

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 本論文の構成.....	2
第 2 章 既存研究.....	3
2.1 概要.....	3
2.2 課題点.....	4
第 3 章 問題設定.....	5
3.1 前提条件.....	5
3.1.1 問題の大枠.....	5
3.1.2 無線 LAN（IEEE802.11 規格）の性質.....	6
3.1.3 無線 LAN 側がボトルネックとなる危険性.....	6
3.1.4 中継機能.....	7
3.2 問題の概要.....	7
3.3 最適化の対象.....	8
3.4 無線 LAN における総スループットの数式モデル.....	9
3.4.1 従来の数式モデル.....	9
3.4.2 本研究の数式モデル.....	10
第 4 章 最適化手法.....	12
4.1 伝送経路最適化.....	12
4.1.1 中継無しにおける経路最適化.....	12
4.1.2 中継有りにおける経路最適化.....	13
4.2 データを送信する“協力端末”の選択方法.....	15

4.2.1 無作為に協力端末を選択した場合の問題点	15
4.2.2 高伝送レート優先選択方式	15
4.3 二点を考慮した協力端末の最適選択	16
4.4 サーバから各協力端末へのデータ送信量	17
4.4.1 各協力端末に等しくデータを送信する場合	17
4.4.2 最も離れた協力端末への送信データ量を制限する場合	18
第5章 シミュレーション実験	21
5.1 シミュレーション設定	21
5.2 シミュレーション結果Ⅰ（端末台数変化）	24
5.2.1 協力端末の選択方式	24
5.2.2 中継の有効性	27
5.2.3 データ制限の有効性	31
5.2.4 総スループットの変化から見る制御アルゴリズム最適化の評価	32
5.3 シミュレーション結果Ⅱ（領域範囲変化）	34
第6章 結論と今後の課題	36
参考文献	37
謝辞	39

第1章 序論

1.1 研究背景

カメラを搭載した機器（以下，本研究ではサーバと表現）が取得した大容量動画像データ等を，クラウド上のデータセンターに送信し，そこで分析する手法が今後一般的になると想定される。一方，クラウドにデータを送信するための（LTE 回線などの）通信手段をサーバが持たない場合，通信手段を持つ周囲の端末群に，無線 LAN 等でデータを一旦送信し，各端末は受け取ったデータを LTE 回線でクラウドに並列伝送する方法が考えられる。

実際に，無線 LAN と LTE 回線を併用してデータを送信するというテーマを対象とした問題は様々な分野において研究されている。例として，交通分野では，車載カメラや道路状況監視ライブカメラからの動画像データを LTE 回線（カメラからベースセンターへの通信）と無線 LAN（車車間通信）を併用することで，ドライバー間でリアルタイムの交通情報を共有できるシステムの実用化に向けた研究[1]が存在したり，防災分野では，災害地域を調査しデータを LTE 回線を用いてベースセンターに転送するロボット群が，無線 LAN を用いて周囲のロボットと通信を行い，そのロボットの LTE 回線を一時的に融通してもらう制御システムについての研究[2][3][4]などが行われている。

1.2 研究目的

本研究では，効率的にデータをクラウドに送信するために，サーバの周囲に存在する端末群の中からデータ転送を依頼する端末を適切に判断し，クラウドへのデータ送信の総スループット（通信速度）を最大化するための制御アルゴリズムについて考察する。

1.3 本論文の構成

以下に，本論文の構成内容を述べる。

第1章 序章

内容：本研究の概要について

第2章 既存研究

内容：参考とした既存研究の概要とその課題点について

第3章 問題設定

内容：本研究における問題の設定と概要，そして制御アルゴリズムの評価を行うための数式モデルについて

第4章 最適化手法

内容：最適な制御アルゴリズムの構築について

第5章 シミュレーション実験

内容：シミュレーション設定とその結果について

第6章 結論と今後の課題

内容：本研究の総括と今後の研究の課題点について

第2章 既存研究

本章では，無線 LAN と LTE 回線を併用してデータを送信するというテーマを対象とした研究の例として 1.1 節で挙げ，本研究の参考とした文献[2][3][4]の既存研究の概要とその課題点について述べる。

2.1 概要

近年，人の入り込めない災害地域を調査するロボット群の行動システムの開発が行われている[5][6]。災害地域の調査データを LTE 回線を用いてベースセンターに転送する複数のロボット群において，突発的な大容量データの送信が必要となった場合に，無線 LAN を用いて周囲のロボットと通信を行い，そのロボットの LTE 回線を一時的に融通してもらう方法でデータを送信するシステムをモデル化し，評価を行う。

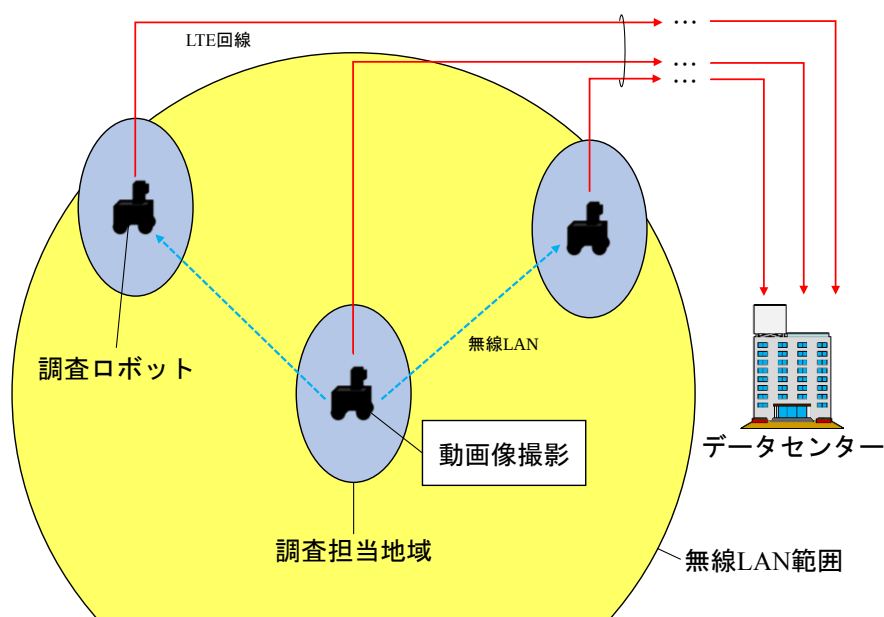


図 2.1 協働ロボットシステム

この研究の特徴として，ロボットの移動のコストと他のロボットへの通信協力によるメリットを考慮に入れた「報酬」と呼ばれる評価指標を導入し，この報酬を最大化する問題を設定している。報酬は以下の2種類に分けられる。

- 通常報酬：各ロボットが自身の調査を行うことでそれぞれ得る報酬。他のロボットへの通信協力により自身の調査担当地域から離れると、その移動距離に応じて単調減少する関数である。
- 特別報酬：所望の通信を達成したときにシステム全体で得られる報酬。所望の通信を完了する時間に対して単調減少する関数である。調査結果を短時間で転送完了するほどよいと考えられるため、複数のロボットが協力することで大きな値を得られる。

この2種類の報酬システムの総和で、移動コストと通信協力によるメリットを一元的に評価する。

2.2 課題点

[2]の研究では、各ロボットに中継機能の導入が提案されている。ここでいう中継機能とは、ロボット間の通信が行われる際に、他のロボットがその通信間に入る機能のことであり、中継役のロボットが適切な位置に存在すれば、この中継機能によって各ロボット間の通信距離が短くなり、高スループットを獲得することができる（中継機能については第3章で改めて説明する）。位置によっては[2][3]では全てのロボットが一直線上の配置（中継の効果が最も表れる位置関係）でしか評価を行っていないが、[4]の研究ではヒューリスティック手法を用いて計算コストを削減し、一直線以外の位置関係の場合も評価している。しかし、計算量を削減し近似的に評価を行っても、ロボットの台数を3台に制限（中継元、中継、中継先）して考えなければ、精度の高い局所的最適解が求まらない。

本研究では、ロボットのように移動可能ではなく、（大容量データを所持する）サーバとその周囲の端末群の位置を固定することで、より多くの端末台数でのクラウドへのデータ伝送について考察する。

第3章 問題設定

本章では，本研究の前提条件，また制御アルゴリズムの評価を行うためのクラウドへのデータ送信の総スループットの数式モデルについて述べる。

3.1 前提条件

3.1.1 問題の大枠

大量のデータを保持する 1 台のサーバと，その近隣に N 台の端末が置かれた環境を想定する。この N 台の端末はデータをクラウドに送信する LTE 回線を有する。サーバを含む端末間は共通のチャンネル（データを転送する経路）を用いた無線 LAN 通信が可能であるとする。図 3.1 は無線 LAN を用いて N 台の端末の中から複数台に転送協力を依頼し，サーバと協力端末の LTE 回線を併用してクラウドへのデータ転送するイメージ図である。また，転送協力とは，サーバから無線 LAN を介してデータを受け取って，クラウドへ LTE 回線を利用して送信することとし，協力端末とは，転送協力の依頼を受けた端末を指す。

サーバは（N 台中の）幾つかの端末に無線 LAN を介してデータを等分配しつつ，各端末は受け取ったデータを LTE 回線でクラウドに並列伝送することを考える。

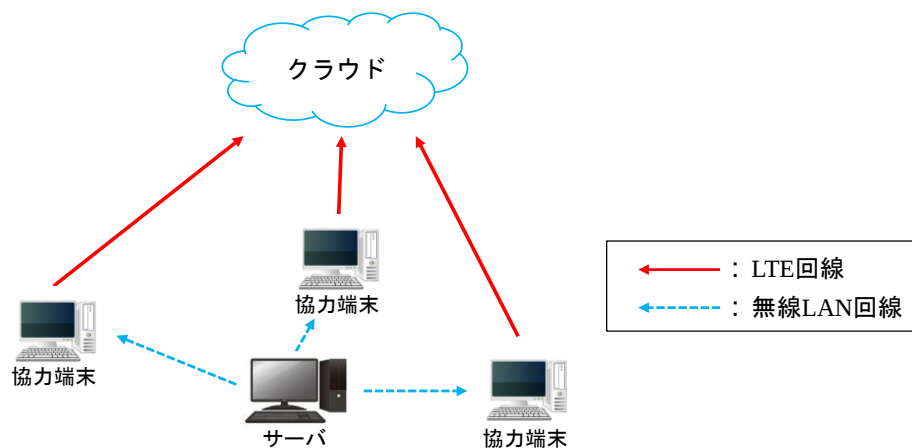


図 3.1 クラウドへの並列データ伝送

3.1.2 無線 LAN（IEEE802.11 規格）の性質

本研究で利用する IEEE802.11 規格の無線 LAN の性質として、無線 LAN との通信機会は各端末均等に与えられる。この性質より、共通のチャネルを用いた場合、それぞれのサーバ→協力端末間のスループットは同じである。また、無線 LAN のスループットは協力端末の台数増加に応じて単調減少する関数である。本研究で利用する数式モデルについては 3.4 節で紹介する。

3.1.3 無線 LAN 側がボトルネックとなる危険性

3.1.2 節でも述べた通り、無線 LAN のスループットは協力端末の台数増加に応じて単調減少するので、協力端末の台数を増やしていくと、サーバ→協力端末間における無線 LAN のスループットが LTE 回線のスループットを下回る（無線 LAN 側がボトルネックになる）場合がある。無線 LAN 側がボトルネックになると、かえってデータの伝送に時間がかかってしまう可能性が出てくる。

図 3.2 において、 T_{WiFi} は協力端末 2 台のときの無線 LAN のスループット、 T'_{WiFi} は協力端末 3 台のときの無線 LAN のスループット、 T_{LTE} は LTE 回線のスループットを指す。仮に、 $T_{WiFi} > T_{LTE} > T'_{WiFi}$ とすると、協力端末の台数が 2 台→3 台に増加したときに、ボトルネックが LTE 回線側から無線 LAN 側に入れ替わったことになる。この場合、総スループットは $2 \times T_{LTE}$ （協力端末 2 台）、 $3 \times T'_{WiFi}$ （協力端末 3 台）となり、もし協力端末が 2 台のときの総スループットの方が大きければ、協力端末③には繋がらない方が良くと言える。これについては 4.4.1 節で詳しく説明する。

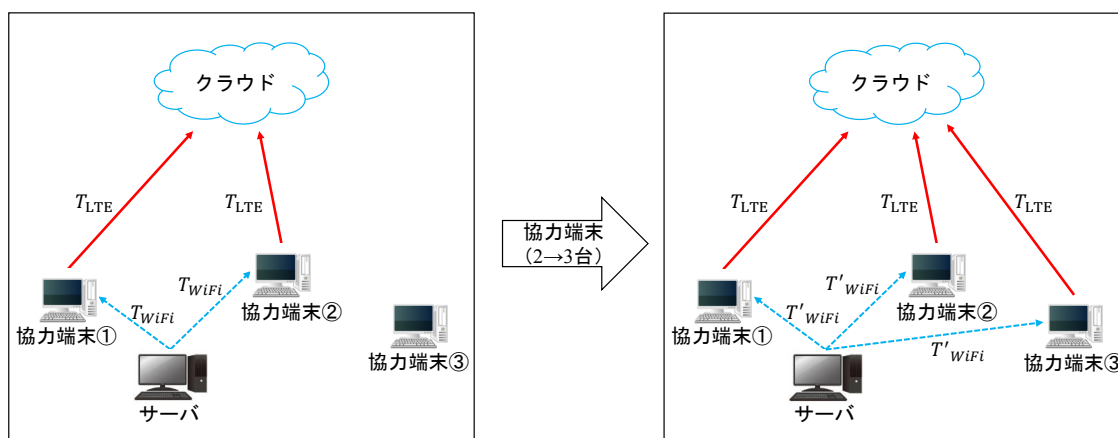


図 3.2 協力端末台数の増加とスループットの変化

3.1.4 中継機能

2.2 節でも触れた，端末の“中継機能”について述べる。本研究における中継機能とは，（サーバを含む）端末間の通信が行われる際に，他の端末がその通信間に入る機能のことであり，中継役の端末が適切な位置に存在すれば，この中継機能によって各端末間の通信距離が短くなり，高スループットを獲得することができる[2]。図 3.3 を例に説明すると，協力端末②が適切な位置に存在すれば，サーバ→協力端末①間で直接通信を行うよりも，協力端末②を中継の役割として通信間に入れ，サーバ→協力端末②→協力端末①とした方が高スループットを得られる。

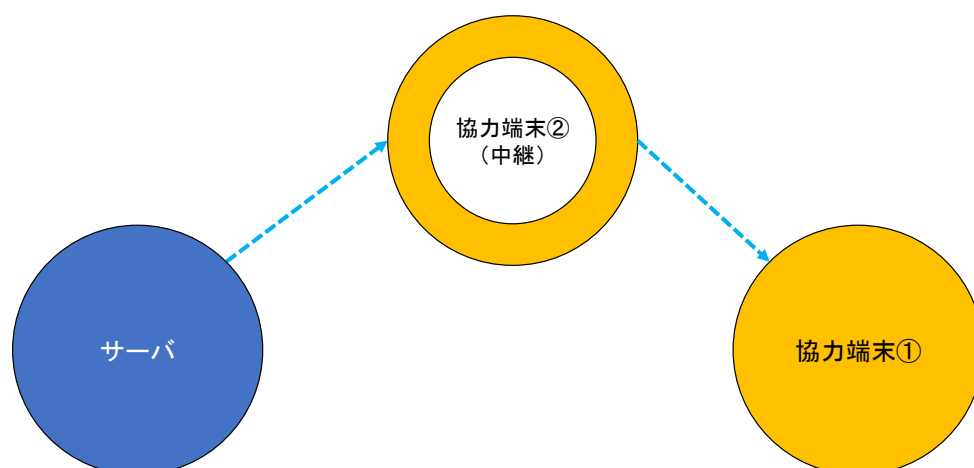


図 3.3 サーバから協力端末①へのデータ伝送

3.2 問題の概要

本研究で行う問題の概要を，3.1 節の前提条件を元に整理する。この問題を考えるにあたって重要な点が二つある。

まず一つ目として，『データ転送を依頼する協力端末の選択台数の適切な絞り込み』を行うことである。3.1.節で説明した通り，無線 LAN のスループットは協力端末の台数増加に応じて単調減少する関数であり，協力端末を選択しすぎてしまうと無線 LAN

側がボトルネックとなってしまう、かえってデータの伝送に時間がかかってしまう可能性があるので、選択台数を適切に絞り込むことが必要である。

二つ目としては、『中継機能の重要性』である。ある（サーバを含む）端末間の通信において、中継役として他の端末がその間に入ることによって各端末間の通信距離が短くなり、サーバからの直接通信のみ（中継機能を用いない）の場合よりも高スループットを獲得することが期待できるが、3.1.4 節で説明した通り、中継役の端末が適切な位置に存在しなければ、かえってデータの伝送に時間がかかってしまう可能性がある。つまり、中継役を担う端末を適切に選択することが重要である。

以上から、この問題は、「どのように何台の端末を協力端末として選択するか」と「サーバから各端末にどのような（中継を許す）伝送経路でデータを送ればいいのか」についての最適化問題だと言える。

3.3 最適化の対象

3.1, 3.2 節より、クラウドへのデータ送信の総スループットを最大化するために以下の二点における最適化の手法を順に考察する。

- 無線 LAN によるサーバ→端末間の伝送経路（4.1 節）
- データを送信する“協力端末”の選択方法（4.2 節）

3.2 節では、『“協力端末”の選択方法』→『サーバからの伝送経路』の順で述べているが、サーバからの伝送経路が短い端末から“協力端末”として選択していく最適化制御の流れになる。

3.4 無線 LAN における総スループットの数式モデル

3.4.1 従来の数式モデル

ある端末（分かりやすいようにサーバと仮定する）から各々の端末間における（IEEE802.11 規格の）無線 LAN のスループットは調和平均によって求められる。

サーバ→端末間のスループットを求める式は

$$T_{average}(n) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i \frac{1}{V_i}} \quad (3.1)$$

となる[7]。ここで、 n は端末の台数、 V_i は無線 LAN を占有した場合のサーバ→ i 番目の端末間のスループット、 k_i はサーバ→ i 番目の端末間のリンクの使用回数を指す。

無線 LAN は各端末に通信機会を均等に与えるため、協力端末の中に低伝送レートの通信（通信距離が長い）が存在する場合に、他の高伝送レートの通信（通信距離が短い）が低伝送レートの通信の影響を受け、無線 LAN 全体のスループットが低下する Performance Anomaly（図 3.4）が起こりうる可能性がある[8]。(3.1)式はこの無線 LAN の性質の問題点を含んでいる。そこで、この無線 LAN の性質をふまえて制御する数式モデルを 3.4.2 節で紹介する。

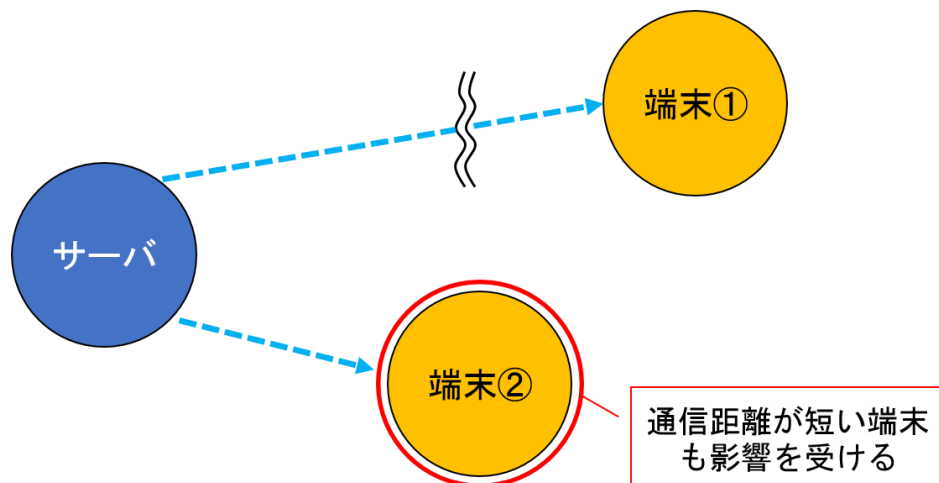


図 3.4 Performance Anomaly 問題

3.4.2 本研究の数式モデル

端末 i から端末 j ($i, j \in (0, \dots, N)$; 端末 0 はサーバを表すとする) に無線 LAN を占有してデータを直接送信する際の通信速度を $V_{i,j}$ とする。また、協力端末の番号の集合を A とする。さらに、端末がサーバからデータを受け取る際に、任意の台数の端末の中継を許すこととする。端末 i , $j \in A$ がサーバからデータを受け取る際の経路は図 3.5 のように表すとする。

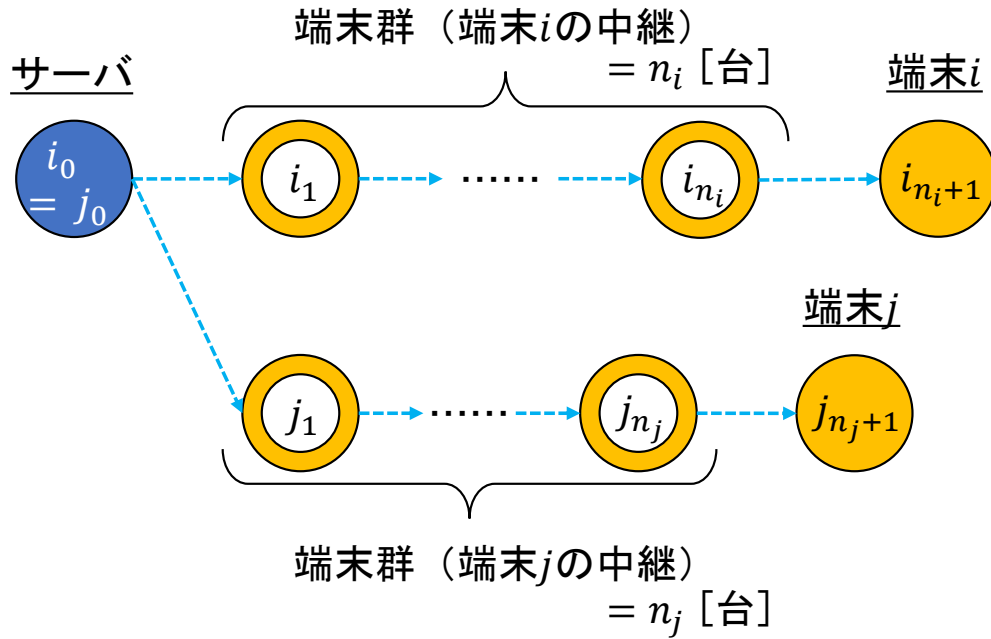


図 3.5 サーバから端末 i , j のデータ伝送経路

以下、便宜的に i_0 でサーバを、 i_{n_i+1} で端末 i を表す（つまり、 $i_0 = 0$, $i_{n_i+1} = i$ ）。端末 j の場合も同様である。注意したいのは、図 3.5 はあくまでサーバ→端末 i , j 間の経路の順番として端末群に番号を振っている（ i の右下の添え字）だけであり、端末の位置を表しているわけではない。

無線 LAN の利用機会が各端末に均等に割り当てられるならば，サーバ→端末 i 間のスループットは端末 i の特性に依存せず，次の調和平均の式で与えられる。

$$T_w(A) = \frac{1}{\sum_{i \in A} \sum_{k=0}^{n_i} \frac{1}{V_{i_k, i_{k+1}}}} \quad (3.2)$$

データを受け取った端末は，サーバから受信したデータを LTE 回線によりクラウドへ転送する。LTE 回線のスループットを T_L とすると，各端末からクラウドへデータを送信する際の最終的なスループット T は $T_w(A)$ と T_L の小さい方で決まる。これは 3.1.3 節で説明したボトルネックである回線側のスループット分しか発揮できない，つまり無線 LAN がボトルネックである場合は，LTE 回線の帯域をすべて利用することはできないからである。したがって，クラウドへのデータ送信の総スループットは

$$T_{total} = |A| \min\{T_w(A), T_L\} \quad (3.3)$$

と表せる。ここで $|A|$ とは，協力端末の番号の集合 A の要素数である。(3.3)式の総スループットの値で制御アルゴリズムの評価を行う。また，この式については 4.4.1 節で改めて説明する。

第4章 最適化手法

本章では、3.3 節でも触れたクラウドへのデータ送信の総スループットを最大化するための二点における最適化の手法についてそれぞれ 4.1 と 4.2 節で述べ、4.3 節でその二点を考慮した協力端末の最適選択について述べる。

4.1 伝送経路最適化

(サーバを含む) 端末 i –端末 j 間の距離が $1/V_{i,j}$ で与えられる仮想的な無向グラフを考える。そのグラフ上でサーバから端末 $i(i \in A)$ への最短経路を求めると、それが 3.4.2 節の式(3.2)の右辺の分母を最小化、つまり $T_w(A)$ を最大化する経路となる。本章では、最短経路の探索について、中継無しと中継有りの場合に分けてそれぞれ考察する。

4.1.1 中継無しにおける経路最適化

中継機能を利用しない、つまりサーバからの直接通信でのみデータを伝送する場合、サーバ→端末 i 間の直接距離 $1/V_{0,i}$ がそのまま最短経路となる。図 4.1 は端末が 3 台であるときの経路図 (最短経路) を表す。

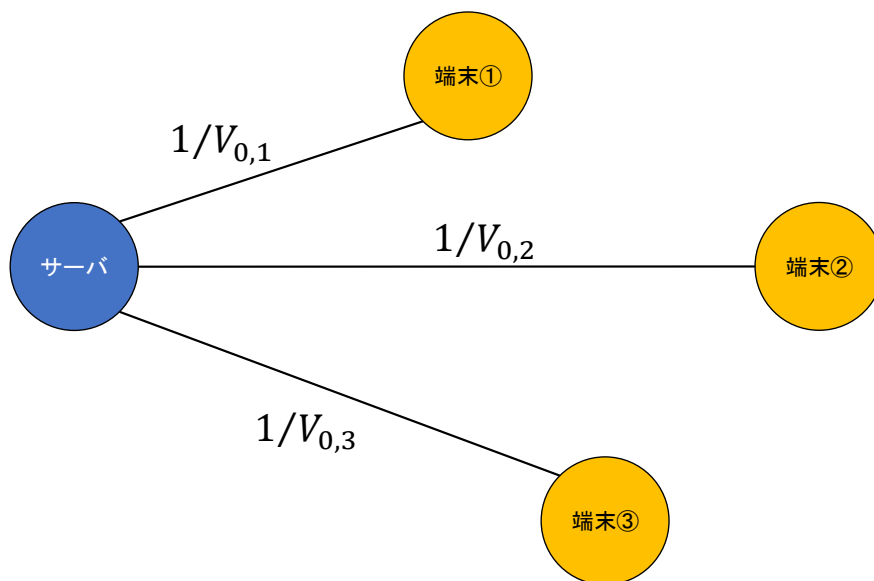


図 4.1 中継無しにおける経路図と最短経路 (端末 3 台のとき)

4.1.2 中継有りにおける経路最適化

中継機能を利用する場合，最短経路の初期設定を，サーバ→端末*i*間の直接距離 $1/V_{0,i}$ とし，ダイクストラ法を用いて最短経路を更新していく。今回は例として図 4.1 同様，端末 3 台の時にについて考える（図 4.2）。

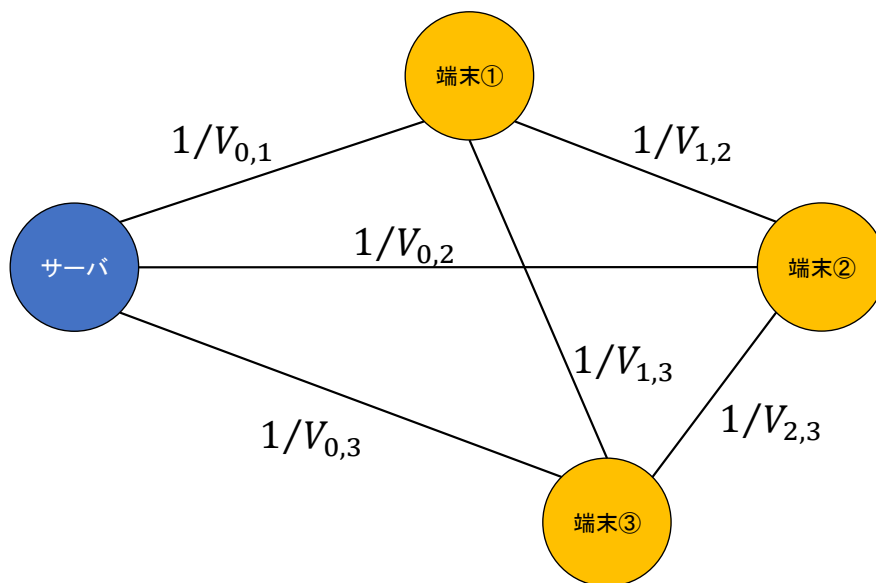


図 4.2 中継有りにおける経路図（端末 3 台のとき）

図 4.3 の経路更新の一例を使って説明する。

<Step.0> 端末①，端末②，端末③の最短経路長（ L_1 ， L_2 ， L_3 ）の初期設定をそれぞれサーバの直接距離 $1/V_{0,1}$ ， $1/V_{0,2}$ ， $1/V_{0,3}$ と更新する。

<Step.1> サーバとの経路長が最短（Step.1 では直接距離が一番近い）である端末①を選択し，サーバ→端末①間の最短経路長 L_1 を $1/V_{0,1}$ で確定する。そして，端末①と直接通信できる端末②，端末③の暫定的な最短経路長を更新するか判定する。今回は，端末②の最短距離 L_2 を $1/V_{0,1} + 1/V_{1,2}$ に更新する。

<Step.2> 次にサーバとの経路長が短い端末③を選択し，サーバ→端末③間の最短経路長 L_3 を $1/V_{0,3}$ で確定する。そして，端末③と直接通信でき，最短経路が確定し

ていない端末②の暫定的な最短経路長を更新するか判定する。今回は更新なし。

<Step.3> 次にサーバとの経路長が短い（今回においては最も経路長が長い） 端末②を選択し，サーバ→端末②間の最短経路長 L_2 を $1/V_{0,1} + 1/V_{1,2}$ で確定する。これですべての端末のサーバからの最短経路が決定した。

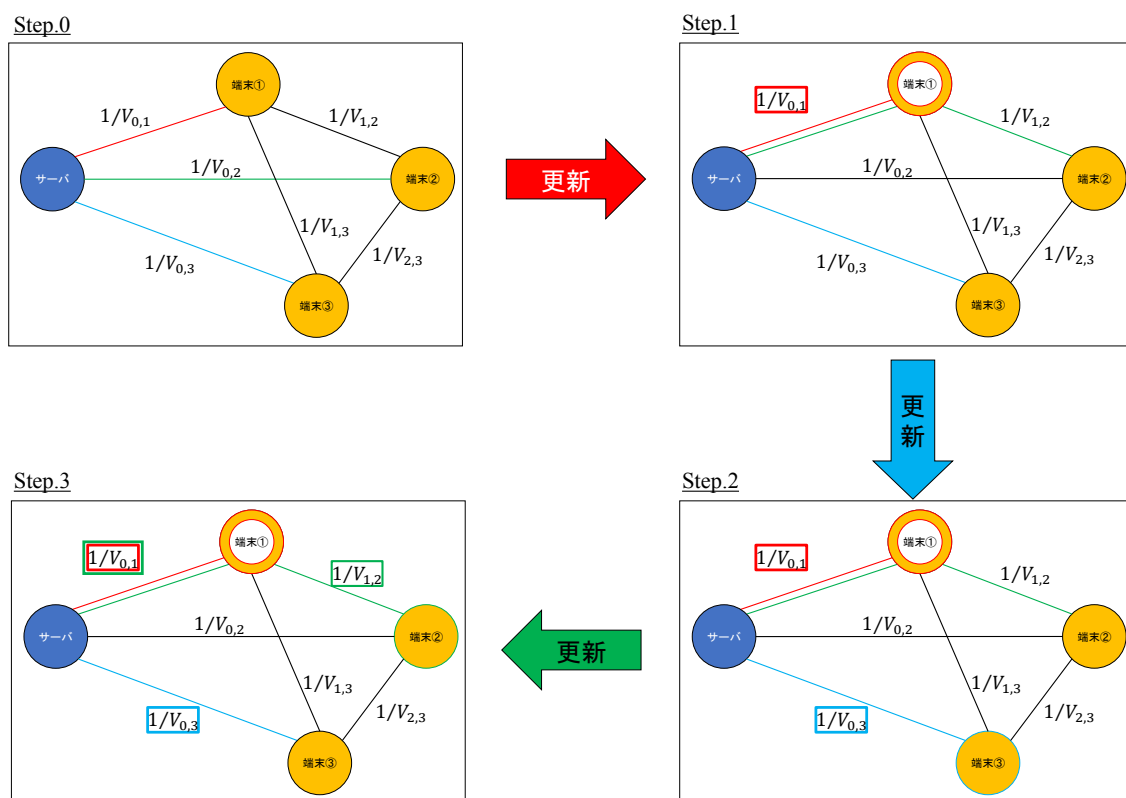


図 4.3 中継有りにおける最短経路の更新の例（端末 3 台のとき）

この操作を行うことによって，サーバ→端末間の最短経路長が決まるだけでなく，中継機能を利用する端末が自動的に決まる（図 4.3 では，サーバ→端末②間で定めた最短経路で通信行った場合，端末①が中継役となる）。

このダイクストラ法によるサーバ→端末間の経路最適化の操作を一般化したフローチャートを図 4.4 に示す。

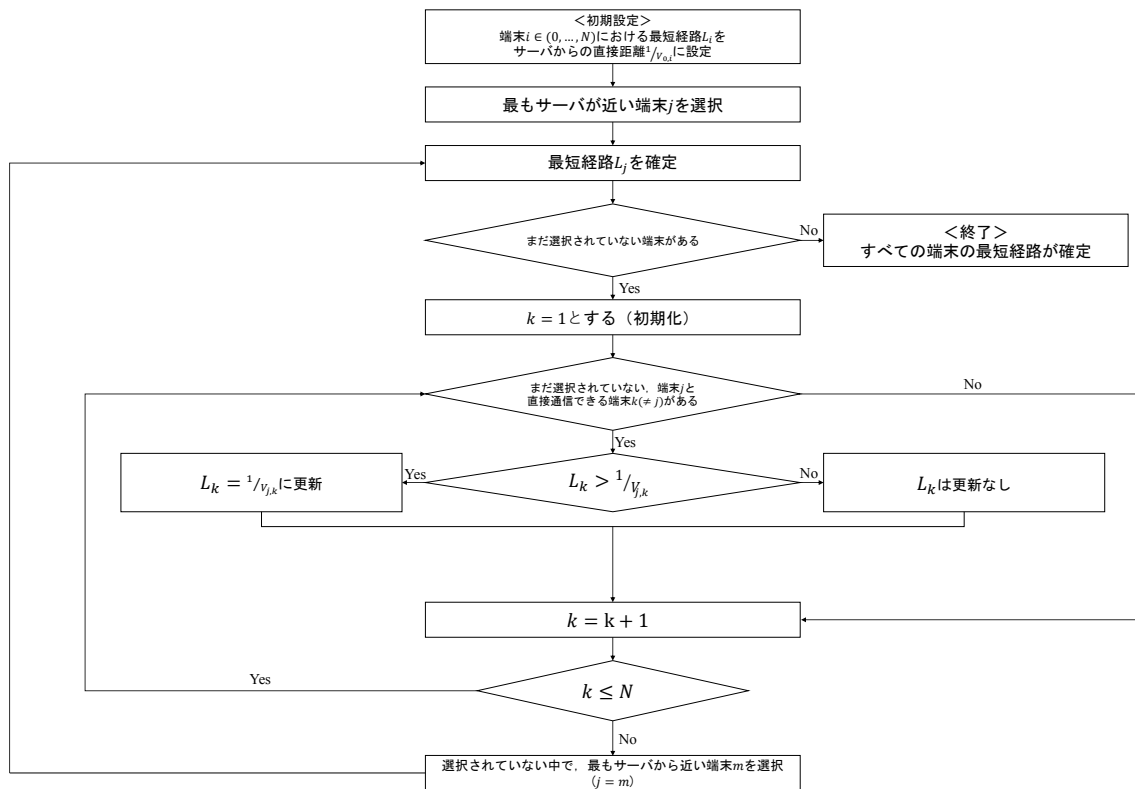


図 4.4 経路最適化のフローチャート

4.2 データを送信する“協力端末”の選択方法

4.2.1 無作為に協力端末を選択した場合の問題点

無線 LAN との通信機会は均等に与えられることから、通信距離が長い端末を協力端末に選択してしまうと、高伝送レートの通信（通信距離が短い）が低伝送レートの通信（通信距離が長い）に影響され、全体のスループットが低下するという Performance Anomaly が生じてしまう（3.4.1 節）。

4.2.2 高伝送レート優先選択方式

Performance Anomaly の対策として、近距離優先通信制御方式[3]に類似した手法（高伝送レート優先選択方式）を採用する。サーバからの伝送レートの高い端末を優先的

に選択し、選択された各端末への無線 LAN によるスループットが LTE 回線のスループットを上回る間は、協力端末群に新たに選択した端末を加える操作を繰り返すことで、協力端末群を構成する。

4.3 二点を考慮した協力端末の最適選択

4.1 節の手法で端末毎に最適経路を求め、その最適経路に沿った端末 i への伝送レートを

$$\tilde{V}_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\left(\sum_{k=0}^{n_i} \frac{1}{V_{i_k, i_{k+1}}} \right)} \quad (4.1)$$

により定義する。初期状態で協力端末の番号の集合 $A = \emptyset$ とし、 $\tilde{V}_i$ が最大の端末を選び、 A に追加して $T_w(A)$ を計算する。続けて、 $\tilde{V}_i$ が次に大きい端末を選び、 A に追加して $T_w(A)$ を再計算し、依然として $T_w(A) > T_L$ であるかを確認する。この手順を $T_w(A) \leq T_L$ となるまで繰り返す（図 4.5）。

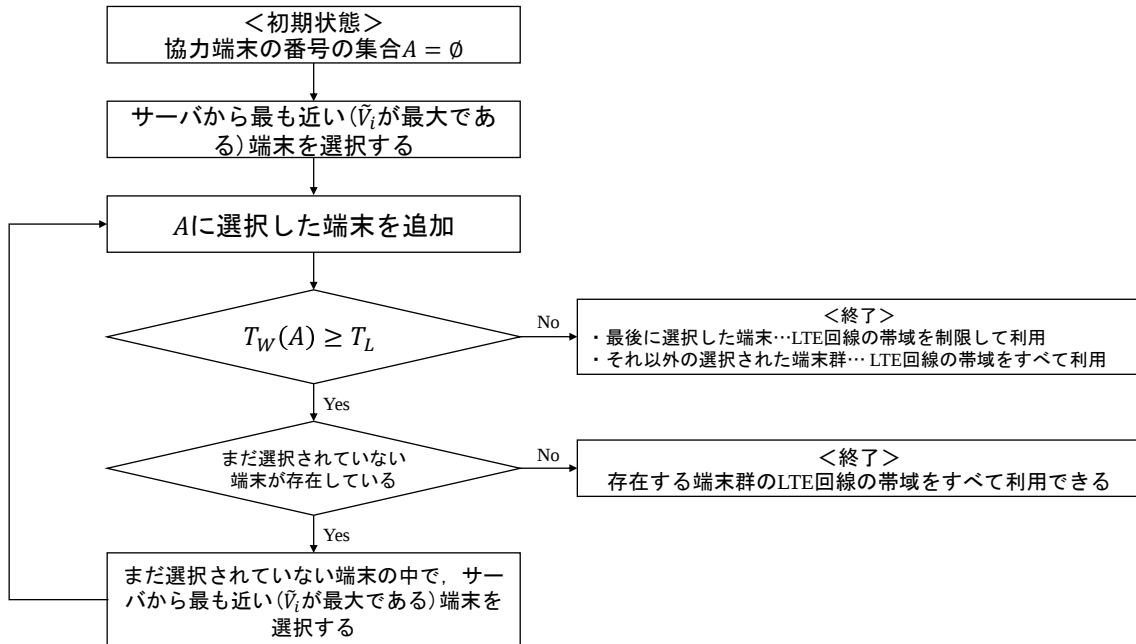


図 4.5 協力端末の最適選択のフローチャート

【注意点】協力端末として選択されなかった端末は協力端末の中継役になれるのか

最適選択で協力端末の選択を行う場合において、ある端末とその中継役となる端末が存在すると仮定する。ここで、「協力端末として選択されなかった端末は、協力端末の中継役になれる」ということに注意したい。伝送経路最適化において、サーバからの通信距離が近い端末順に最短経路が確定するため、最短経路 $L_{中継役} < L_{中継先}$ であることから、中継役の端末が協力端末として選択されず、中継先の端末が選択されることはない。

しかし、中継有りにおける伝送経路最適化で行ったとしても、無作為に協力端末を選択した場合は、「協力端末として選択されなかった端末は、協力端末の中継役になる可能性がある」ということにも注意しておきたい。その原因としては、伝送経路最適化において、サーバから通信距離が近い端末順に最短経路が確定し、 $L_{中継役} < L_{中継先}$ となるが、通信距離が近い順に協力端末を選択するわけではない（無作為に選択する）からである。

4.4 サーバから各協力端末へのデータ送信量

4.4.1 各協力端末に等しくデータを送信する場合

協力端末を 4.3 節で提案した最適選択で n 台選び、無線 LAN によりサーバから各協力端末に等しくデータを送信する場合を考える。このとき、サーバ→協力端末 i ($i = 1, \dots, n$)間のスループットは、式(4.1)を用いて次の式で与えられる。

$$T_w(n) = \frac{1}{\sum_{i \in A} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{V}_i}} \quad (4.2)$$

(式(4.2)では、協力端末の番号 i は選択された順番を表す)

ここで $T_w(n)$ は i によらないことに注意したい。LTE 回線のスループットを T_L とすると、端末 i からクラウドへデータを送信する際の最終的なスループット $T(n)$ は $T_w(n)$ と T_L の小さい方で決まる。つまり、

$$T(n) = \min\{T_w(n), T_L\} = \min\left\{\frac{1}{\sum_{i \in A} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tilde{V}_i}}, T_L\right\}$$

よって、協力端末を n 台利用したときの総スループットは

$$T_{total}(n) = \sum_{i=1}^n T(n) = n \times \min\{T_w(n), T_L\} = |A| \min\{T_w(A), T_L\}$$

これは 3.4.2 節の式(3.3)と一致する（ここでの協力端末の番号の集合の要素数 $|A| = n$ ）。

$T_w(n)$ は n に関する単調減少関数である。いま、全ての $i(i = 1, \dots, N)$ について $\tilde{V}_i \geq T_L$ を仮定すると、 n が小さいときは、 $T_w(n) \geq T_L$ であり、 n が大きくなると、ある台数 n^* を超えたときにこの不等号が逆転する。これは 3.1.3 節で説明したボトルネックの切り替わりの影響である。この場合、協力端末が n^* 台 $\rightarrow(n^* + 1)$ 台に増えたときに、LTE 回線 $\rightarrow$ 無線 LAN にボトルネックが切り替わるということになる。よって、

$$T_w(n^*) \geq T_L \geq T_w(n^* + 1)$$

が成り立つ。

したがって、総スループットは

$$T_{total}(n) = n \times \min\{T_w(n), T_L\} = \begin{cases} nT_L & (n \leq n^*) \\ \frac{n}{\sum_{i \in A} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tilde{V}_i}} & (n > n^*) \end{cases}$$

であり、かつ $T_{total}(n)$ は $n = n^*$ か $n = n^* + 1$ のいずれかで最大値をとる。

4.4.2 最も離れた協力端末への送信データ量を制限する場合

全協力端末の LTE 回線の帯域を最大限まで利用するため、最も離れた協力端末へのデータ送信量を制限する方法を提案する。協力端末の選択方法を 4.3 節の最適選択、協力端末の番号の集合の要素数 $|A| = n^* + 1$ とし、協力端末が n^* 台 $\rightarrow(n^* + 1)$ 台に増えたときに、LTE 回線 $\rightarrow$ 無線 LAN にボトルネックが切り替わるとする。 $(n^* + 1)$ 台の端

末を協力端末として選択する場合，サーバから $1 \sim n^*$ 台目の各協力端末に送信するデータ量を 1 とすると， $(n^* + 1)$ 台目に送るデータ量を a ($0 \leq a \leq 1$) と制限して送ることとで，全協力端末の LTE 回線の帯域を最大限まで利用することが可能となる。図 4.6 は $n^* = 2$ のとき，1, 2 台目の協力端末にはデータ量を 1 で送り，3 台目にはデータ量を a に制限して送るイメージ図である。

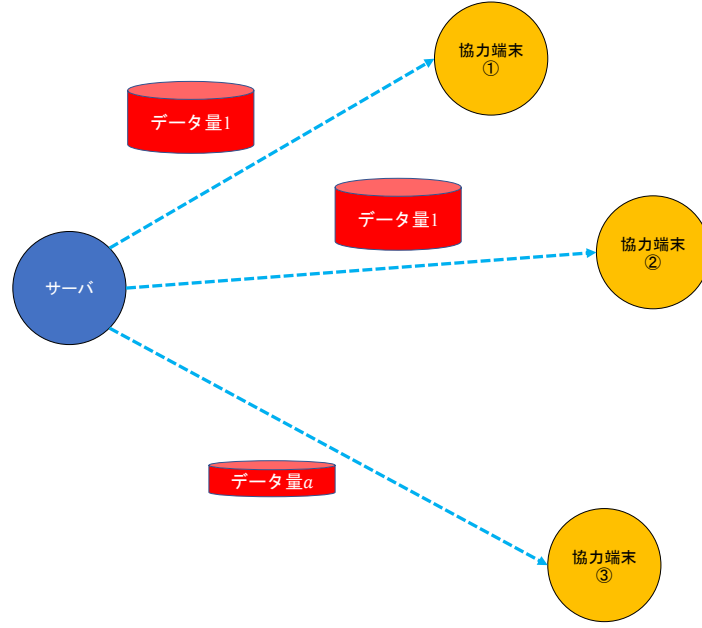


図 4.6 データ送信量制限 ($n^* = 2$ の場合)

この送信データ量の制限を行う場合のサーバ→協力端末 i ($i = 1, \dots, n^* + 1$) 間のスループットを $T_w(n^* + 1; a)$ とすると，(4.2) 式を変化させて

$$T_w(n^* + 1; a) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i \in A} (\sum_{i=1}^{n^*} \frac{1}{\tilde{V}_i} + \frac{a}{\tilde{V}_{n^*+1}})} & (i = 1, \dots, n^*) \\ \frac{a}{\sum_{i \in A} (\sum_{i=1}^{n^*} \frac{1}{\tilde{V}_i} + \frac{a}{\tilde{V}_{n^*+1}})} & (i = n^* + 1) \end{cases} \quad (4.3)$$

となる（式(4.3)では，協力端末の番号 i は選択された順番を表す）。

この手法で一番重要なのは，制限データ送信量 a の値である。 a の値を適切に定めることで協力端末の LTE 回線の帯域を最大限まで利用することができる。端末 i ($i = 1, \dots, n^*$) について

$$T_w(n^* + 1; a) = T_L$$

が満たされるように a を定めると、端末 $n^* + 1$ のスループットは、

$$T_w(n^* + 1; a) = a \times T_L$$

となる。端末 $n^* + 1$ に a の量のデータを送ることとしたときの総スループットを $T_{total}(n^* + 1; a)$ とすると、(3.3)式を用いて以下が得られる。

$$\begin{aligned} T_{total}(n^* + 1; a) &= |A| \min\{T_w(n^* + 1; a), T_L\} \\ &= \sum_{i=1}^{n^*} \min\{T_w(n^* + 1; a), T_L\} + \min\{T_w(n^* + 1; a), T_L\} \\ &= \sum_{i=1}^{n^*} \min\{T_{LTE}, T_{LTE}\} + \min\{a \times T_L, T_L\} \\ &= \sum_{i=1}^{n^*} \min\{T_{LTE}, T_{LTE}\} + \min\{a \times T_L, T_L\} \\ &= n^* \times T_L + a \times T_L \end{aligned}$$

ここで

$$T_{total}(n^*) = T_{total}(n^* + 1; 0) = n^* \times T_L \leq n^* \times T_L + a \times T_L = T_{total}(n^* + 1; a)$$

であり、かつ

$$\begin{aligned} T_{total}(n^* + 1) &= T_{total}(n^* + 1; a) - \frac{n^* + a}{\sum_{i \in A} (\sum_{i=1}^{n^*} \frac{1}{\tilde{V}_i} + \frac{a}{\tilde{V}_{n^*+1}})} + \frac{n^* + 1}{\sum_{i \in A} (\sum_{i=1}^{n^*+1} \frac{1}{\tilde{V}_i})} \\ &= T_{total}(n^* + 1; a) - \frac{(1-a) \sum_{i=1}^{n^*} (\frac{1}{\tilde{V}_{n^*+1}} - \frac{1}{\tilde{V}_i})}{\sum_{i \in A} (\sum_{i=1}^{n^*} \frac{1}{\tilde{V}_i} + \frac{a}{\tilde{V}_{n^*+1}}) (\sum_{i=1}^{n^*+1} \frac{1}{\tilde{V}_i})} \leq T_{total}(n^* + 1; a) \end{aligned}$$

※青部分 $\cdots(n^* + 1)$ 台目には a だけデータを送る場合、黄部分 $\cdots(n^* + 1)$ 台目にもデータ量1で送る場合

すなわち、各端末に均等にデータを振り分けるのではなく、端末 $n^* + 1$ に制限してデータを振り分けることで、総スループットを若干大きくすることができる。

第5章 シミュレーション実験

本章では，第4章で提案した“協力端末の最適選択手法”について他の選択方法の含めてシミュレーションを行い，それぞれの結果（総スループット）を比較し評価する。また，“端末の中継機能の有無”，“サーバから各協力端末へのデータ送信量”はどのように総スループットに関係するか検証する。

5.1 シミュレーション設定

■ 環境設定

$s \times s[m]$ の正方形の領域の中心にサーバを置き，さらに領域内のランダムな位置に端末を N 台配置する。 s ， N はシミュレーションのパターンによって変化させる。

■ 通信モデル

クラウド上のデータセンターへのデータ送信には一般的に使用されている LTE 回線を利用し，端末の位置や台数によらずスループットは一定とする。しかし，サーバ自身は LTE 回線を利用できない。（サーバを含む）端末間の通信には，IEEE802.11 規格の無線 LAN のアドホックモード（アクセスポイントを利用しない）を用いて通信する。この機能により端末間の中継を可能とする。

また，通信協力の際，サーバを含む端末間は共通のチャネルを利用し，かつ相互にキャリアセンス（送信しようとする周波数で同時に複数のキャリア（搬送波）を出さないように制御する技術）できるとする。

■ 無線 LAN と LTE 回線のスループットのパラメータ

(サーバを含む) 端末間の無線 LAN による直接通信の速度 V_{ij} は, その間の実距離に応じて以下のシミュレーションパラメータ[4][9][10]を与える。

表 5.1 無線 LAN のスループットのパラメータ

通信距離 $X[m]$	スループット[Mbps]
$X \leq 2$	25
$2 \leq X \leq 25$	$0.046314(X-25)^2 + 0.5$
$25 \leq X$	0.5

また, LTE 回線のスループットは一律 1Mbps である[4]とする。

■ 協力端末の選択方式

前章までは協力端末の最適選択手法について考察してきたが, 今回のシミュレーションでは最適選択手法の他に, 比較対象として 2 つの選択手法を加えた, 以下の 3 つの選択方式でシミュレーションを行う (尚, すべての選択方式において伝送経路は最適化しているとする)。

- ① 全端末利用 : 領域内に存在する端末 N 台全てを選択する方法
- ② ランダム選択 : 無線 LAN 側がボトルネックになるまで, 無作為に選択した端末を協力端末群に 1 台ずつ追加する方法 (4.3 節【注意点】参照)
- ③ 最適選択 : 無線 LAN 側がボトルネックになるまで, 4.3 節の式(4.1)で定義された伝送レートの高い順に, 端末を協力端末群として 1 台ずつ追加する方法

■ シミュレーションで用いる手法

協力端末の選択方式だけでなく, 端末の中継機能や最も離れた協力端末へのデータ送信量の制限 (以下, データ制限と表現) の有効性についても検証したい。表 5.2 は “中継”, “データ制限”, そして “協力端末の選択方式” の 3 つの要素で分けられた,

クラウドへのデータ送信の総スループットの制御アルゴリズムに関する手法の一覧である。

表 5.2 シミュレーションで用いる手法一覧

手法名	選択方式	中継	データ制限
全端末利用（中継無）	全端末利用	×	×
全端末利用（中継有）	全端末利用	○	×
ランダム選択（中継無）	ランダム	×	×
ランダム選択（中継有）	ランダム	○	×
最適化（中継無）①	最適選択	×	×
最適化（中継無）②	最適選択	×	○
最適化（中継有）①	最適選択	○	×
最適化（中継有）②	最適選択	○	○

これらの手法を用いてシミュレーションを行い、結果を比較し、“協力端末の選択方式”，“中継”，“データ制限”それぞれの有効性について検証する。

■ シミュレーションのパターン

シミュレーションは以下の2つのパターンで行う。

パターンⅠ…端末台数変化（領域範囲固定）

領域内に配置する端末の台数 N を0~40の範囲で変化させる。端末を配置できる領域である正方形の一辺の長さは $s = 50$ で固定。

⇒端末の台数が増えると総スループットはどのように変化するかを検証。

また、このパターンで用いる手法は、表 5.2 における手法全てとする。

パターンⅡ…領域範囲変化（端末台数固定）

端末を配置できる領域である正方形の一辺の長さ s を10,20,30,...,200と変化させる。領域内に配置する端末の台数は $N = 10$ で固定。

⇒配置できる範囲が変化すると総スループットはどのように変化するかを検証。

また、このパターンで用いる手法は、表 5.2 における最適化（中継無）②と最適化（中継有）②とする。

5.2 シミュレーション結果 I（端末台数変化）

領域内に配置する端末の台数 N を0~40の範囲で変化させる。端末を配置できる領域である正方形の一辺の長さは $s = 50$ で固定する。以下，“協力端末の選択方式”，“中継”，“データ制限”の3つの観点から見たシミュレーション結果をそれぞれ順に記し，最後に，総スループットから見た制御アルゴリズム最適化の評価を行う。

また，本シミュレーションにおける，端末台数 $N(= 0 \sim 40)$ のときの総スループットは， N に対して，それぞれ 10^3 回ずつシミュレーションを行った平均値とし，それを平均総スループット $T_{total(average)}^N$ と定義する。

$$T_{total(average)}^N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{k=1}^{10^3} (T_{total}^N)_k}{10^3} \quad (5.1)$$

5.2.1 協力端末の選択方式

最適選択方式の有効性を数値化するために、『高伝送レート優先有効率』という指標を以下の式のように定義する。

$\text{最適選択有効率} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{最適選択方式で行ったときの平均総スループット}}{\text{全端末利用 or ランダム選択で行ったときの平均総スループット}}$
--

今回は“中継無し”と“中継有り”の場合で分けて，それぞれ総スループットと最適選択有効率の結果を示す。

■ “中継無し” の場合

“中継無し”でシミュレーションを行ったときの結果について記す。表 5.3 は“中継無し”の場合に用いる手法の一覧である。

表 5.3 中継無しの場合に用いる手法一覧

手法名	選択方式	中継	データ制限
全端末利用（中継無）	全端末利用	×	×
ランダム選択（中継無）	ランダム	×	×
最適化（中継無）①	最適選択	×	×

以下，図 5.1 は総スループットの変化，図 5.2 は最適選択有効率の結果を表す。

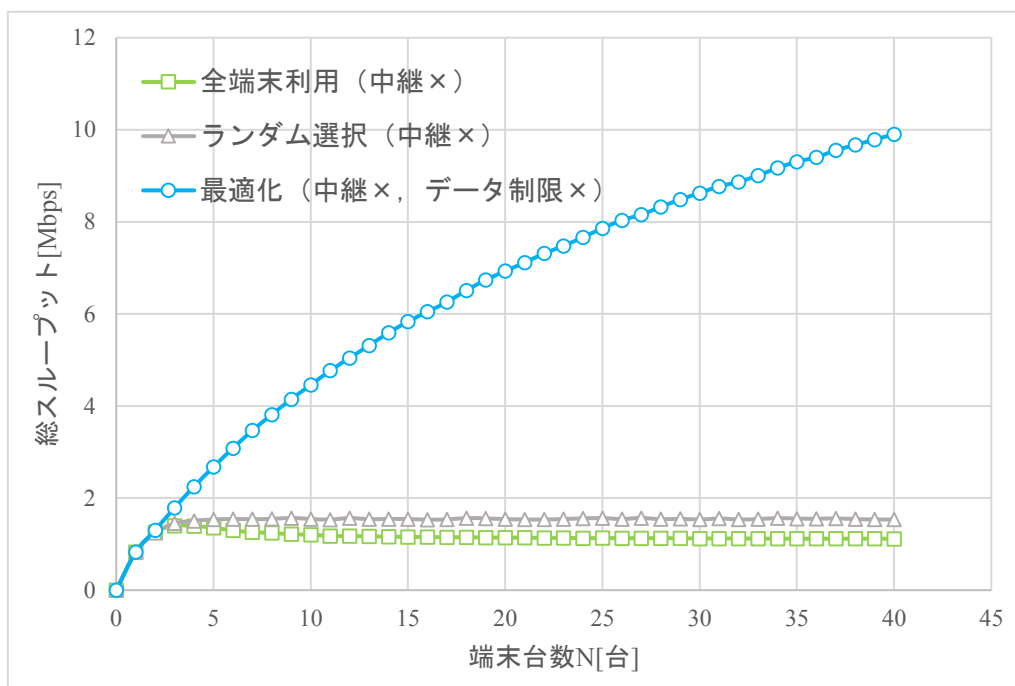


図 5.1 総スループットの変化 (中継無し)

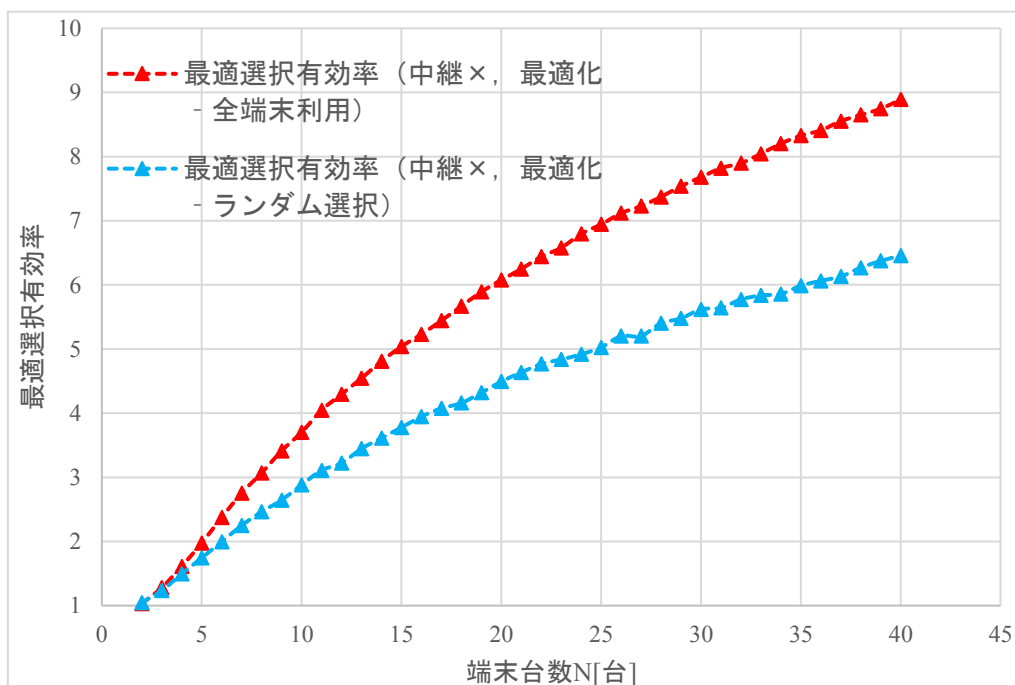


図 5.2 最適選択有効率 (中継無し)

図 5.1 より，最適化手法の総スループットは端末台数 N が増加するにつれて上昇する一方で，ランダム選択と全端末利用の総スループットは端末台数 N が増え始めてすぐに一定の値でほぼ安定してしまう。

また図 5.2 より，端末台数 N が増加するにつれて最適選択有効率は上昇することから，全体の端末台数 N が（少なくとも $0 \leq N \leq 40$ の範囲では）多いほど最適選択方式は大きな効果があると言える。

■ “中継有り” の場合

“中継有り” でシミュレーションを行ったときの結果について記す。表 5.4 は“中継有り” の場合に用いる手法の一覧である。

表 5.4 中継有りの場合に用いる手法一覧

手法名	選択方式	中継	データ制限
全端末利用（中継有）	全端末利用	○	×
ランダム選択（中継有）	ランダム	○	×
最適化（中継有）①	最適選択	○	×

以下，図 5.3 は総スループットの変化，図 5.4 は最適選択有効率の結果を表す。

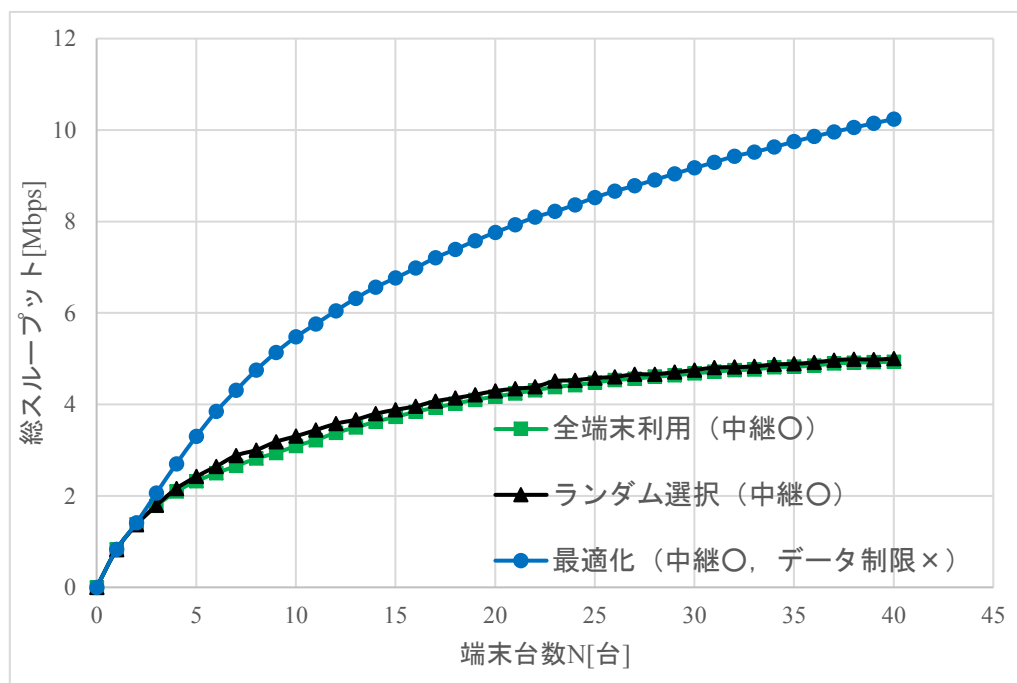


図 5.3 総スループットの変化（中継有り）

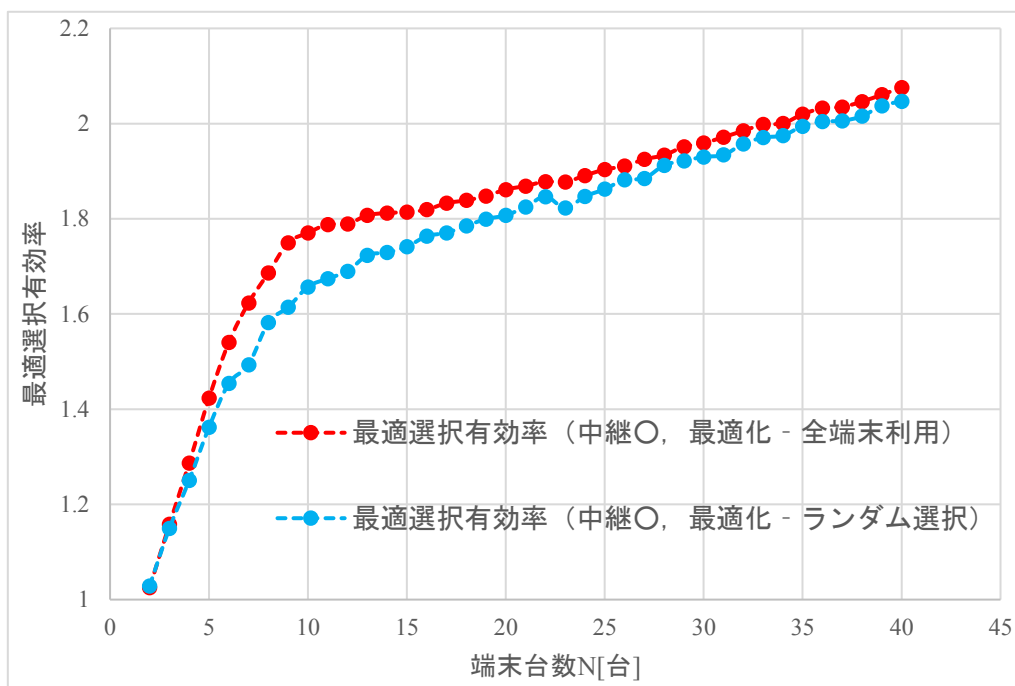


図 5.4 最適選択有効率（中継有り）

図 5.3 より，“中継無し”の場合同様，最適化手法の総スループットは端末台数 N が増加するにつれて上昇する。ランダム選択と全端末利用の総スループットは，“中継無し”の場合よりも端末台数 N が増えることで上昇し，端末台数 $N = 40$ の時点でも微量ではあるが上昇を続けている（5.2.2 節で詳しく考察する）。

また図 5.4 より，“中継無し”の場合よりは，端末台数 N が増加するにつれての最適選択有効率の上昇度合は劣るものの，全体の端末台数 N が（少なくとも $0 \leq N \leq 40$ の範囲では）多いほど最適選択方式は効果があると言える。

5.2.2 中継の有効性

中継機能の有効性を数値化するために、『中継有効率』という指標を以下の式のように定義する。

$$\text{中継有効率} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{中継有りで行ったときの平均総スループット}}{\text{中継無しで行ったときの平均総スループット}}$$

今回は“全端末利用とランダム選択”と“最適化手法”の場合で分けて、それぞれ総スループットと中継有効率の結果を示す。

■ “全端末利用とランダム選択” の場合

“全端末利用とランダム選択” でシミュレーションを行ったときの結果について記す。表 5.5 は“全端末利用とランダム選択” の手法一覧である。

表 5.5 全端末利用とランダム選択の手法一覧

手法名	選択方式	中継	データ制限
全端末利用（中継無）	全端末利用	×	×
全端末利用（中継有）	全端末利用	○	×
ランダム選択（中継無）	ランダム	×	×
ランダム選択（中継有）	ランダム	○	×

以下、図 5.5 は総スループットの変化、図 5.6 は中継有効率の結果を表す。

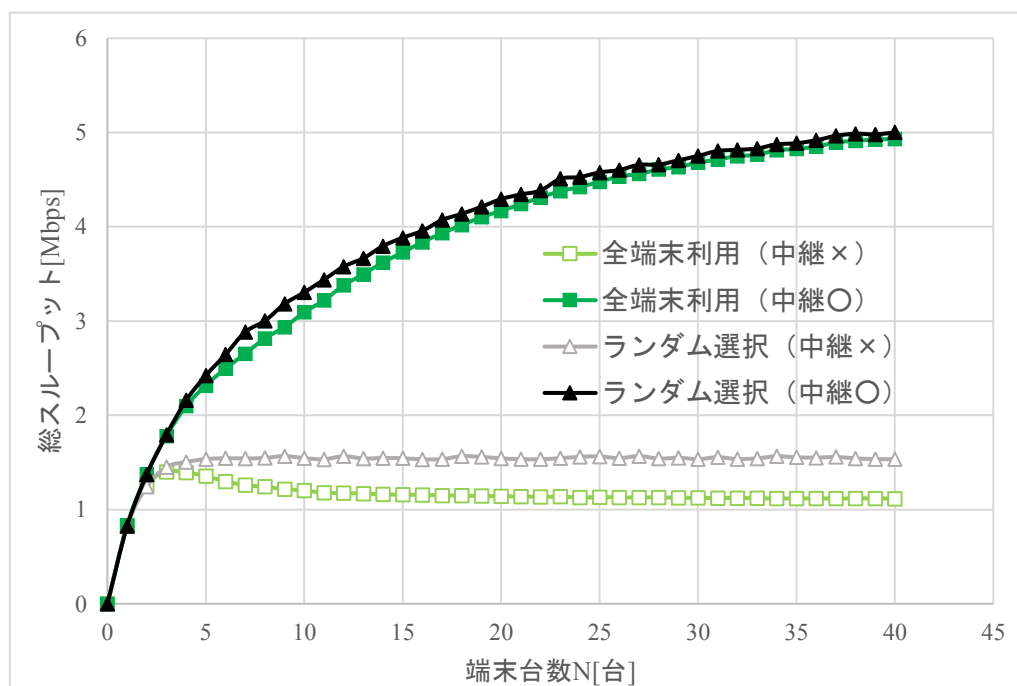


図 5.5 総スループットの変化（全端末利用とランダム選択）

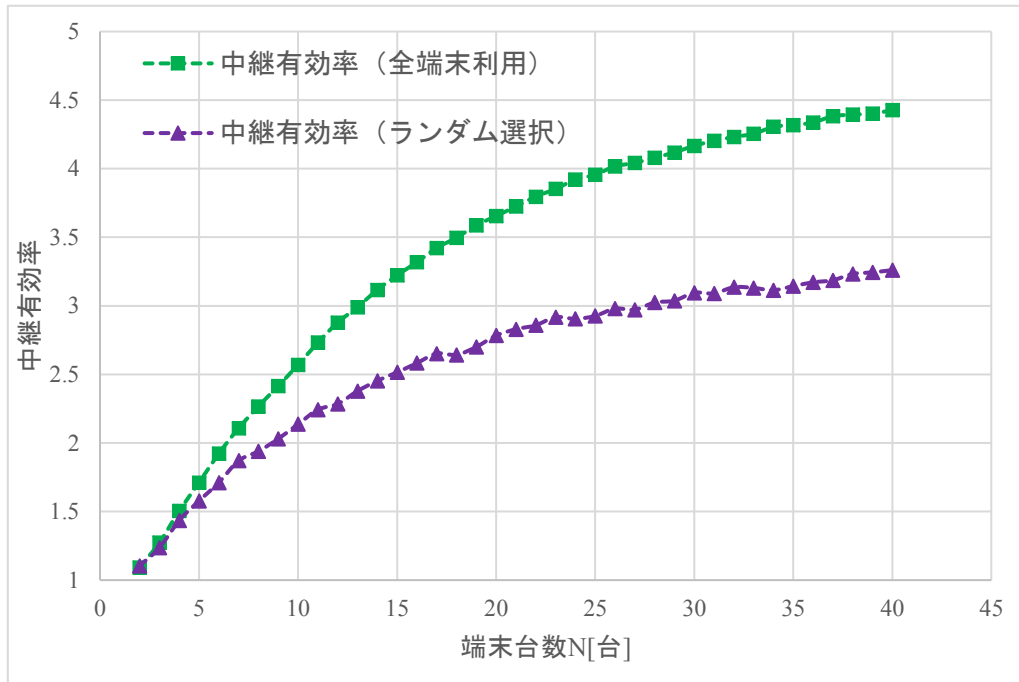


図 5.6 中継有効率（全端末利用とランダム選択）

図 5.5 より，全端末利用とランダム選択の総スループットは共に中継無しの場合を中継有りの場合が大きく上回る。中継無しの場合は，端末台数 N が増え始めてすぐに一定の値でほぼ安定してしまう（厳密に述べると，ランダム選択は安定しているが，全端末利用は僅かだが微減している）のに対し，中継有りの場合は，端末台数 $N = 40$ の時点でも微量ではあるが上昇を続けている。

また，全端末利用とランダム選択の総スループットの差は，中継有りの場合の方が小さい（中継無しの場合はランダム選択の方が全端末利用よりも約 $1.0 \rightarrow 1.4$ 倍のスループットを，中継有りの場合は約 $1.00 \rightarrow 1.08$ 倍のスループットを得られる）。これは全端末利用がサーバから離れた（サーバからの直接通信の可能性が低い，つまり中継して通信する可能性の高い）端末であろうと配置されていれば必ず選ばざるえないため，中継機能の恩恵を受けやすいからだと推測できる。

図 5.6 より，全端末利用，ランダム選択共に端末台数 N が増加するにつれて上昇していることから，全体の端末台数 N が（少なくとも $0 \leq N \leq 40$ の範囲では）多いほど中継機能は大きな効果があると言える。

■ “最適化手法” の場合

“最適化手法” でシミュレーションを行ったときの結果について記す。表 5.6 は“最適化手法” の手法一覧である。

表 5.6 最適化手法の手法一覧

手法名	選択方式	中継	データ制限
最適化（中継無）①	最適選択	×	×
最適化（中継無）②	最適選択	×	○
最適化（中継有）①	最適選択	○	×
最適化（中継有）②	最適選択	○	○

以下，図 5.7 は総スループットの変化，図 5.8 は中継有効率の結果を表す。

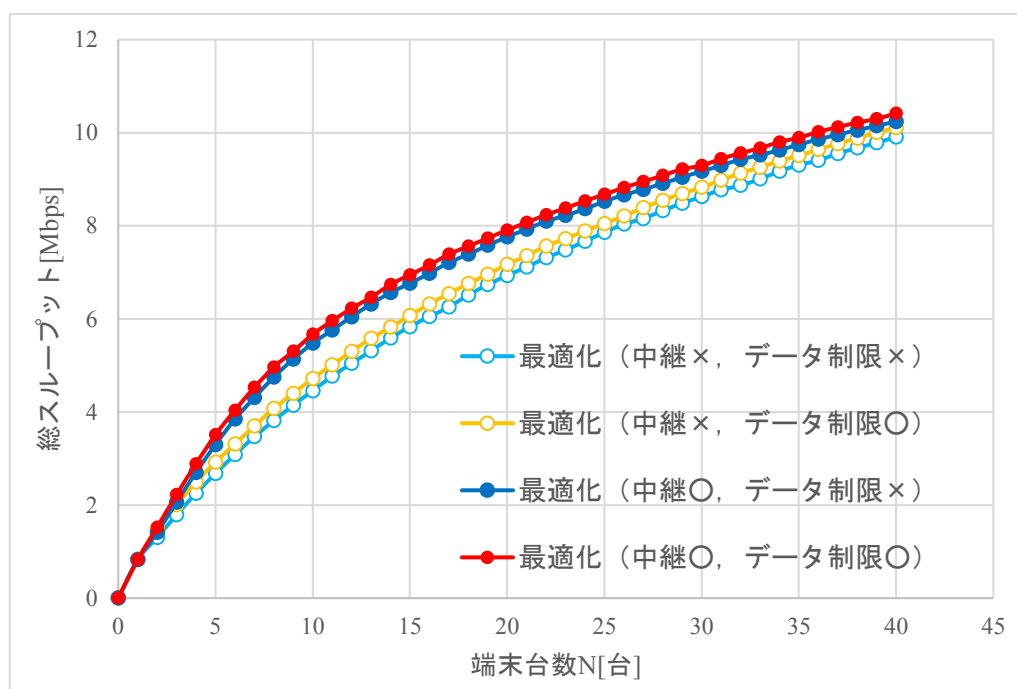


図 5.7 総スループットの変化（最適化手法の場合）

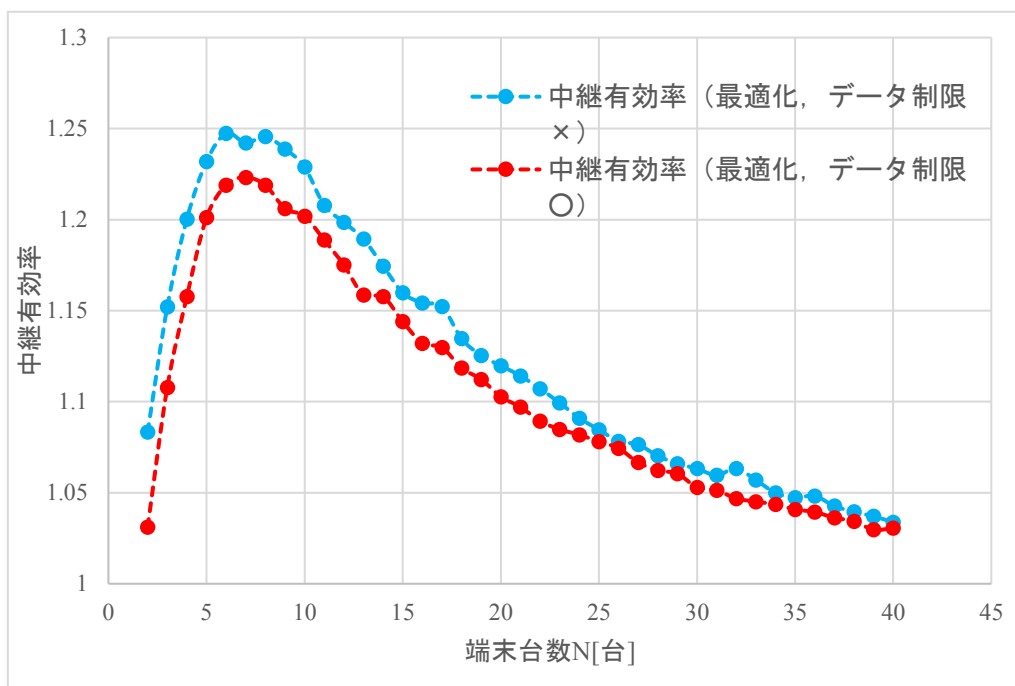


図 5.8 中継有効率（最適化手法の場合）

図 5.7 より，最適化手法の総スループットは全端末利用とランダム選択に比べて大きく上昇している。また図 5.8 より，中継有効率は前者 2 方法よりも落ちるものの，端末台数 N が5~10台（データ制限なしなら4~11台）のときは中継有効率が 1.2 を超える（つまり 20%のスループット向上）ことから，最適化手法の場合でも中継機能は効果があり，端末台数 N によってはより大きな効果が期待できると言える。

5.2.3 データ制限の有効性

データ制限の有効性を数値化するために、『データ制限有効率』という指標を以下の式のように定義する。

$$\text{データ制限有効率} \triangleq \frac{\text{データ制限有りで行ったときの平均総スループット}}{\text{データ制限無しで行ったときの平均総スループット}}$$

今回は，最適化手法（中継無し・中継有り）のみでデータ有効率の変化についての結果を示す。

以下、図 5.9 はデータ制限有効率の結果について表す。

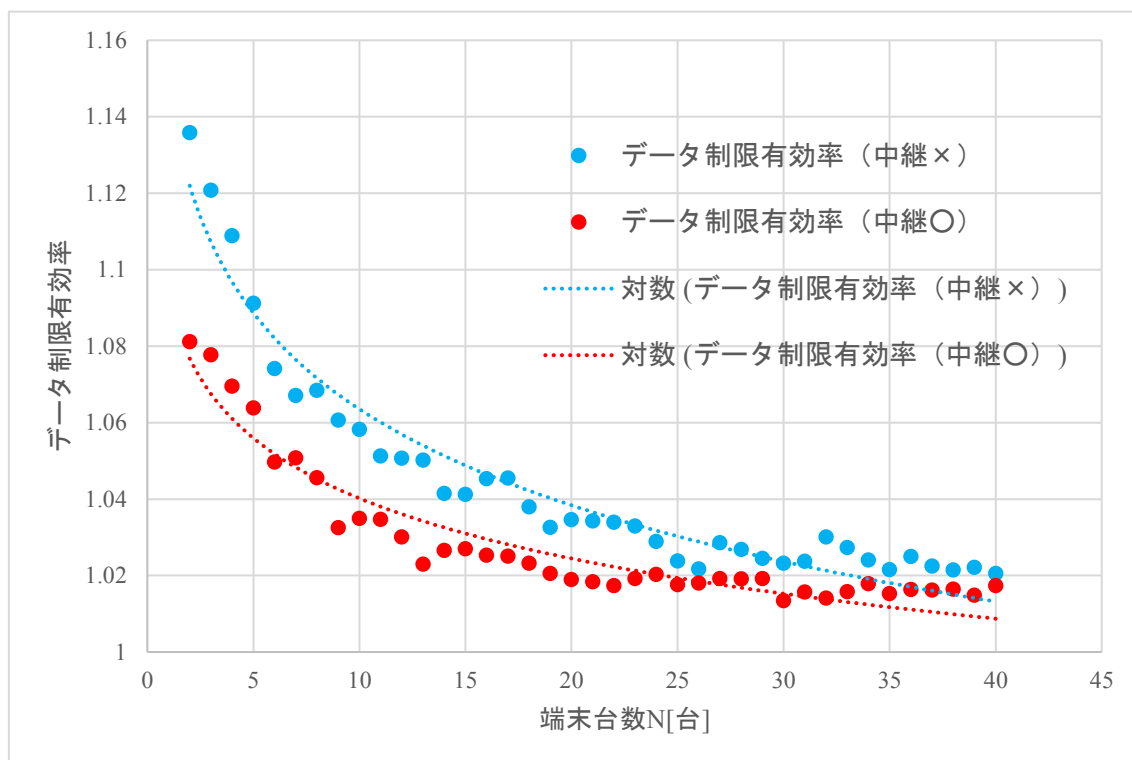


図 5.9 データ制限有効率

改めて説明すると、データ制限とは「端末の中継機能や最も離れた協力端末（つまり協力端末群の1台のみについての手法）へのデータ送信量の制限」することであり、総スループットの大きな向上を目指した手法ではない。しかし、図 5.9 より、端末台数 N の増加に対して対数近似的に減少していきながらも総スループットの向上に貢献していることが確認できた。

5.2.4 総スループットの変化から見る制御アルゴリズム最適化の評価

最後に、全端末利用（中継無し・中継有り）、ランダム選択（中継無し・中継有り）、最適化手法（中継無し・中継有り、共にデータ制限有り）の総スループットの変化を図 5.10 にて表す。

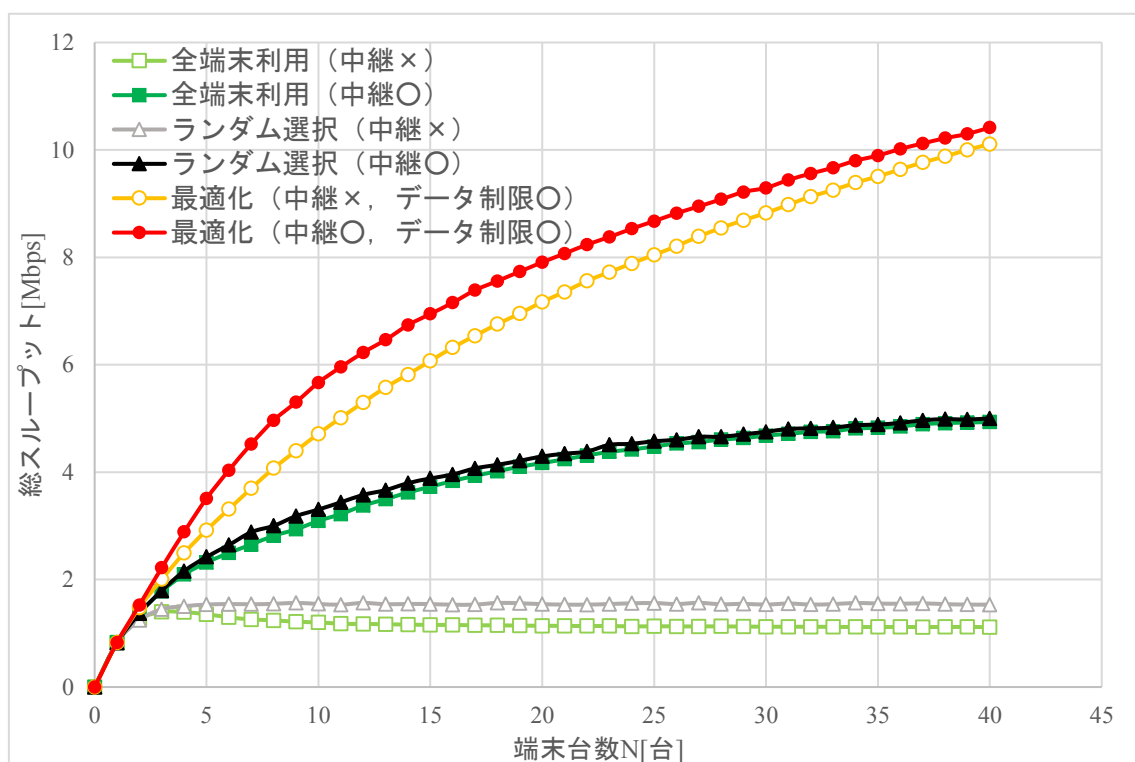


図 5.10 総スループットの変化

この結果から，“協力端末の選択方式”，“中継機能”，“データ制限”の3要素の中で一番総スループットに影響を与えるのは“協力端末の選択方式”であることが顕著に表れている。最適化手法の総スループットは，全端末利用とランダム選択よりも高い値を示し（5.2.1 節の『最適選択有効率』参照），且つ端末台数 N が40台を超えても他の手法と比べて向上する（ここには載せていないが50台前後まで）。

また，“中継機能”も総スループットに影響していることが分かった。最適化手法の場合はランダム手法や全端末利用の場合とは違い，サーバから近い端末（サーバとの直接通信する可能性が高い）を選択するため，前者2手法に比べると影響が小さいように見えるが，5.2.3 節の中継有効率の結果より，この環境下では端末台数 N が4~11台の時に約20%の総スループットの向上が見られたことから，“中継機能”の重要性は大きいと言える。

最適化手法（中継有り，データ制限有り）の総スループットは，全端末利用（中継無し）の総スループットの1.00→9.35倍となり，本研究で構築されたクラウドへのデータ送信の総スループット最大化のための制御アルゴリズムは，この実験環境下において大きな効果を発揮することを示した。

5.3 シミュレーション結果Ⅱ（領域範囲変化）

端末を配置できる領域である正方形の一辺の長さ s を10,20,30,...,200と変化させる。領域内に配置する端末の台数は $N = 10$ で固定する。端末の配置領域の変化は、総スループットにどのように影響を与えるかを最適化手法（中継無し・中継有り、共にデータ制限有り）を用いて検証する。

また、本シミュレーションにおける、領域である正方形の一辺の長さ s (=10,20,30,...,200)のときの総スループットは、 s に対して、それぞれ 10^3 回ずつシミュレーションを行った平均値とし、それを平均総スループット $T_{total(average)}^s$ と定義する。

$$T_{total(average)}^s \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{k=1}^{10^3} (T_{total}^s)_k}{10^3} \quad (5.2)$$

以下、図 5.7 は総スループットの変化、図 5.8 は中継有効率の結果を表す。

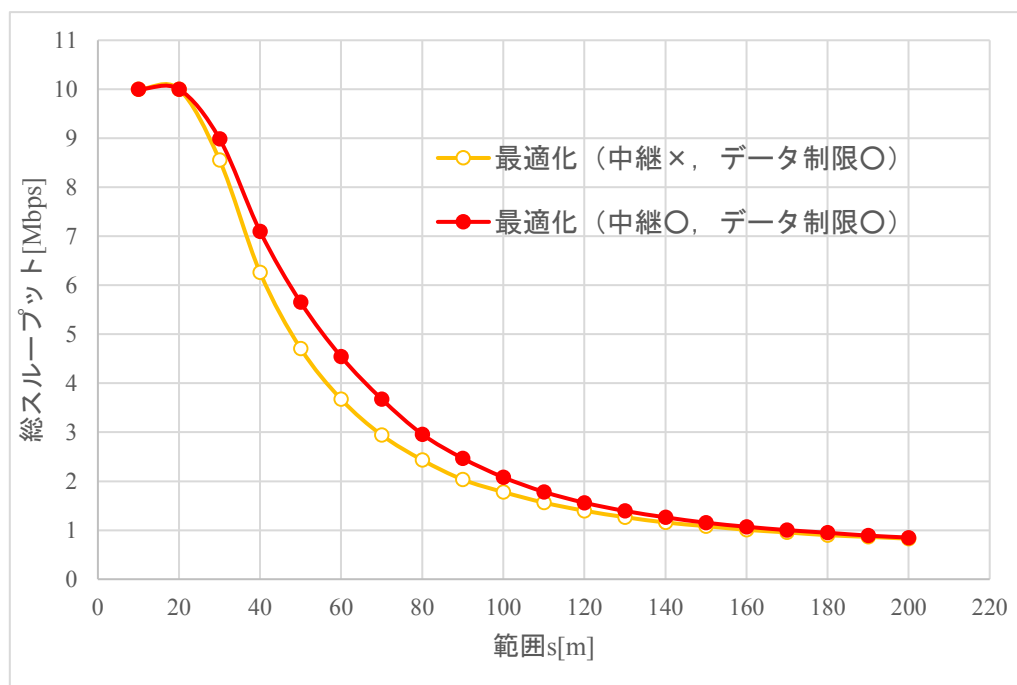


図 5.11 総スループットの変化（最適化）

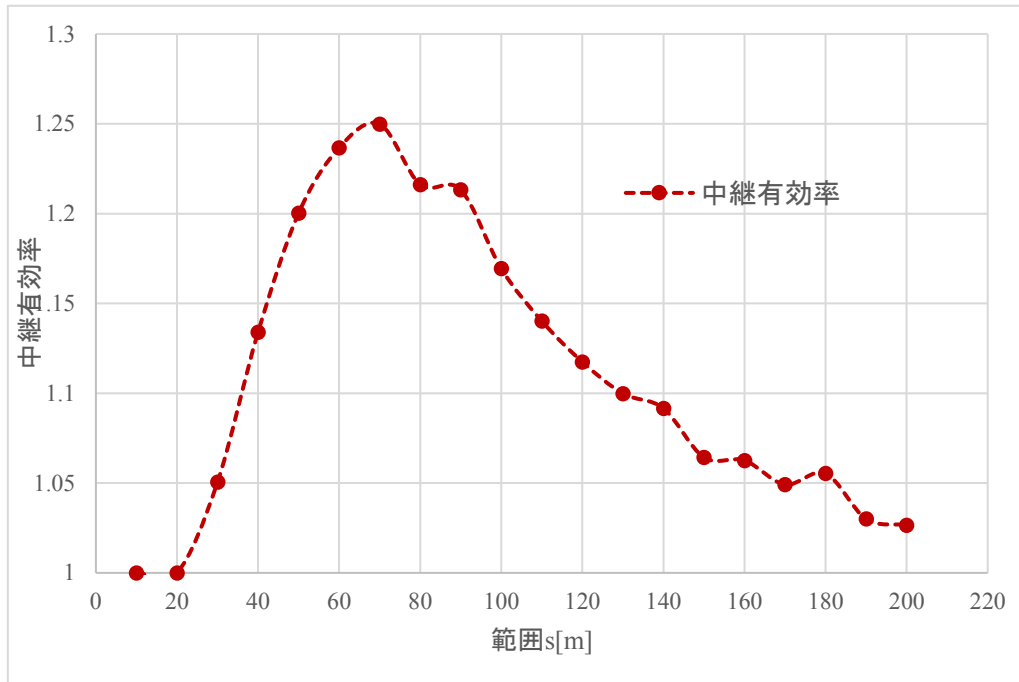


図 5.12 中継有効率（最適化）

図 5.11 を見ると、 $s = 10, 20$ のときは、領域内にある全端末 N 台の LTE 回線の帯域をほぼ全て利用できるという結果 ($T_{total(average)}^{s=10,20} \approx 10$) となった。これは端末の配置領域が非常に狭いと、ほとんどの端末とサーバとの通信距離が短くなり、仮に領域範囲の限界地点に数台配置されたとしても、サーバ近くに配置された端末が限界地点の端末の中継役となり補えることが要因だと考えられる（中継有効率とは「中継機能をどれだけ利用したかの指標」ではないので注意）。総スループットの値は、どれだけサーバから近い範囲に端末が配置されるか次第であり、サーバから近い位置に配置される確率は端末の配置領域範囲の広さに反比例する。また、 $s = 30$ 以降というタイミングで総スループットが落ち始めるのは、5.1 節の無線 LAN のスループットのパラメータ（表 5.1）における通信距離の割り振りの設定（通信距離 ≤ 2 , $2 \leq$ 通信距離 ≤ 25 , $25 \leq$ 通信距離）の影響だと考えられる。図 5.12 を見ると、中継有効率は $s = 70$ （このタイミングであるのは無線 LAN のスループットのパラメータにおける通信距離の割り振りの設定が影響していると推測）まで上昇してから、徐々に下がっていく。この変化の仕方は、端末の配置領域がある程度は広くないと、中継無しと中継有りの場合で差がつかないが、配置領域が広すぎると、サーバから近い位置に中継役となる端末が置けないのであまり効果がないことを表す。

第6章 結論と今後の課題

本研究より，クラウドへのデータ送信の総スループット（通信速度）を最大化するための，無線 LAN によるサーバ→端末間の伝送経路とデータを送信する端末の選択を最適化する制御アルゴリズムの妥当性を示した。また，伝送経路最適化において，端末間の中継を許すことが総スループットの向上に影響すると明らかにし，その重要性を示した。

今回の問題設定では，サーバはクラウドへのデータ送信を行う LTE 回線を有していないが，これは問題設定を単純化するための処置であり，サーバ自身に LTE 回線を有する設定への拡張は可能である。

今後の課題として挙げられるのは，次世代の無線 LAN 規格と携帯電話回線に合わせた近似モデルの構築である。本研究では，IEEE802.11g と呼ばれる無線 LAN 規格の通信モデルで調和平均の式を用い，シミュレーションを行った。また，複数のアンテナを用いる通信技術（MIMO（Multi-Input Multi-Output））を利用した無線 LAN 規格 IEEE802.11n は，IEEE802.11g 同様に調和平均の式を利用でき，近似モデルの構築は可能であると考えられる。しかし，複数のアンテナを用いて複数のユーザーと通信できる技術（MU-MIMO（Multi-User-MIMO））を利用した IEEE802.11ac といった次世代無線 LAN 規格に対応した通信モデルはまだ一般化されていない[5]。また携帯電話回線においても，本研究では LTE 回線をスループット 1[Mbps]で用いたが，次世代規格の携帯電話回線はこれを上回る。

次世代の無線 LAN 規格や携帯電話回線に対応できるモデルを構築し，シミュレーションを行うことで，より現実的な問題に落とし込めると考えられる。

参考文献

- [1] 大槻駿介, 巳波弘佳, “車車間通信によるトラフィックオフロードにおけるリアルタイム V2X コンテンツ配送法,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2016-164, pp.41-46, 2017
- [2] 榊原巧也, 村瀬勉, “協働ロボットシステムにおける中継ロボットの提案とその特性評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 2016-BS-3-3, 2016
- [3] 榊原巧也, 塩田茂雄, 村瀬勉, “協働ロボットシステムにおける近距離優先通信制御方式の提案とその特性評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2016-141, pp.263-268, 2017
- [4] 榊原巧也, 塩田茂雄, 村瀬勉, “協働ロボットシステムにおける中継機能の近似解評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2017-20, pp.7-12, 2017
- [5] Takahiro Doi, Ryuichi Hodoshima, Yasushi Fukuda, Shigeo Hirose, Toshihito Okamoto, Junichi Mori, “Development of Quadruped Walking Robot TITANXI for Steep Slopes – Slopes Map Generation and Map Information Application -, ” Journal of Robotics and Mechatronics, 18, 3, 318-324, 2006
- [6] 稲田喜信, 時田拓朗, 二上将直, 堀江数馬, 飯田真澄, 遠藤智博, 高信英明, “地上移動型群ロボットを用いた群制御アルゴリズムの検証,” 宇宙航空研究開発機構 研究開発報告 JANA-RR-09-005, 1-21, 2010(-03)
- [7] 守倉正博, 久保田周治, “改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書,” インプレス R &D, 2008 年初版
- [8] 山口剛史, 尾家祐二, “無線 LAN 環境における Performance Anomaly 問題を考慮したハンドオーバー制御機構,” 九州工業大学大学院情報工学研究科情報システム専攻修士論文, 2008
- [9] 小松原英将, 村瀬勉, 笹島和幸, “無線 LAN 搭載ロボット群のリンクアグリゲーション通信性能を向上させる移動協力とその性能評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2016-NBS-1-6, 2016
- [10] 小松原英将, 村瀬勉, 笹島和幸, “無線 LAN 搭載ロボットの移動協力によるリンクアグリゲーション通信の特性向上,” 電子情報通信学会 技術研究報告, CQ2014-39, 1-6, 2014

- [11] Saeko Iwaki, Tutomu Murase, Masato Oguchi, “Throughput Analysis and Measurement on Real Terminal in Multi-rate Wireless LAN, ” ACM ICUIMC (IMCOM) 2012, 2012

謝辞

本研究を進めるにあたり，たくさんのご指導をいただきました塩田先生には深く感謝申し上げます。今後ともよろしくお願いします。また，名古屋大学の村瀬先生と榊原さんには，協働ロボットシステムの研究を本研究の参考にさせていただいたり，研究の助言を頂いたりと大変お世話になりました。最後に，研究室の方々には様々な面でサポートしていただきました。ありがとうございました。