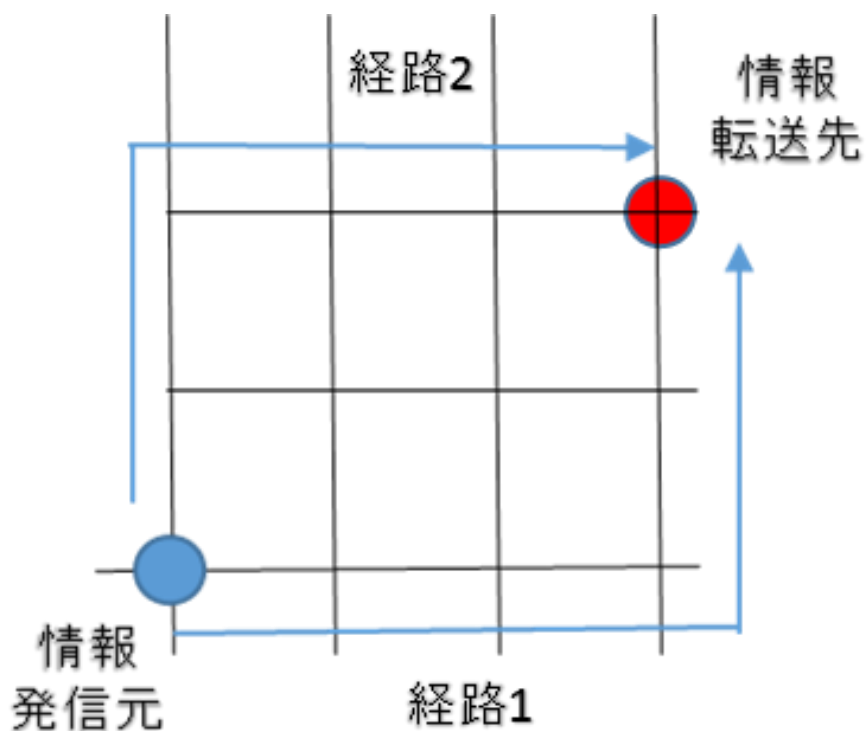


図 3.1 経路設定のモデル

経路*i*に沿って*k*ホップ離れたサーバまで転送されるのに要する時間（拡散時間）を $X_i^{(k)}$ ($i = 1, 2$)とすると

$$X_{min}^{(k)} = \min\{X_1^{(k)}, X_2^{(k)}\}$$

を先ほど述べた条件の下で定義し、これは求めたい情報転送時間に近似すると考えられる。

$X_1^{(k)}$ および $X_2^{(k)}$ は*k*個の交差点それぞれが指数分布に従い、各交差点の車両の到着時間間隔は等しいので平均*k*/ λ の*k*次アーラン分布に従う。

また $X_1^{(k)}$ および $X_2^{(k)}$ は互いに独立である。

$X_i^{(k)}$ ($i = 1, 2$)の分布関数

$$F_k(t) = P(X_i^{(k)} \leq t)$$

確率密度関数

$$f_k(t) = \frac{dF_k}{dt}$$

はそれぞれ以下で与えられる。

$$F_k(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^l}{l!} e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\lambda^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

$X_{min}^{(k)}$ の分布関数について以下が成り立つ.

$$\begin{aligned}
 P(X_i^{(k)} \leq t) &= \int_0^t P(x \leq X_1^{(k)} \leq x + dx)P(x > X_2^{(k)}) \\
 &\quad + \int_0^t P(x \leq X_2^{(k)} \leq x + dx)P(x > X_1^{(k)}) \\
 &= 2 \int_0^t dx \lambda^k f_k(x)(1 - F_k(x)) \\
 &= 2 \int_0^t dx \frac{\lambda^k x^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda x} \left(\sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\lambda x)^l}{l!} e^{-\lambda x} \right) \\
 &= 2 \sum_{l=0}^{k-1} \int_0^t dx \frac{\lambda^{k+l} x^{k+l-1}}{(k-1)! l!} e^{-2\lambda x}
 \end{aligned}$$

ここで

$$\int_0^t dx x^n e^{-ax} = \frac{n!}{a^{n+1}} - \sum_{j=0}^n \frac{n! t^j}{j! a^{n-j+1}} e^{-at}$$

であることに注意して，式を書き直すと

$$\begin{aligned}
P(X_i^{(k)} \leq t) &= 2 \sum_{l=0}^{k-1} \frac{\lambda^{k+l}}{(k-1)! l!} \left(\frac{(k+l-1)!}{(2\lambda)^{k+l}} - \sum_{j=0}^{k+l-1} \frac{(k+l-1)!}{j!} \frac{t^j}{(2\lambda)^{k+l-j}} e^{-2\lambda} \right) \\
&= \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(k+l-1)!}{(k-1)! l!} \\
&\quad - 2 \sum_{l=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k+l-1} \frac{\lambda^{k+l}}{(k-1)! l!} \frac{(k+l-1)!}{j!} \frac{t^j}{(2\lambda)^{k+l-j}} e^{-2\lambda} \\
&= \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(k+l-1)!}{(k-1)! l!} \\
&\quad - \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(k+l-1)!}{(k-1)! l!} (2^{-1})^{k+l-1} \sum_{j=0}^{k+l-1} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} e^{-2\lambda} \quad (1)
\end{aligned}$$

が得られる.

$$n = k + l - 1$$

$$\sum_{n=m}^{2m} \binom{n}{m} 2^{-n} = 1$$

より式(1)右辺第1項は

$$\sum_{n=k-1}^{2(k-1)} \frac{n!}{(k-1)! (n-k+1)!} 2^{-n} = \sum_{n=k-1}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} = 1 \quad (1.1)$$

式(1)右辺第2項は

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=k-1}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} \sum_{j=0}^n \frac{(2\lambda t)^j}{j!} e^{-2\lambda t} \\
&= \sum_{j=0}^{2(k-1)} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} \sum_{n=\max\{k-1, j\}}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} e^{-2\lambda t} \\
&= \sum_{j=0}^{2(k-1)} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} \sum_{n=k-1}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} e^{-2\lambda t} + \sum_{j=k}^{2(k-1)} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} \sum_{n=j}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} e^{-2\lambda t} \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} e^{-2\lambda t} + \sum_{j=k}^{2(k-1)} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} \sum_{n=j}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} e^{-2\lambda t} \quad (1.2)
\end{aligned}$$

式(1)に式(1.1), (1.2)を適用させると

$$P(X_i^{(k)} \leq t) = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} e^{-2\lambda t} - \sum_{j=k}^{2(k-1)} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} \sum_{n=j}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} e^{-2\lambda t}$$

と簡潔に書き表すことができる。

次に、得られた分布関数を用いて、転送時間の期待値を導出する。

$X_{min}^{(k)}$ の期待値は,

$$\begin{aligned}
E[X_{min}^{(k)}] &= \int_0^{\infty} P(X > t) dt \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \int_0^{\infty} \frac{(2\lambda t)^j}{j!} e^{-2\lambda t} dt + \sum_{j=k}^{2(k-1)} \int_0^{\infty} (2\lambda t)^j dt \sum_{n=j}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{2\lambda} + \sum_{j=k}^{2(k-1)} \sum_{n=j}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} 2^{-n} \frac{1}{2\lambda} \\
&= \frac{k}{2\lambda} + \frac{1}{2\lambda} \sum_{n=k}^{2(k-1)} \sum_{j=k}^n \binom{n}{n-k} 2^{-n} \\
&= \frac{k}{2\lambda} + \frac{1}{2\lambda} \sum_{n=k}^{2(k-1)} \binom{n}{k-1} (n-k+1) 2^{-n} \\
&= \frac{k}{2\lambda} + \frac{k}{2\lambda} \sum_{n=k}^{2(k-1)} \binom{n}{k} 2^{-n} \\
&= \frac{k}{\lambda} \left(1 - \binom{2k}{k} 2^{-2k} \right)
\end{aligned}$$

つまりこの目的地までの独立な最短経路に沿った情報転送時間は

$$\frac{k}{\lambda} \left(1 - \binom{2k}{k} 2^{-2k} \right) \quad (2)$$

と表すことができる.

スターリングの公式[8]

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k!}{\sqrt{2\pi k} \left(\frac{k}{e}\right)^k} = 1$$

$$\text{より } \binom{2k}{k} 2^{-2k} = \frac{(2k)!}{(k!2^k)^2} = \left(\frac{(2k)!}{\sqrt{4\pi k} \left(\frac{2k}{e}\right)^{2k}} \right)^2 \frac{\sqrt{4\pi k} \left(\frac{2k}{e}\right)^{2k}}{2\pi k \left(\frac{2k}{e}\right)^{2k}} \rightarrow 0 (k \rightarrow \infty)$$

であるから, $E[X_{min}^{(k)}] \approx \frac{k}{\lambda} (k \rightarrow \infty)$ となる.

3.3.2 斜めの経路に沿った情報転送時間

先ほどの式 (2) は情報の転送経路を独立な二つの経路に限定しており，数多くの経路が存在する場合，独立でない最短経路や最短経路でない経路を考慮していない為，理論値として正しく近似されていない値を算出する傾向があると予測できる．

ここでは目的地までの独立な最短経路のみを考慮することは変わらないが，情報転送先までの独立な最短経路で転送時間を算出するのではなく，転送先までに経由地点をいくつか設定し経由地点までの転送時間を考える．最終的に経由地点を通過して目的地まで転送させる．この過程を経ることで目的地までの独立でない最短経路をある程度考慮することができる．

経由地点までの情報転送時間を先ほどの (2) 式で算出する．

経由地点から次の経由地点までの確率は独立であるから，経路の転送時間の足し合わせで理論式 (2) を得る．

以下では情報発信元から右方向に n_1 ホップ、上方向に n_2 ホップ離れた交差点のサーバに情報が転送されるまでの時間を考える。

(一般性を損なわずに) $n_1 > n_2 > 0$ とし、 $k = \lfloor n_1/n_2 \rfloor$ を定義する。このとき、情報発信元から、右に k ホップ、上に1ホップ進んだ交差点まで進み、そこまでの情報転送時間を求める。さらにそこから右に k ホップ、上に1ホップ進んだ交差点まで進むことを繰り返す、その後右に直線的に進む経路に沿った情報転送経路(図3.2)に着目すると、この経路に沿った情報転送時間は経由地点までの情報転送時間を経由した回数分足し合わせ、残ったホップ数分の転送時間を加えたものと解釈できる。

数理モデルとして以下のように表すことができる。

$$n_2 E[X_{min}^{(k+1)}] + \frac{n_1 - kn_2}{\lambda} \quad (3)$$

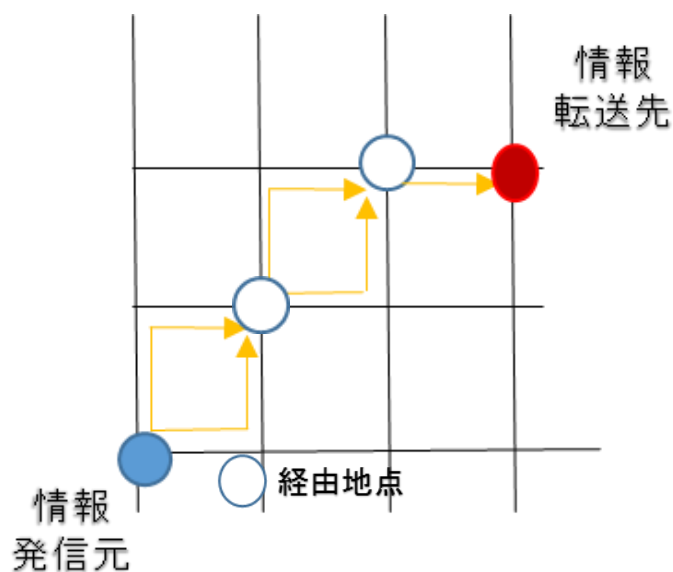


図 3.2 経路設定のモデル

第4章 情報転送時間測定シミュレータ

4.1 シミュレータの概要

ここではシミュレーションに用いるシミュレータの概要について説明する。

本研究で用いるシミュレータはC言語によるプログラミングで作成した。

このシミュレータは道路網を正方形の格子状ネットワークにモデル化し、道路網は $N \times N$ の正方格子であるものとする。

目的地までの転送時間を複数の経路に関して計算する。それらの最小時間を合計し、試行回数で割った平均転送時間を出力するものである。

以下、シミュレーション上の注意点を挙げる。

- ・1 ホップとは隣接する交差点へ移動することである。
- ・情報が送られてきた交差点へは戻らない。
- ・経路選択は常に転送時間が最短のものを取る。
- ・情報の発信源は格子の中央にとる。
- ・車両の到着間隔を λ とする。
- ・車両の移動時間 T は考慮しないものとする。

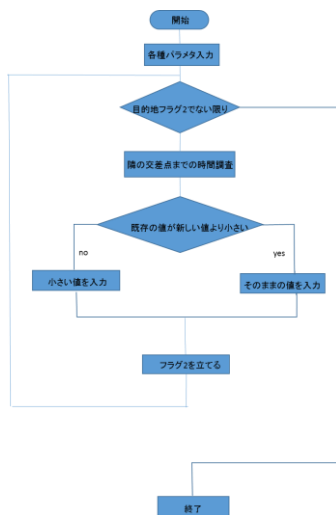


図 4.1 フローチャート

例として、N=2(図 4.1)の場合でシミュレーションの流れを確認する。

どの交差点が計算されていないかを判別するために、すべての交差点は転送時間の計算が書き込まれるまではフラグ 0 を持つ。(初期状態)



交差点数よりも巨大な任意の数 max にフラグ 1 をたて、全ルートを計算した場合でもそれより小さくならない適当な時間を書き込んでおく。

(この作業により、終了時刻を発見することができる。)



始点と終点を入力

(交差点番号 4 番を始点, 8 番を終点とする。)



始点が入力されたとき、始点はフラグ 0 からフラグ 1 に持ち変え、時間経過 0 秒が書き込まれる。

情報を受け取った交差点は隣接しているすべての交差点までの到着時間を指数分布に従い、計算する。



到着時間が計算された交差点にはフラグ 1 を立てる。



交差点 0 番から交差点 max 番まで順番にフラグ 1 が立っている交差点の経過時間を調べ上げる。

フラグ 1 が立っている交差点で最小の経過時間をとる交差点は、フラグ 2 が立ち実際に情報は転送される。



目的地の交差点にフラグ 2 が立てば試行を終了する。

図 4.2 の場合、交差点番号 1, 3, 5, 7 の時間が評価され交差点番号 5 へ進む。
次に交差点番号 5 に隣接する交差点までの経過時間を計算する。

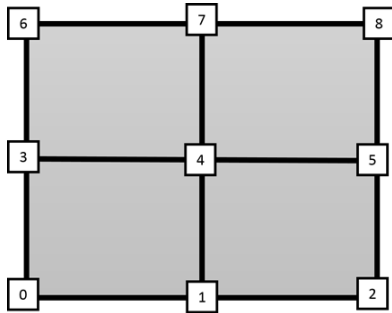


図 4.1 格子モデル（初期状態）

転送元以外すべての交差点にタイム 0 フラグ 0 を書き込む. 転送元にはフラグ 1 を立てる.

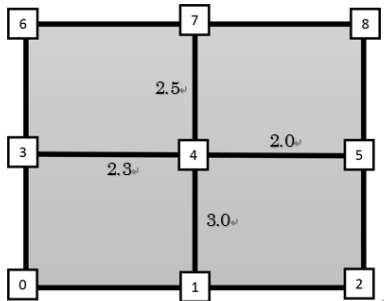


図 4.2 格子モデル（1回目の計算状態）

フラグ 1 は 4 番なので交差点 4 と隣接する交差点までの転送時間を計算.

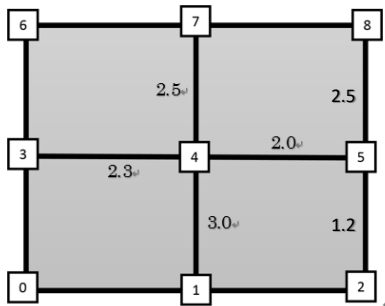


図 4.3 格子モデル（1回目の移動終了時）

図 4.3 の状態のとき, 交差点 5 から交差点 8 までの経過時間が 0.3 以下ならこの試行は終了するが, この場合評価されるのは交差点番号 3 である.

この試行を交差点番号 8 にフラグ 2 が立つまで繰り返し試行を行う.

4.2 シミュレータの精度分析

本研究ではモンテカルロ法を用いたシミュレーションを行い、得られた実測値の平均で近似式の精度を検証する手法をとる。[10]

その為、シミュレータでの実測値が毎回大きく外れてしまうと理論式の正しい精度評価をすることができない。

シミュレータの精度を検証するため、シミュレータの標準誤差を計算する。

シミュレータには指数分布に従う疑似乱数を使用する。

精度を計測する為に、近似値を評価する際と同じ数の 500 回試行を行った。

標準誤差 0.045917 という結果を得ることができ、この値はシミュレーションの精度を十分に保証するものである。

よって、本研究でこのシミュレータを近似値の評価に使用する。

4.3 シミュレーション状況

実際にシミュレーションする前に、どのような状況を想定してシミュレーションしていくのかを考える。

コインパーキングに駐車したい時、コインパーキングが満車なのか空いているのかといった情報はその周辺を走行している車両にとって有益な情報になりうるが、離れた場所を走行する車両には価値のある情報とは言い難い。

一方、商業広告は遠くの車両にも情報を伝えることでより広範囲に認知してもらうことができる。

情報には、路車間通信ネットワーク内の近くの目的地に転送する場合（図 4.4）と通信ネットワークの端まで行き渡らせる場合（図 4.5）2通りの転送状況が考えられる。

この2つの状況を区別した上でシミュレーション結果を算出してゆく。

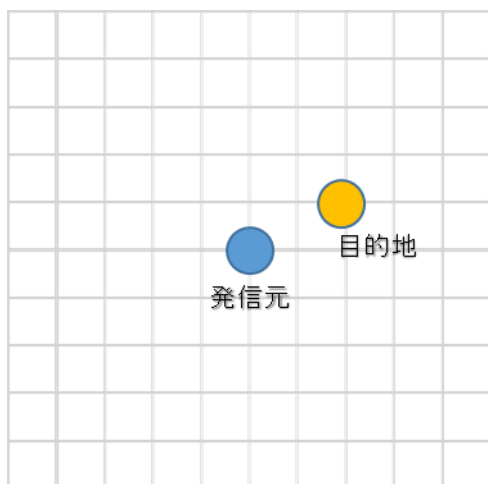


図 4.4 格子内の近くに転送する場合

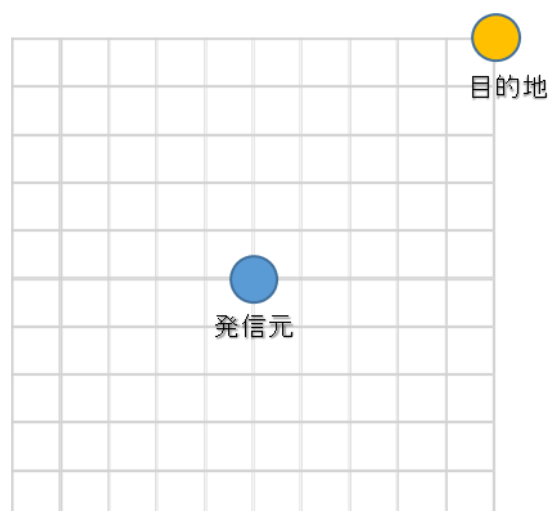


図 4.5 格子の端まで転送する場合

4.4 シミュレーション結果

この段落ではシミュレーション条件として

- ・ 格子の端までの情報転送時間
- ・ 格子内の情報転送時間
- ・ λ を変えた時の情報転送時間

の結果を示し数理モデルとの比較をする。

4.4.1 シミュレーション結果：格子の端まで転送する場合

$\lambda = 1$

試行回数 500 回

として、転送時間をシミュレーションにより求める。

実測値をプロットし、図のような結果を得た。

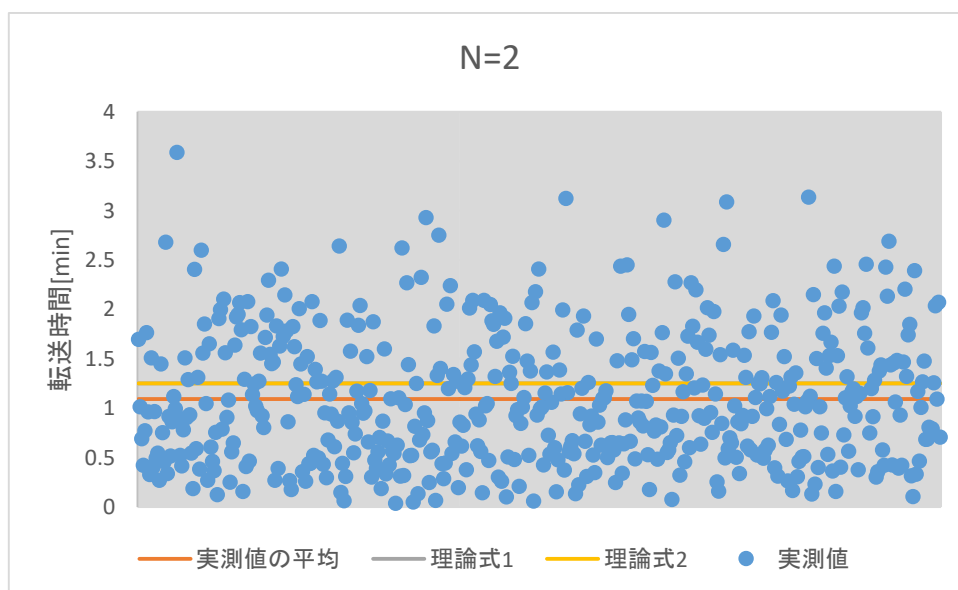


図 4.5 シミュレーション結果 (N=2)

表 4.1 転送時間の比較 (N=2)

ホップ数 2 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
1.168182	1.25	1.25

N=2, $\lambda=1$ の場合, 図から理論式の近似値は実測値の平均との差が小さく, 十分近似されていることが示された.

N=2 の場合では全経路数に対して数理モデルで考慮している独立な最短経路が相対的に多いため高い精度で近似されている.

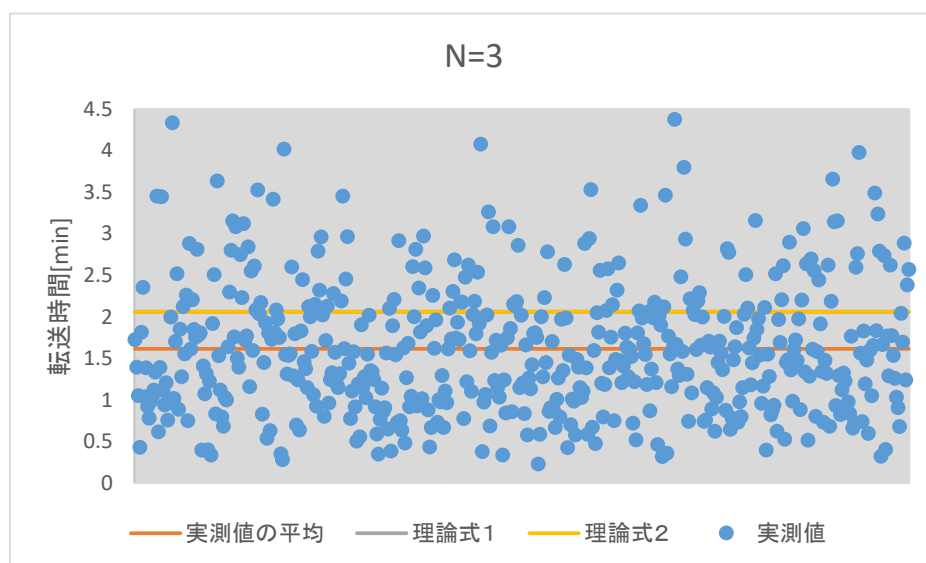


図 4.6 シミュレーション結果 (N=3)

表 4.2 転送時間の比較 (N=3)

ホップ数 3 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
1.617029	2.0625	2.0625

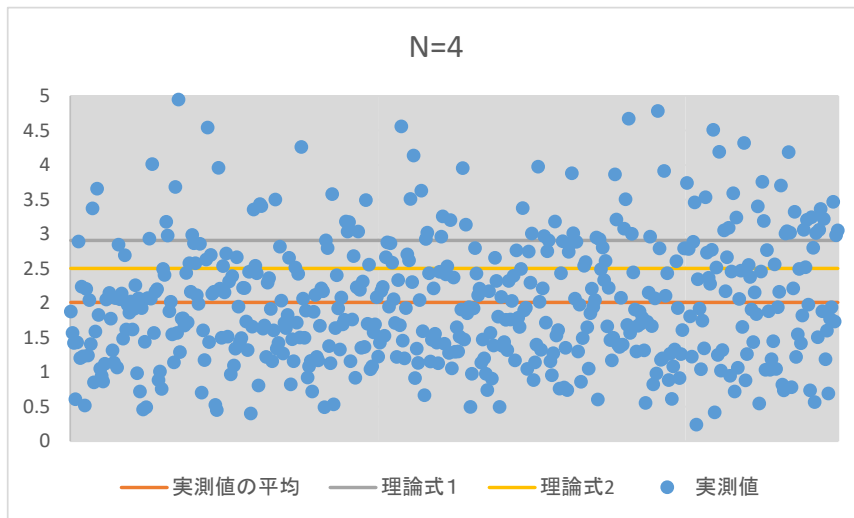


図 4.7 シミュレーション結果 (N=4)

表 4.3 転送時間の比較 (N=4)

ホップ数 4 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
2.010006	2.90625	2.5

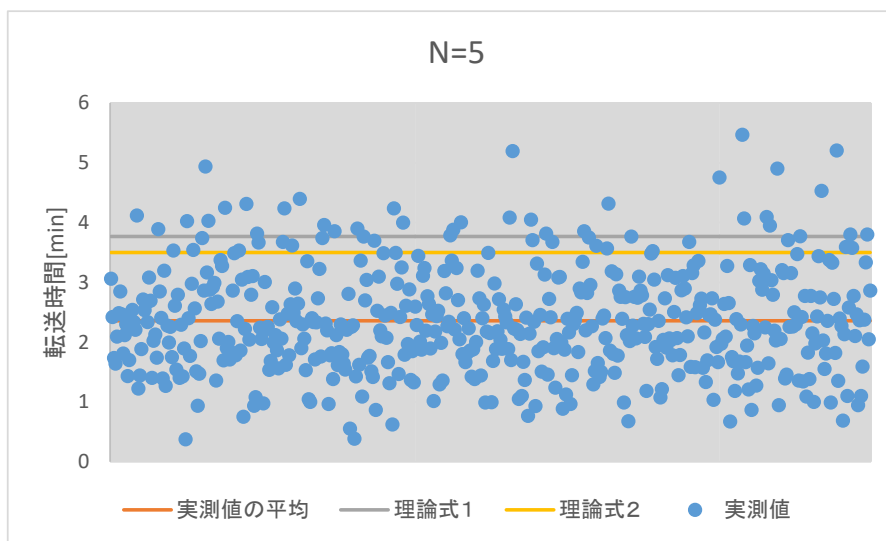


図 4.8 シミュレーション結果 (N=5)

表 4.4 転送時間の比較 (N=5)

ホップ数 5 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
2.359897	3.76953	3.5

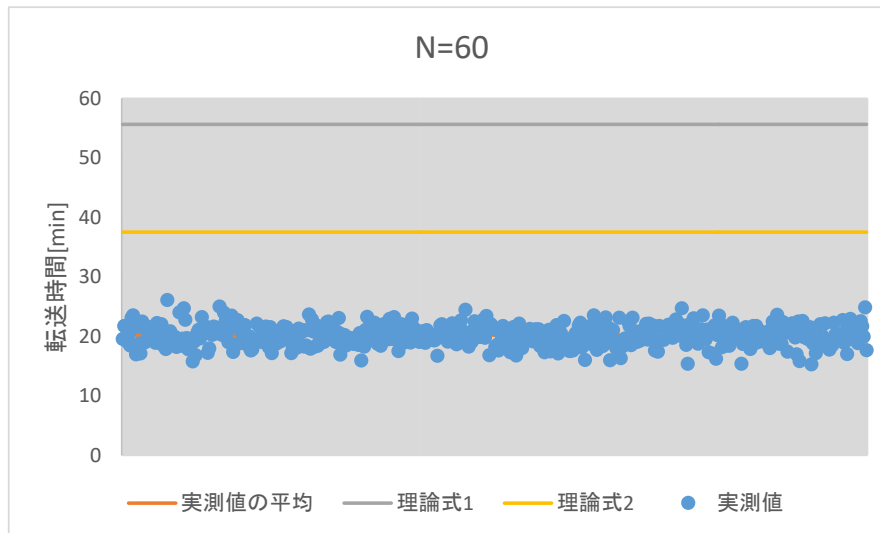


図 4.9 シミュレーション結果 (N=60)

表 4.5 転送時間の比較 (N=60)

ホップ数 60 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値 (1)	理論値 (2)
20.182558	55.638901	37.5

図 4.7, 図 4.8, 図 4.9 から N が増加する (転送先が遠くなる) につれて, 理論値の出す値は実測値の平均と大きく離れていくことが示された. ホップ数と理論値の関係性を図 4.10 に示す.

数理モデルを導出する際, 独立な最短経路のみの場合しか考慮していない. そのため転送先が遠くなるにつれ経路が増加し, 考慮されていない経路を通る転送時間をシミュレーションでは計算しているため差が大きくなったと考察できる.

理論式 (1) よりも理論式 (2) の方が高い精度を示したのもそのためである.

図 4.10 測定値と理論値の比較

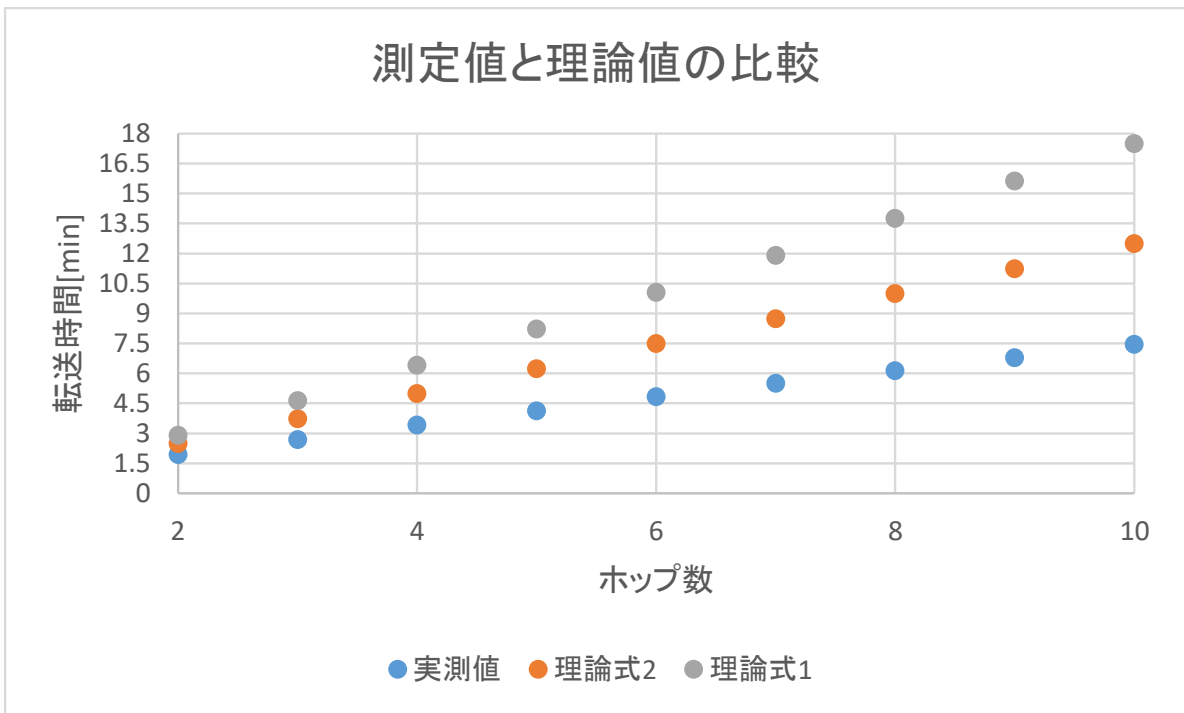


図 4.9 から 60 ホップ先ともなると理論式 (1) の誤差は理論式 (2) の 2 倍以上となり、理論式 (1) は完全に成立していないことが確認された。
しかし理論 (2) も誤差が約 17.31744 [min] となり正しく近似しているとはいえない。

4.4.2 シミュレーション結果：格子内に転送する場合

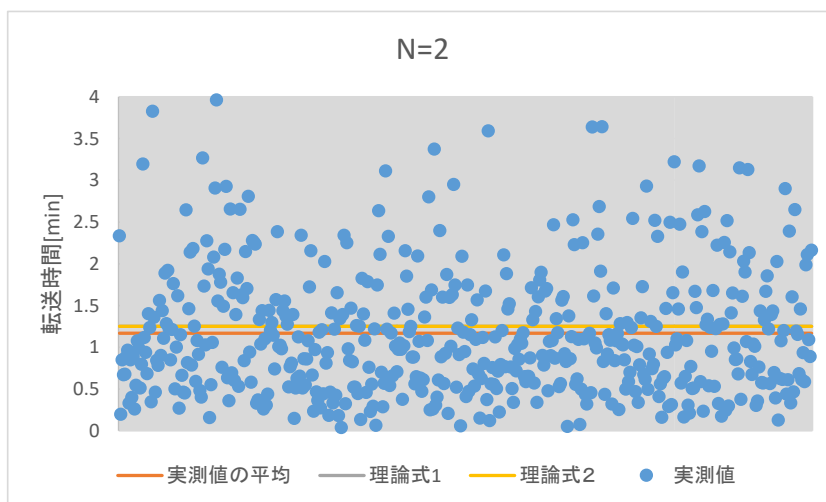


図 4.11 シミュレーション結果 (N=2)

表 4.6 転送時間の比較

ホップ数 2 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
1.092994	1.25	1.25

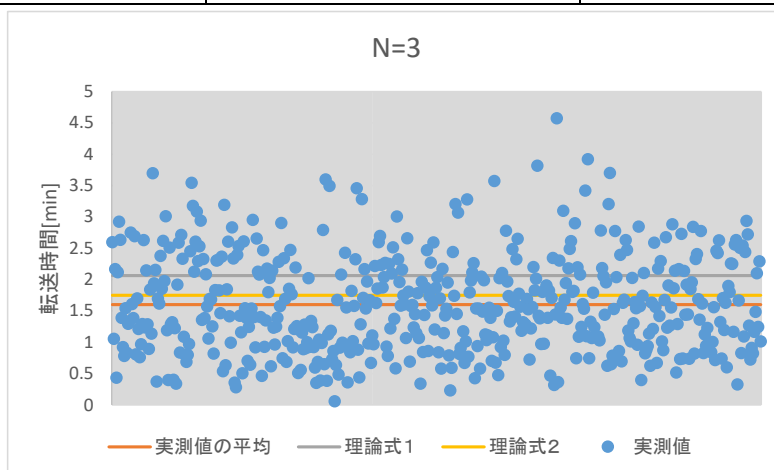


図 4.12 シミュレーション結果 (N=3)

表 4.7 転送時間の比較

ホップ数 3 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
1.59897	2.0625	2.0625

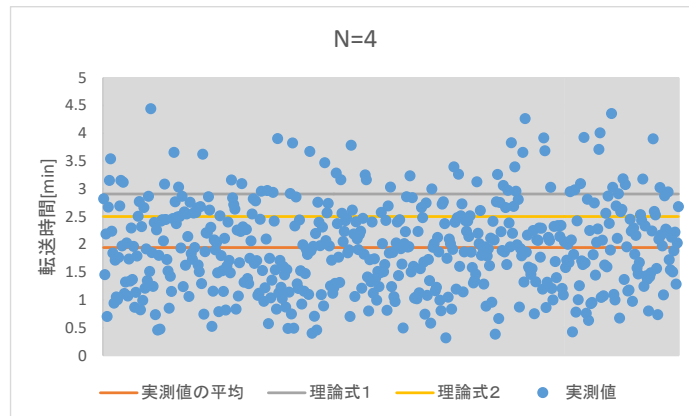


図 4.13 シミュレーション結果 (N=4)

表 4.8 転送時間の比較

ホップ数 4 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
1.943499	2.90625	2.5

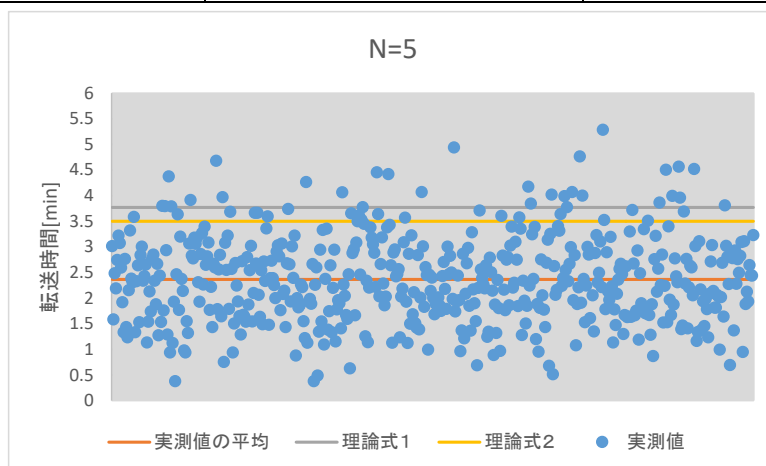


図 4.14 シミュレーション結果 (N=5)

表 4.9 転送時間の比較

ホップ数 5 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
2.363655	3.769531	3.5

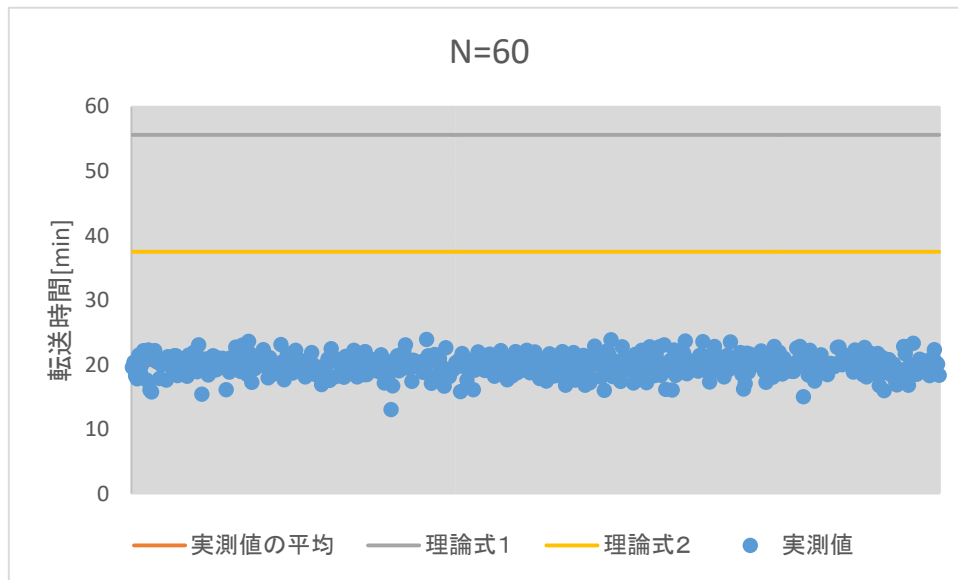


図 4.15 シミュレーション結果 (N=60)

表 4.10 転送時間の比較

ホップ数 60 $\lambda=1$		
実測値の平均	理論値(1)	理論値(2)
19.935992	55.638901	37.5

4.3.1のシミュレーション結果と比べて、4.3.2の結果は実測値の平均が低く算出されている。これは迂回して目的地に転送する経路の可能性が出てきたためである。

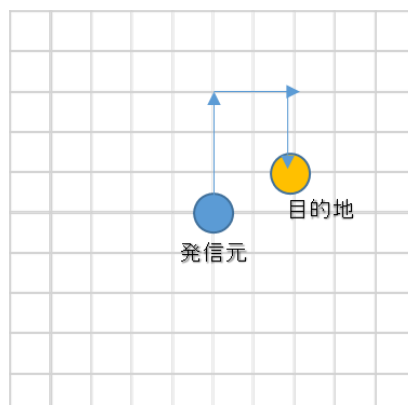


図 4.16 迂回路を通る経路

同じホップ数離れた目的地に転送する場合でも，転送先が格子内か格子の端であるかで転送時間が異なる傾向にあることが予測できる。

従って，目的地を通信ネットワーク内に設定している場合，理論式の精度は少し低くなることがわかった。

今回得られた結果より，路車間通信ネットワークが巨大であれば，同じ距離離れている転送先に情報を転送する場合でも，より大きなネットワークを持つ方が早く転送できるということがわかった。

4.4.3 シミュレーション結果：発生間隔 λ を変化させた場合

ホップ数 1， $\lambda=1$ のとき，数理モデルと実測値の誤差は比較的小さく理論式は成立していると考えた。

しかしホップ数の増加に比例して理論式は成立しなくなることが確認された。ここでは発生間隔 λ を変化させ理論式がどのような状況下で成立するか確認し理論式の精度と発生間隔 λ の関係性を明らかにする。

迂回して目的地につく経路が与える影響を無視するため格子状の端まで情報を転送する場合に絞ってシミュレートし考察する。

なおここでの試行回数は 1000 回とする。

2 ホップの場合

λ を変化させたとき，実測値と理論式(2)の差（誤差）を表したグラフが図 4.16 である．

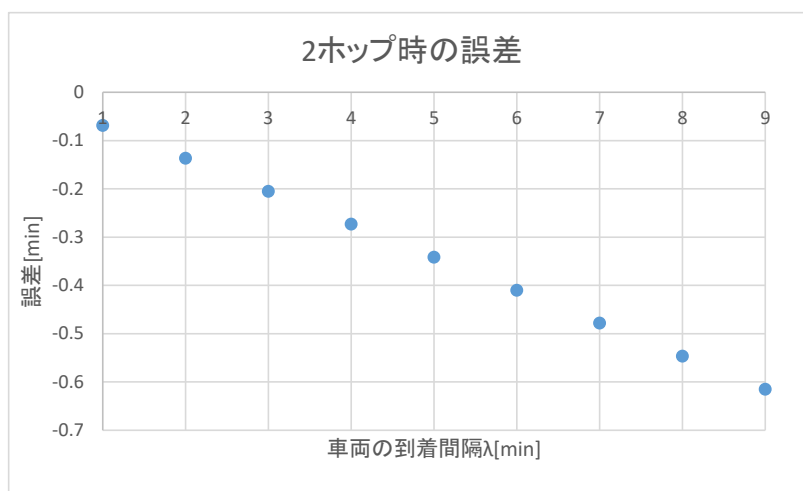


図 4.17 2 ホップの誤差

4.3.1 で行ったシミュレーション時は誤差が少なく精度の高い近似ができていると評価した．しかし λ を増加させていくと誤差も増加していることが示された．

表 4.11 より λ が 1 [min] 増加するごとに誤差は約 0.07 [min] (4.2 [s]) 増加することがわかった．

よって λ が小さいほど，つまり到着間隔時間が短いほど理論式は実測値に近づく値をとる事が示された．

表 4.11 2 ホップの場合の誤差と λ の関係

λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
誤差	-0.0683	-0.1366	-0.20489	-0.27319	-0.34149	-0.40979	-0.47809	-0.54639	-0.61468	-0.68298

10 ホップの場合

遠くの目的地に送る場合は $\lambda=1$ では精度が非常に悪いことを 4.3.1 のシミュレーションで確認した。

遠くに送る場合 (N=10) の時, 理論式 (2) はどのような車両の到着間隔であれば高精度で近似できるか確認する。

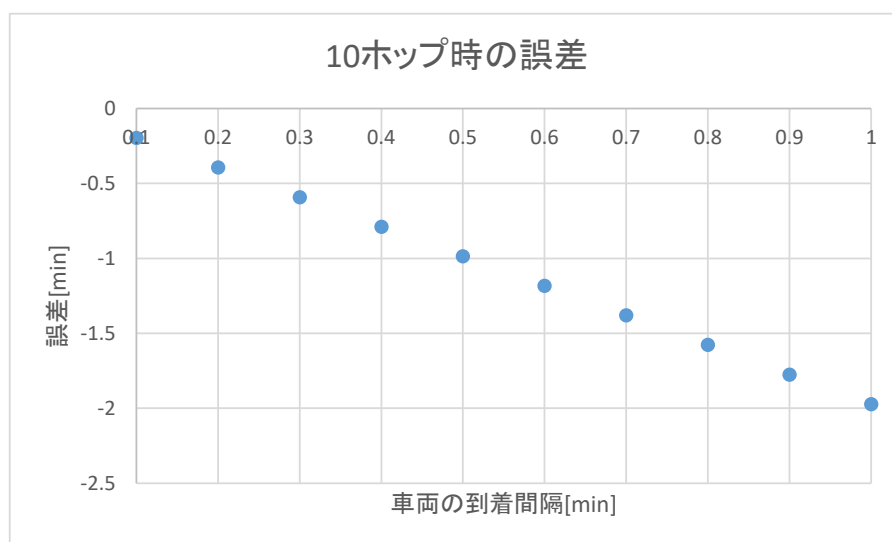


図 4.18 10 ホップの誤差

表 4.12 10 ホップの場合の誤差と λ の関係

λ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
誤差	-0.19727	-0.39453	-0.5918	-0.78906	-0.98633	-1.1836	-1.38086	-1.57813	-1.77539	-1.97266

図 4.17 表 4.12 より $\lambda=0.1$ の時, 近似値は実測値の平均 -0.19727 [min] の値をとることからよい近似ができていると考える。また誤差は到着間隔が 1 [min] 増加するごとに, 約 2 [min] 増加している。

2 ホップの時と同様に λ と誤差は比例関係にあり, λ が小さいほど理論値は実測値に近づく。

4.4.1, 4.4.2 から遠くの目的地に送るとき、車両の発生間隔が十分短いという条件の下理論値は近似されていると言える。

λ を 1 [min] 増加させるとどの程度誤差に影響を与えるのかについて図 4.19 で示した。

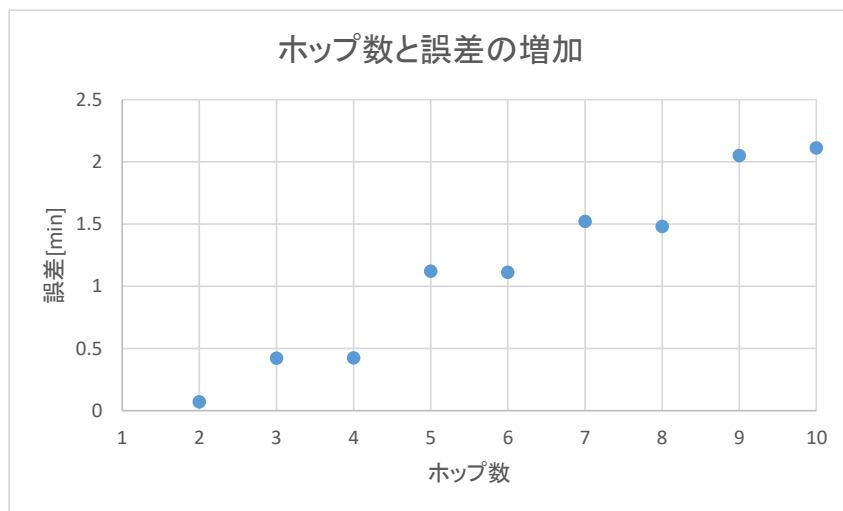


図 4.19 ホップ数と誤差の増加

この図からホップ数 3 と 4, 5 と 6, 7 と 8, 9 と 10 の時、 λ を 1 [min] 増加させた場合の誤差はほぼ等しい値をとることがわかった。つまり発生間隔が 1 [min] 変化した場合、奇数ホップ離れた目的地と奇数+1 ホップ離れた目的地までの情報転送時間の近似値の誤差は変わらないということである。

これは理論式 (2) が必ずしも最短時間で転送できる独立な経路の選択をしていないからと考えられる。図 4.19 で示した黒丸を経由点とする経路をとる方が転送時間は小さく近似される。

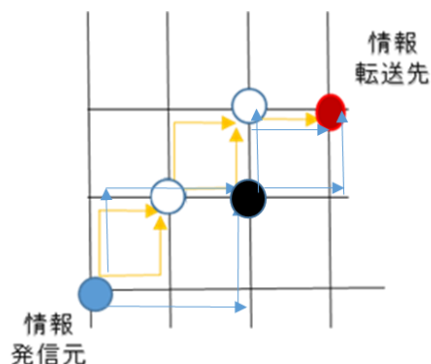


図 4.20 別経由地点をとる経路

第6章 結論

本研究では数理モデルの近似値をシミュレーションによる実測値と比較することで数理モデルの精度評価を行った。

結果として数理モデルの精度は

- ・ 転送先までのホップ数
- ・ 交差点での車両の到着間隔

に依存することがわかった。

4.4 より転送先が近い場合は到着間隔がある程度広がったとしても理論式の精度は保証されている。

転送先が遠い場合は到着間隔が広がると誤差が大きくなり精度が極端に落ちてしまう。転送先が遠い場合、精度が保証される為には到着間隔の値がより小さい場合でなくてはならないことがわかった。

現実問題として発生間隔が限りなく 0 に近づくことはない。

実測値から誤差 ± 1 までを数理モデルが成り立つ条件とした場合、ある道路網の各交差点の車両到着間隔が 30[s] ($\lambda = 0.5[\text{min}]$) とすると数理モデルの精度が保証される最大のホップ数は表 4.12 より 10 ホップであることがわかった。

このシミュレーションでは各交差点の到着率は等しい条件であるが各交差点の車両の到着率は現実にはそれぞれ異なる値をとることから厳密な拡散時間を測定できていない。またサーバを各交差点に配置することは資金面から大きなデメリットとなり現実的でない。サーバの数を限定した場合のシミュレーション評価を行うことが今後の課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり数多くの御助言を頂き、丁寧に指導して下さった塩田茂雄教授に謹んで感謝申し上げます。

加えて、日々様々な場面でお世話になりました塩田研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 渡辺勇太, “車車間アドホックネットワークの接続性に関する研究,” 千葉大学都市環境システム学科修士論文, 2009.
- [2] 島村和希, “車車間アドホックネットワークの接続性と車両移動モデルとの関係,” 千葉大学都市環境システム学科卒業論文, 2010.
- [3] S. Shioda, J. Harada, and Y. Watanabe. “Fundamental characteristics of connectivity in vehicular ad hoc networks,” In proc. IEEE PIMRC, 2008.
- [4] J. He, L. Cai, P. Cheng, and J. Pan, “Delay minimization for data dissemination in large-scale VANETs with buses and taxis,” IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 15, No. 8, pp. 1939-1950, 2016.
- [5] 澤村雄介, 寺西祐一, 竹内淳, 春本要, 西尾章治朗, “遅延耐性ネットワークにおける安定リンクの推定と維持に基づくブロードキャスト効率化手法,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02011) シンポジウム, 2015.
- [6] 房聖恵, “公共交通機関を利用した遅延耐性ネットワークにおける到達要求時間を考慮したフィルタリング手法の提案,” 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文 4598 号, 2010.
- [7] A. Pentland, R. Fletcher, A. Hasson, “DakNet: Rethinking Connectivity in Developing Nations Export,” IEEE Computer, Vol. 37, No. 1, pp. 78–83, 2004.
- [8] 小針暁宏, “確率・統計入門” 岩波書店, 1998.
- [9] 岡本栄一, “数理モデル 社会科学・行動科学のための数学入門 8,” 新曜社, 1988.
- [10] 津田孝夫, “モンテカルロ法とシミュレーション 電子計算機の確率論的応用,” 培風館, 1977.
- [11] <http://www.mlit.go.jp/index.html> 国土交通省, 2017/01/30 アクセス.