

性質の異なる複数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制御と評価

野田 勇人[†] 村瀬 勉[‡] 笹島 和幸[‡]

東京工業大学 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†] noda.y.ac@m.titech.ac.jp, [‡] {murase, sasajima}@mei.titech.ac.jp

あらまし 移動可能なロボットや移動センサなどのデバイスを用いたセンシングが盛んになっており、所望の地域を調査する場合、複数のノードが分散してなおかつ協調し合うことにより、効率的に、また新たな価値を生み出すような調査が可能になってきている。さらに、LTE や無線 LAN などの無線通信技術の発展により、ロボットが収集している情報を蓄積するのみならず、通信回線で遅滞なく所望の相手に送ることが可能となっている。このとき、ロボット自身の所有する通信回線容量よりも多くの情報を送りたいという状況においては、他のロボットとの協働が必要になる。本研究では、個々のロボットの調査活動と、協働による調査活動のバランスを最適にとるような最適化問題を提案し、その問題の特性を評価する。

他のロボットに情報転送を依頼する場合、ロボット間通信に用いている無線 LAN の特性から、ロボットが移動して近接し、高速な通信を行う必要があるが、ロボットは移動すると、自己の調査活動が疎かになる。これらを協働のゲインと移動コスト、と捉えて最適問題を解き、問題の特性を明らかにする。

キーワード モバイルネットワーク, 無線通信, 性能評価

Optimal Control and QoS Characteristics of Cooperative Moving Heterogeneous Multi-Robots with Wireless Link Aggregation

Yuto NODA[†], Tutomu MURASE[‡], Kazuyuki SASAJIMA[‡]

Tokyo Institute of Technology Ookayama 2-12-1, Meguro-Ku, Tokyo 152-8550 Japan

E-mail: [†] noda.y.ac@m.titech.ac.jp, [‡] {murase, sasajima}@mei.titech.ac.jp

1. はじめに

分散して存在するノード間で協調し合うことにより、新たな価値を生み出すようなシステムが様々な分野で研究されている。

たとえば、移動可能なロボットやセンサなどのデバイスを用いたセンシングが盛んになっている。特に、被災地、毒ガス発生地域、地雷埋設地域など、人間が入ることができないような地域で利用されることが増えており、今後ますます需要が高まると予想される。

さらに、無線通信技術の発展により、ロボットが収集している情報を蓄積するのではなく、通信回線で、所望の相手に送ることが可能となっている。3G/LTE 通信は、日本では、ほとんどすべての地域で可能であり、LTE のように最大 100Mbps というブロードバンド通信も可能となりつつある。ただし、マクロセル技術を用いる 3G/LTE は、多数で 1 つの周波数帯を共有するた

め、一人あたりの実質のスループットは、数 Mbps という低速であることが多く、高精細な動画像などを容易に送るまでには達していない。このような回線を、たとえ複数本搭載したとしても、自身の所有する通信回線容量よりも多くの情報を送りたいという状況が想定できる。例えば、ロボットのカメラを通じて遠隔地から動画像を見ている場合に、気になった物体をより高精細に見たい場合である。この場合、高精細動画像を送るには、通信回線容量以上の帯域が必要であるかもしれない。例えば、ハイビジョン画像は、数十 Mbps である。しかしながら、稼働中のロボットに具備されている通信容量を増やすことや一度設計制作してしまったロボットの通信性能を向上させる改造は非常に困難である。

そこで、稼働中のロボットが自分の通信容量以上の帯域の通信を行いたい場合には、リンクアグリゲーション

ョン技術を用いて、それを実現する。リンクアグリゲーションとは、複数の回線を仮想的に1本の太い回線とみなして高速通信を実現する技術である[1]

このような技術背景のもと、本研究では、ある地域にて、複数のロボットが手分けして調査活動を行うというシステムを想定する。自身の3G/LTE回線以上の多大な情報(動画像、データ)を送信したいロボットは、近隣のロボットに通信協力を依頼し、それらのロボットの3G/LTE回線をも使用して、すなわち、リンクアグリゲーションを用いて、通信を達成する。このとき、近隣のロボットに情報を送信するために、近距離無線通信が必要になる。本研究では、安価で容易に入手できる無線LAN(IEEE802.11 無線LAN)を用いることとする。無線LANは、距離に応じて最大のスループットが決まるため、ロボットは、お互いに移動して、ある程度近づく必要がある。このような移動協力により、所望の通信帯域を得ることができる[2][3]。ただし、移動するためのコストを考慮する必要があり、本研究では、ロボットは、割り当てられた所定の場所から離れるほど、コストがかかる、とする。逆に、移動協力して所望の通信を達成した場合には、ゲインが得られるとする。

本研究では、このときの、コストとゲインの和を最大にすることで、システム全体を最適化する問題を検討する。これまで、距離を移動コストとして考えて、ゲインとコストのトレードオフを論じた研究はあったが、無線LANを用いる場合には、複数のノードの通信が干渉し合うことから、距離だけを用いた単純な場合とは、問題の質が異なってくる。例えば、遠方のノードは協力をするために近寄ることで、返って全体の性能を低下させてしまうといった特性(Performance anomalyと呼ばれる品質劣化)があるため、必要なノードを必要なだけ移動させることが重要になってくる。本研究では、最適な移動方法についての特性を明らかにする。

以下、まず、2章では、移動モデル、通信モデルについて述べる。移動にはコストが、協力には特別な報酬がもたらされると考え、これらを3章でモデル化する。4章では、目的関数、制約条件などを整理して、最適化問題を定式化する。次に、5章では、所望のデータ量を送信完了する時間を制約条件とした場合について議論する。ここではすべてのロボットの性能・仕様が同一の場合と異なる場合のそれぞれについて検討する。6章では、5章で述べたモデルを定量評価する。最後に、結論を7章にて述べる。

2. 通信・移動モデル

本研究では、移動可能なノードが適当に分散して調査を行い、その調査場所から遠方にある集中管理部署のような場所(以下、センター基地と呼ぶ)へデータを転送しているような状況を考える。その状況で各ノードがどのように移動したり、通信したりするのが最適なのかを考えるためには、その状況をモデル化する必要がある。よって、まず通信機能・移動機能について、モデル化のために必要な仮定を行い、その役割や必要性を述べる。

2.1. 通信モデルと各機能の役割

それぞれのノードはセンター基地との通信のための無線回線Aと、ノード間通信のための無線回線Bの2種類を持つと仮定する。ここで一つのノードが持つ回線A, Bの本数は、1本ずつとは限らない。回線Aを複数持つ場合は、自身の持つ回線Aを束ねて仮想的に太い1本の回線とみなしてセンター基地との通信を行うことができ、回線Bを複数持つ場合は、一つのノードが複数のチャネルを用いることができ、その異なるチャネル間ではCSMA/CAを考慮しなくて良い。

回線Aは、例えば3G/LTE回線のような、非常に多くの端末が一つの基地局(AP)を用いて通信を行うような遠距離狭帯域通信規格を用いることを想定している。この場合、高々数個のノードが新たに3G/LTE通信を開始する程度、もしくは数十メートル移動した程度では、ほぼスループットは低下しない。したがって、回線Aのスループットは一定であると仮定する。一方、回線Bは、802.11g無線LANのような、回線Aと比較して近距離で広帯域な通信を行えるような回線を想定している。このような回線は、どこかの無線回線で通信を行っていると、その電波が届く範囲で同じチャネルで同時に無線通信が出来ず、CSMA/CAに沿って通信を行うような回線である。また、端末間距離の増大や障害物による電波の遮蔽などにより、伝送レートが大幅に下がってしまうような回線でもある。例えば802.11g無線LANでは、54, 48, 36, 24, 18, 12, 11, 9, 6, 5.5, 2, 1 Mbpsと大幅に小さくなってゆく。

また、いくつかのノードが比較的高いスループットで無線LAN通信が出来ているときに、あるノードが低レートで無線LAN通信を行った場合、他の無線LAN通信のスループットも大幅に低下してしまうという現象がある。この現象はPerformance Anomaly問題と呼ばれ、無線LAN特有の問題とされている[4]。

したがって、回線Bは、CSMA/CAに基づいて通信を行い、かつノード間距離や障害物の位置・電波透過

度に応じて伝送レートが大きく異なるような回線であると仮定する。

回線 A, B は、必ずしも 3G/LTE 回線, WLAN 回線である必要はないが、本研究の数値解析(第 6 章)では全てこれらの回線を想定している。したがって、便宜上、回線 A を 3G/LTE 回線、回線 B を WLAN 回線と記述することにする。

あるノードが自身のもつ 3G/LTE 回線(複数本の場合はそれを束ねた回線)以上の速度で通信を行う必要がある場合、WLAN 回線を次のような方法で通信を行うために用いる。

1. センター基地に転送したいデータの一部を、WLAN 回線を通して周辺のノードに転送する。
2. 転送されたノードの 3G/LTE 回線の帯域を分けてもらい、データをセンター基地へ転送する(このように 3G/LTE 回線の一部の帯域は、各ノードが自身の通信のために使用するが、それ以外の残りの帯域は、他のロボットの通信のために使用することができる)。
3. センター基地側で、複数の回線から届いたデータを再構成する(再構成のための技術が参考文献 [1] などによりすでに完成されているため、その方法については、本研究では議論しない)。

このように、動画像をリアルタイムに転送したい等の理由で大容量通信をしたいノードが WLAN 回線を経由して周辺のノードのもつ 3G/LTE 回線を使用することで、自身の 3G/LTE 回線のみを用いる場合より大容量の通信が可能となる。以上の手順では、リンクアグリゲーションと呼ばれる、複数の回線を束ねて仮想的に 1 本の太い回線とみなして通信する手法を用いている。

またこのとき、各ノードが WLAN チャンネルを共有するか否かで WLAN 通信の性質は大きく異なる。WLAN チャンネルを共有するということは、つまりノード群の中では同じチャンネルで WLAN 通信を行うということである。異なるチャンネルを用いる場合は、複数の WLAN 通信を同時に行うことができるため、WLAN 通信間の影響を無視できる。一方、同じチャンネルを用いる場合は、一度に 1 ヶ所のリンクでしか通信できないため、CSMA/CA に沿って交互に通信を行う。したがって、同じチャンネルの場合には、先に述べた Performance anomaly など、無線 LAN 通信の CSMA/CA 特有の性質が現れる。本稿では、より現実的である同じチャンネルを用いる場合について、以下検討する。

2.2. 移動モデルと移動協力の必要性

各ノードは、自由に移動可能であると仮定する。平常時は、各ノードがそれぞれ独立に調査活動をしているため、調査のため以外の移動はしない。しかし本研究では、他のノードの大容量通信のために必要に応じて移動すると仮定する。これを“移動協力”と呼ぶことにする。

移動協力の必要性の理由は、リンクアグリゲーションに参加するノード(以下、協働ノードと呼ぶ。また協働可能だが協働しないノードは協働可能ノードと呼ぶ)とリンクアグリゲーションにより大容量通信をしたいノード(以下、通信ノードと呼ぶ)の間のノード間距離が大きいという原因でノード間 WLAN 通信がボトルネックとなってしまう場合に、大容量通信が必要なノードに近づく必要があるからである。このボトルネックというのは、リンクアグリゲーションに参加するあるノードの 3G/LTE 回線のスループットよりも、それを利用するために経由する WLAN 回線のスループットが小さくなってしまふことを指す。

2.1 節で述べたように、WLAN 通信はノード間距離に応じて伝送レートが大きく変化するため、移動協力によって WLAN 通信のスループットが大きく向上しボトルネックを大幅に軽減できる。そしてこのボトルネック軽減により、リンクアグリゲーション通信のスループットを向上させることができる。

2.1 節、2.2 節で記述した通信モデル・移動モデルの実用提案例を図 1 に示す。本モデルの実用提案として、複数の調査ロボットからセンター基地へ動画像などの出板を送る、という案を提案しているため、分散ノードというのは図中左側の車輪型調査ロボットであり、右側の建造物がセンター基地である。3 台のロボットのうち、中央下のロボットが通信ノード、その両隣のロボットが協働ノードである。2.1 節で仮定した通り、各ノードは 3G/LTE 回線と WLAN 回線を持つ。そして通信ノードが 2 台の協働ノードと協働作業(リンクアグリゲーションをしつつ移動協力すること)を行っている様子を示している。

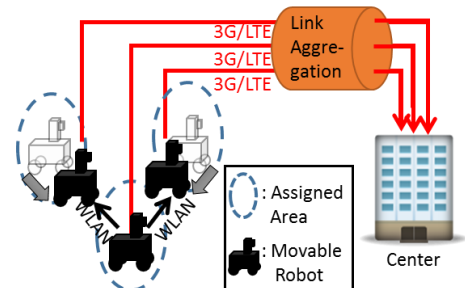


図 1 通信・移動モデル概略図

3. 報酬モデル

図1のように協働作業を行うと、協働ノードは必要に応じて割り当てられた調査地域から遠ざかってしまい、自身の得られるデータの質が低下してしまう。一方、協働作業により所望の通信が実現するということが自体には価値があると考えられる。これらを総合して定量的に評価するために、報酬という概念を導入する。そこで本章では、各ノードそれぞれの調査活動で得られた転送データと、協働作業により得られた転送データに対してそれぞれ報酬（前者を通常報酬、後者を特別報酬と呼ぶ）を与えると考え、それをモデル化する。

3.1. 通常報酬

通常報酬は、各ノードが調査すべき場所として割り当てられた場所から離れれば離れるほど、調査により得られたデータの質が低下し、これにより報酬が低下すると仮定する。つまり、各ノードにおいて、移動距離に対して報酬は単調減少するということである。さらに、その距離に関する報酬関数は、想定する状況に応じて異なる。

例えば、各ノードの調査活動が、カメラを使って動画画像を撮影し、リアルタイムにセンター基地へ配信する、というものであれば、割り当てられた場所から少し離れても動画画像の情報の質はあまり変わらないが大きく離れると大幅に情報の質が低下すると考えられるので、各ノードの移動距離と通常報酬の関係を表したグラフの形は、上に凸な単調減少関数でモデル化するのが適当であろう。しかし、ある場所の大気中に含まれるある物質の濃度を測定するといった場合などは、割り当てられた場所から少しでも離れると、情報の価値が大幅に低下するので、各ノードの移動距離と通常報酬の関係を表したグラフの形は、この場合には下に凸な単調減少関数でモデル化するのが適当であろう。

3.2. 特別報酬

特別報酬は、協働作業により所望の通信を実現したことに対して与えられる報酬であり、所望の通信量を転送し終えた直後に発生する。

所望通信達成の価値の大きさを報酬として表すためには、その価値を決める指標は何かを決定する必要がある。ここではその指標は、所望通信達成までの時間（以下、通信達成時間 t_0 と呼ぶ）、所望通信達成の緊急度、転送データ自体の重要度の3つであると仮定する。そして特別報酬は、所望通信達成の緊急度と転送データ自体の重要度に基づき、通信達成時間 t_0 を変数とした関数であると仮定する。ここで通信達成時間 t_0 が小さい、つまりセンター基地側がデータを欲してから得るまでの時間が短い場合には、特別報酬が大

きくなるとする。つまり、特別報酬は通信達成時間 t_0 に応じて単調減少すると仮定するということである。

またその報酬関数は、所望通信達成の緊急度と転送データ自体の重要度に基づくと仮定したが、より具体的には、緊急の場合は通信達成時間 t_0 が少し大きくなるだけで所望通信達成の価値が大幅に下がるという考え方や、転送データが重要であるほど所望通信達成の価値が高いという考え方に基づくと仮定する、ということである。

以上より、通常報酬と特別報酬を図2のように示す。横軸が時間、縦軸は報酬を示し、グラフの。グラフの左側から右側に時間が流れると考えてよい。まず、ノードが移動協力を始めると、動けば動くほど報酬が小さくなる。しばらくすると、所望の通信がどのような通信であるかに応じて動くのをやめ、しばらくその場所でリンクアグリゲーション通信を行う（グラフの凹んでいる部分の底辺）。そして再度動きだし、元の位置に戻り、所望の通信を達成したということで特別報酬（赤斜線部）が得られる。

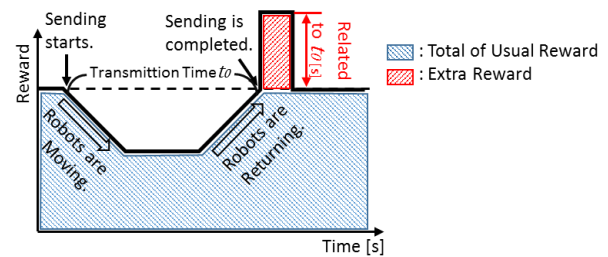


図2 時間経過に対応して変化する、協働作業時の報酬の概念図

4. 報酬最大化問題の定式化

第2章、第3章で定義したモデルに基づいて、報酬を最大化する問題を定式化する。本稿では、協力の目的、すなわち達成すべき目的の違いにより特性が異なってくるため、大きく分けて2通りの問題について評価する。一つは所望スループット実現問題、もう一つはファイル転送達成問題である。達成すべき目的を制約条件として、報酬を最大化するという最適化問題になる。その最適解は、できる限り各自の調査活動を継続しつつ、所望の通信を実現するような協働作業方法となる。協働作業方法すなわち制約条件の具体的な内容は、問題設定によって異なるため後述する。

4.1. パラメータと問題設定

それぞれの問題定式化の前に、両方の問題に共通して必要な初期設定・パラメータを示す。

まず、大容量通信を行いたいノードと、その周辺で各自の調査活動をしており必要に応じて協働作業に参加するノードの初期位置を決める必要がある。本稿では、2次元座標で初期位置を表す。また、ロボットの

移動速さも決める必要がある。さらに、無線通信に関して必要なパラメータが1つ、関数が1つ存在する。それぞれ 3G/LTE 回線のスループットと、WLAN 回線の伝送レートである。2.1 節で示したように、3G/LTE 回線スループットは一定値であり、WLAN 伝送レートはノード間距離に対して単調減少するものとする。

通常報酬関数も決定する必要がある。これは 3.1 節に示したように、移動距離に応じて単調減少する関数であるが、想定する状況に応じて関数は適宜変更する必要がある。

4.2. ファイル転送達成問題

ファイル転送達成問題は、所望データ量を所要時間以内に転送完了するという制約条件の下、報酬合計変動分 Q をできるだけ多くするという最適化問題である。報酬合計変動分 Q とは、協働作業を行わない場合と比べて行う場合はどれほど報酬合計が大きくなるか、ということを表す指標である。報酬合計変動分 Q は、次式で表される。

$$Q = \text{特別報酬 } B - \text{通常報酬減少分 } A$$

ここで、通常報酬減少分 A と特別報酬 B は図 3 の各斜線部である。図 3 は、図 2 においてファイル転送達成問題で着目する部分を変え、合計通信量のグラフ(青線)を追加しただけである。水色斜線部の面積が、所望の通信量に相当するものであり、この面積が一定であることが本問題の制約条件である。通常報酬減少分 A というのは、協働作業を行わない場合(点線部分)より、行う場合の方がどれほど通常報酬が減少してしまうかを表す値であり、図 3 の斜線部 A の面積に等しい。特別報酬 B は、本問題では協働作業により所望の通信が達成された直後に得られるものとする。これは、ファイル転送など、完全に転送し終えた時に初めて価値が発生するアプリケーションを想定しているためである。

以上の内容をまとめると、次のように記述できる。

目的関数: 最大化 報酬合計変動分 Q
 制約条件: 所望通信量(図 3 青斜線部)転送達成

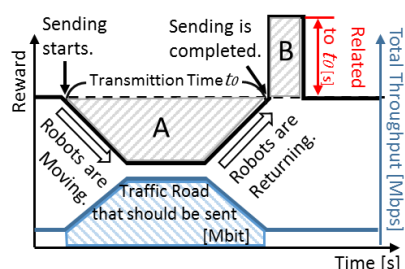


図 3 通常報酬減少分 A , 特別報酬 B , 所望通信量の概要図

5. ファイル転送達成問題の特性

本章では、4.2 節で示したファイル転送達成問題に見られる特性を示す。本章では、無線 LAN 通信でチャネルを共有する仮定で議論を進める。さらに本章では、通常報酬関数がすべてのノードで同一の場合と異なる場合とで特性が異なるので、その差異について述べる。

5.1. 通常報酬関数がすべてのノードで同一の場合

パフォーマンス低下(通常報酬減少分 A)は、通信達成時間が大きくなる(つまり通信に時間がかかる)にともなって単調減少する。その理由は、以下のようにになっている。各ノードが大きく移動するほど、通常報酬は小さくなるが、スループットが向上する。したがって、より短時間で所望のファイル転送を達成するためには、協働ノードがより大きく近づく必要がある。したがって、通信達成時間が小さくなるほど、協働作業時の通常報酬は小さくなり、その減少分 A が大きくなる。つまり、通信達成時間が大きくなるほど、通常報酬減少分 A が小さくなるので単調減少しているといえる。

特別報酬 B は、総合報酬変動分 Q が最大の時(つまり最適解の時)の値に大きく関係している。ここで特別報酬は通信達成時間の関数であると考えられるので、 $B = b(t_0)$ と表すことにする。グラフ $B = b(t_0)$ の微分(グラフの傾きのような値)の絶対値が大きければ大きい程、通信達成時間が少し短縮されるだけで報酬が大幅に増加するので、報酬が手厚いといえる。このような場合、同じ距離近づいて得られる特別報酬 B が大きくなる。したがって、通信達成時間を短くすることにより、通常報酬減少分 A が大きくなっても、それ以上に特別報酬 B が大きくなるような状況が考えられる。この場合には、より多くのノードがより大きく近づくような協働作業方法が最適解となる。これはより短時間でファイル転送を達成するような解である。

またグラフ $B = b(t_0)$ の微分の絶対値が極端に小さい/大きい場合、それぞれ”全く動かずにゆっくり転送する”/”最大限近づく”という解空間の両端が最適解となる。

さらに、通常報酬関数によっては、初期位置のノードを少し移動するよりも、すでに大きく動かしたノードをさらに少し動かした方が、減少分が少なくなる場合があり、スループットを高めるために、すべてのノードが同様に近づくわけではない。注意すべき点として、Performance Anomaly 問題を考慮すると、低レートでしか通信できない位置にいるノードは、敢えてリンクアグリゲーションに参加させないほうが高スループットを得られるため、通信に参加しないノードも存在する。

5.2. 通常報酬関数が異なるノードである場合

全てのノードで通常報酬関数が同じである場合と、そうではない不均一な場合を比較する。不均一な場合の一例として、協働ノードのうち最も遠いノードの通常報酬関数だけに凸、つまりいくら動いてもそれほど通常報酬が変わらず、その他の協働ノードの通常報酬関数は下に凸、つまり少し動くだけで通常報酬が大幅に落ちるが、それ以降いくら動いてもあまり変わらないような場合を考える。すると、均一な場合と比較して、不均一な場合は、最も遠いノードに、通常報酬があまり下がらない範囲でできるだけ大きく移動してもらうような解が最適解となる。

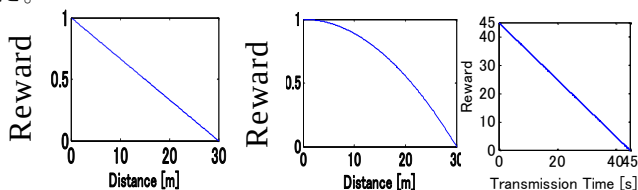
6. 最適なロボット移動と最適報酬値の定量評価

本章では、第 5 章で定性評価したファイル転送問題について、定量的な評価を行い、報酬関数の形が総合報酬にどの程度の影響を与えるのか、どのロボットがどのように移動するのかといったことを調査する。数値解析ソフトウェアは、MATLAB を使用した。プログラムの都合上、1 秒単位でスループットや報酬などの計算値を算出しているが、精度的には十分良いことを確認している。使用したプログラムを付録に示す。

本数値解析で用いた近似設定などについて述べる。簡単のため、ノードは xy 平面(2 次元)上のみを移動可能であると仮定した。3 次元移動でも同様の結果を得ることができるはずである。また、2.2 節にて述べたように、協働作業時に、協働ノードは 3G/LTE 回線の帯域の一部を自身の通信のために使用し、リンクアグリゲーションのためにそれ以外の帯域を貸すモデルを想定しているが、本解析では協働ノードが自身の通信のために使用する帯域の割合は、全体に比べて無視できるほど小さいと仮定した。つまり、協働ノードは、その全ての帯域を通信ノードのために貸すものとして計算を行った。

今回、通常報酬関数は基本的に図 4(a)のような 1 次関数とした。6.2 節の一部でのみ、不均質な設定とするために図 4(b)のような上に凸の関数にした。

さらに、特別報酬関数は図 5 のような 1 次関数とした。



(a) 通常報酬関数 (直線の場合) (b) 通常報酬関数 (下に凸の場合) 図 5 特別報酬関数 B
図 4 通常報酬関数(直線の場合)

また初期位置は、WLAN で通信できる程度の距離間隔を持たせたような、図 6 のように設定した。無線 LAN は、[5]の実験結果より、横軸をペア間距離とすると、図 7 のように距離に応じて単調減少するようなものとした。

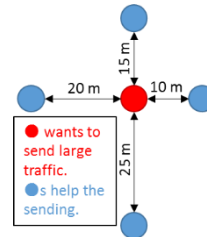


図 6 初期位置

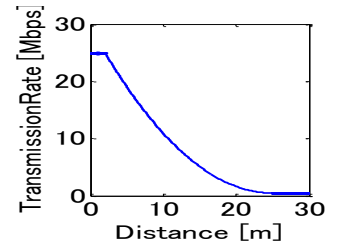


図 7 WLAN 伝送レート

6.1. 通常報酬関数がすべてのノードで同一の場合

5.1 節で述べたように、図 5 のグラフのグラフ傾きは特別報酬の手厚さに相当するため、この特別報酬関数の傾きを変えた場合の数値解析結果と比較することによって、特別報酬の手厚さが与える影響を調べることができる。このような目的の下、0.5 倍、3 倍、5 倍したときの報酬合計変動分 Q も並べて図示したものが図 8 となった。横軸は通信達成時間、縦軸は報酬合計変動分 Q である。中抜き丸プロットで形成されたグラフが、図 5 の特別報酬関数の時に得られた結果である。また、中抜き四角、星、バツの形をしたマーカーで形成されたグラフは、それぞれ、特別報酬関数を 3 倍、5 倍、0.5 倍した時に得られた結果である。赤丸のマーカーは、各グラフにおける報酬合計変動分 Q の最大値、つまり最適解のときの値である。特別報酬がオリジナルの場合と 3 倍した場合を比較すると、3 倍したときの方が、約 7 秒ほど通信達成時間が小さい場合に最適解となった。これは、5.1 節で示した通り、報酬が手厚い場合に早く通信を終えることを優先していたことを意味する。今回、通信達成時間としてあり得る範囲がおおよそ 27 秒から 41 秒までの 14 秒の間である。したがって通信達成時間が約 7 秒も短縮されたという事実は、解空間の半分に相当する、非常に大きい短縮であったといえる。

さらに、特別報酬を 5 倍した場合と、0.5 倍した場合の最大値は端点となっているため、実際にどれくらい極端な設定なら 6.1 節で示したように最大値が端点になるかわかる数値例を示したといえる。

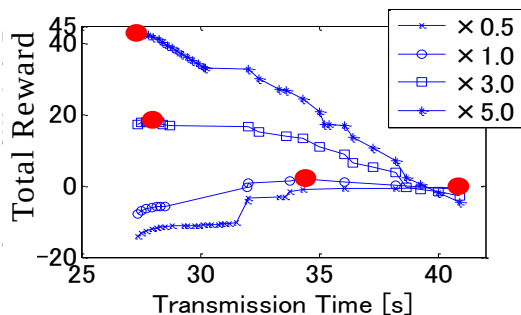


図 8 特別報酬関数の傾き変化による報酬合計変動分 Q への影響

図 9 は、特別報酬関数を下に凸な関数に置き換えた場合の、各ロボットの協力度合いを示している。縦軸は各ロボットの位置を、中抜きではない丸マーカーはリンクアグリゲーションに参加、中抜きの丸マーカーはリンクアグリゲーションに不参加であることを示している。前述の Performance Anomaly 問題および報酬度合いの関係で、横軸(特別報酬 B)が増加したときに、参加するロボットが必ずしも、そろって同じ動きをする訳ではないことが示されている。

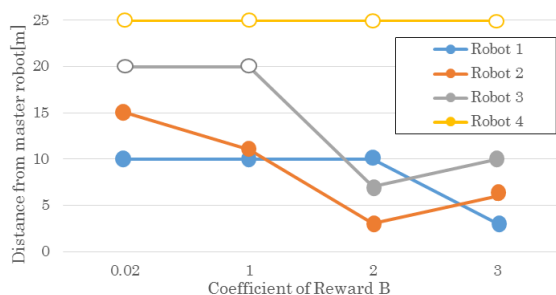
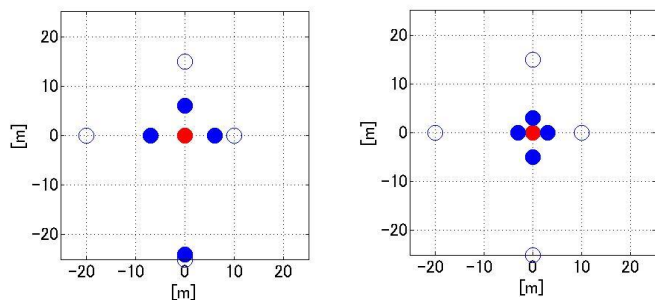


図 9 特別報酬 B の手厚さに応じた移動協力の变化

6.2. 通常報酬関数が異なるノードがある場合

7.2.2 節の問題設定のうち、通信ノードから最も遠いノードの通常報酬関数だけ図 10(c)のような上に凸の関数とし、それ以外の通常報酬関数は図 10(b)のような一次関数とした。転送ファイルの大きさは 1000 Mbits とし、それに伴い特別報酬関数も 2 倍した。全ての協働ノードの通常報酬関数が図 4(a)のような一次関数である場合と、今回の特徴である、最も遠くのノードの通常報酬関数のみ図 4(b)のような上に凸の関数である場合の比較ノードの近づき方をそれぞれ図 10(a),(b)に示す。移動協力の様子は、通常報酬関数のわずかな違いで、最も遠くのノードがほとんど近づかなかったのが非常に大きく近づくように結果が大きく変わった。5.2 節で、通常報酬関数が上に凸の場合に、協働作業時に遠くから大きく近づく性質があることを述べたが、本数値計算により、その通常報酬が少し上に凸になるだけで移動量が 1 m から 20 m へ大幅に変化するよう

な数値例をしめすことができた。



(a) 全て直線の場合。図 (b) 図中下の協働ノード
中下のノードは 1m のみ上に凸の場合。図
しか動いていない 中下のノードが 20m
も動いている

図 10 通常報酬関数の変更による移動協力に対する影響

7. おわりに

本研究では、群ロボットもしくは人間による調査活動などにみられる、分散して存在する複数の移動可能なノードで構成されるシステムにおいて、協力型通信を用いて、個々では不可能な仕事を行うという状況を想定し、協力により全体の仕事量(ここでは報酬と呼ぶ)の最適化について検討した。

また、各制約条件について数値解析を通して評価を行い、本システム特有の数値例とその特性を示した。移動協力のためのパフォーマンス低下や協働作業への報酬や無線 LAN・広域無線網の特性などに依存して、協力すべきノードが興味深い移動を行うことを確認した。数値例として、ファイル転送問題において、通常報酬関数を少し上に凸にするだけで、ノードの動き方が 1m→20 m に大きく変わるといった例を示した。

参 考 文 献

- [1] J. Duncanson, Inverse multiplexing, IEEE Communications Magazine 3(4) (1994) 34–41.
- [2] Y.Noda, T.Murase, K.Sasajima, “Evaluation on QoS Characteristics of Wireless Link Aggregation with Cooperative Moving Multi-Robots,” IEEE Communications Quality & Reliability(CQR'13), May 2013.
- [3] 野田 勇人, 村瀬 勉, 笹島 和幸, “複数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性能評価,” 情報処理学会 DICO, 2013 年 7 月
- [4] Martin Heusse, Franck Rousseau, Gilles Berger-Sabbatel, Andrzej Duda, “Performance Anomaly of 802.11b,” Proc. IEEE INFOCOM 2003, vol.2, pp.836–843, April 2003.
- [5] Saeko Iwaki, Tutomu Murase, Masato Oguchi, “Characteristic of Multirate through wireless LAN,” DICO, 2011.