

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

野田 勇人^{†1} 村瀬 勉^{†2} 笹島 和幸^{†3}

本論文では、無線通信可能な複数の移動ロボットに対しリンクアグリゲーションを適用した際に、ロボット同士が協調して移動したときの効果を評価する。それぞれのロボットは2種類の回線を持つ。移動ロボット間で短距離広帯域通信を行うことが出来るWLAN回線と移動ロボット-センター基地間で遠距離狭帯域通信を行うことが出来る3G回線である。リンクアグリゲーションを用いることで、ある一つの移動ロボットが大量のデータ(高精細な動画等)をリアルタイムでセンター基地へ送信したい場合に他ロボットの3G回線を束ねて高速な通信を実現することが出来る。しかしこのとき、ロボット間距離が大きいこと等が原因でロボット間のWLAN回線の帯域幅が狭くなり、束ねた回線のスループットが所望の大きさに達しない場合がある。このとき、大量データを送信したいロボットに周辺のロボットが近づくことにより所望のスループットを実現することを考える。その近づき方について最適問題を定式化し、結果を評価する。本研究成果により、地雷埋設地域や被災地のロボット調査で、例えば高精細な動画などをリアルタイムで受信することが出来る。

Evaluation on QoS Characteristics of Wireless Link Aggregation with Cooperative Moving Multi-Robots

YUTO NODA[†] TUTOMU MURASE[†] KAZUYUKI SASAJIMA[†]

1. イントロダクション

近年、人間が入ることのできない地域を調査したいという需要がある。例えば地雷埋設地域や、毒ガス、ウイルスなどが充満している地域などである。このような場所を、複数のロボットを用いて調査することが出来れば、安全な調査をすることが出来る。例えば地雷を安全に取り除くことなどが出来る。

移動ロボットの研究[1]や群ロボットの研究[2]は、既に数多く存在する。我々は、将来このようなロボットは今後調査や救助などの活動に利用されると考えている。一方、マルチパス通信によって高スループット通信を実現するという研究も数多くなされている[3]。

このような背景から、近い将来複数のロボットが人が入れない地域を調査し、安全なセンター基地にリアルタイムに情報を送るといったケースが増えると考えられる。そしてその際3G回線1本のみで、例えば高精細な動画を転送しようとする、スループットが不足することが考えられる。以上から本研究では、我々はある地域を調査しデータをセンター基地へ送る際にリンクアグリゲーションと呼ばれる手法を用いる。ロボット間通信にはWLANを用い、ロ

ボット-センター基地間通信には3Gを用いる。なぜなら、WLANは近距離広帯域通信(802.11gでは、およそ100m以内)、3G回線は遠距離狭帯域通信であるためである。今回調査で用いるロボットの定義は、“調査活動、平面上の全方向自由移動、そしてWLANと3Gを用いてそれぞれ2つのロボット間とロボット-センター基地間の通信が可能”とする。以上の特徴により、我々は2種類の通信を用いたモデルを考える。

ロボット調査の歴史上、ロボット通信のスループットが不足することを解決するためにリンクアグリゲーションを用いるという研究は数少ない。さらに本研究では所望のスループットを得るためにロボット同士で最適性を考慮して協調動作を行うため、この点が画期的である。

2節では我々が提案手法で用いるロボットのモデルと通信モデルを説明する。この2つのモデルを説明することで、リンクアグリゲーションを複数のロボットで構成されるシステムにどのように適用するかを説明する。

3節では最適問題を定式化し、拘束条件と目的関数で考慮する指標をいくつか提案する。また、なぜリンクアグリゲーションを複数ロボットのシステムに適用するのか、さらに、そのときどのような問題が発生するかを議論し、その解決策を説明する。

今回行った数値解析の設定と、予想結果と実際の結果を4節で、そして5節で考察を述べる。最後に6節で結論を述べる。

^{†1} 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
noda.y.ac@m.titech.ac.jp

^{†2} 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
murase@mei.titech.ac.jp

^{†3} 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
sasajima@mei.titech.ac.jp

2. モデル概要

本節では、ロボットモデルと通信モデル定式化し、リンクアグリゲーションについて説明する。また、なぜ今回リンクアグリゲーションを用いるかを説明する。

2.1 ロボットモデルと通信モデル

世界には、ロボットと呼ばれるものは数多く存在する。ASIMO から NC 工作機械まで、さまざまである。しかし本研究では、ロボットは次の 3 種類の機能のみを持つものとする。

1) 調査

これはロボットがすべき本来の仕事である。例えば、埋設されている地雷を探すロボットの場合、地雷探しを～

2) 移動

ロボットは平面上を自由に移動できる。本研究では、ロボットは平らな地面や床の上で動くものと仮定する。

3) 通信

それぞれのロボットは WLAN 通信によるロボット間の近距離広帯域通信と、3G 通信によるロボット-センター基地間の遠距離狭帯域通信を行うことが出来る。これを Fig.1 で示す。

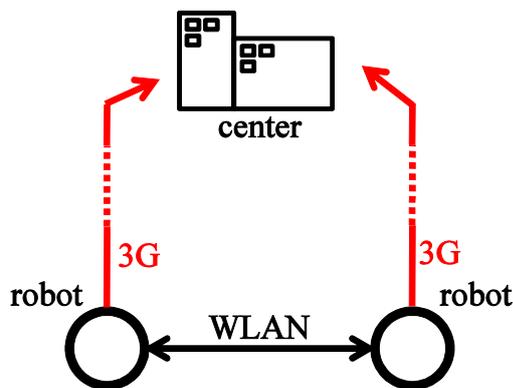


Fig.1 Communication model

2.2 リンクアグリゲーション概要

本研究で用いるリンクアグリゲーションについて、Fig.2 を用いて説明する。

赤いノードが”何か送るべきデータ量の大きい情報を見つけ、情報を送りたいロボット（以下、赤ロボット）”、青いノードが”普段と同様に調査を行っているロボット（以下、青ロボット）”を示している。赤ロボットと青ロボットの間の黒い矢印は WLAN 通信のリンクを表しており、各ロボットから上方向に出ている赤い矢印がセンター基地との 3G 通信のリンクを表している。このような使い分けをする理由は、WLAN の方が近距離で広帯域の通信を得意とし、3G

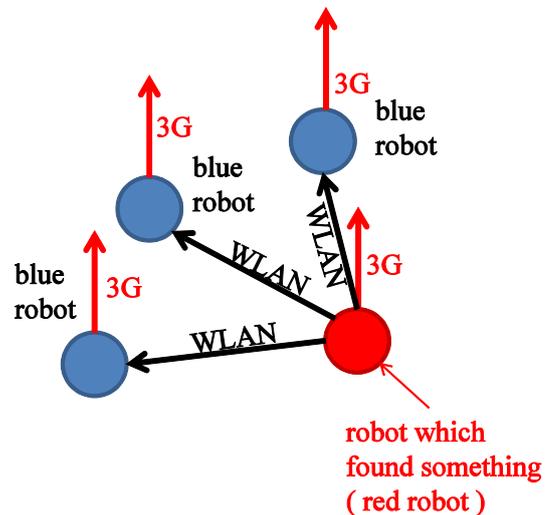


Fig.2 Scheme of aggregation method

の方が遠距離で狭帯域の通信を行うことを得意としているからである。

赤ロボットが 1 本の 3G 回線ではリアルタイムで送れないほどの大きいデータをセンター基地に送りたいとき、リンクアグリゲーションは以下の手順で行われる。

ステップ 1: 送りたいデータを分割し、青いロボットとの WLAN リンクを通して送る

ステップ 2: 赤ロボットと分割データが送られた青ロボットそれぞれから、3G 回線によりデータがセンター基地に転送される

したがって、赤ロボットは周辺のロボットの 3G 回線を利用することが出来、自身の 1 本の 3G 回線のみでデータを送る場合よりも高スループットを得ることが出来る。

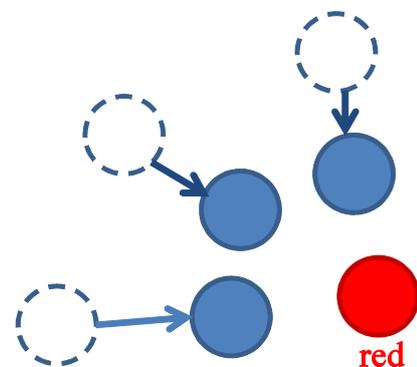


Fig.3 Approaching in order to get good throughput

2.3 他に提案されうる手法と今回の手法を用いた理由

人が入れない地域で高スループットを得る方法としては、実際のところ今回の手法のほかに 2 通り考えられる。しかし、この 2 つの方法にはいずれもメリットとデメリットが存在する。本小節では、それらの手法の説明と、総合的に

判断した結果今回の手法を選択したその理由を説明する。

ひとつは各々のロボットが複数の 3G 回線を持ってしまえば、1 対のロボットでリンクアグリゲーションを行い高スループットを実現できるという案である。実際のところ、この手法は高スループット実現のために考えられる最も単純な解決策である。しかしこの手法ではコストがかかり過ぎる。仮に 5 台のロボットで調査を行うとし、一つのロボットが 1 本の回線を持つ場合と 5 本の回線を持つ場合を考える。また一本の回線が月額 3,000 円であるとする。すると、1 台のロボット 1 本の場合は月額 15,000 円である。一方、1 台のロボット 5 本の場合は月額 75,000 円である。

もう一つはモバイルルーターのようなアクセスポイントを調査したい地域にばらまき、そのアクセスポイントを使ってリンクアグリゲーションを行うという手法である。近年モバイルルーターのような機器は価格が安くなっており、この手法を実現することは可能であると考えられる。しかしこの手法には重大な欠点がある。それは、調査後にルーターが残ってしまうことである。ルーターを取り除けなければ、環境に悪影響を与える。

以上の理由から、本研究では本小節で説明した手法ではなく提案手法を用いた。

3. 問題の定式化

リンクアグリゲーションには一つ問題がある。それは、青ロボットと赤ロボットの間の距離が大きすぎたときに生じる。このとき、WLAN のリンクがボトルネックになることにより、リンクアグリゲーションによって束ねられた回線のスループットがボトルネックになってしまってリアルタイムで送りたいデータが送れないことが考えられる。この問題を解決するために今回提案する方法が、“赤ロボットに青ロボットが近づくことで、WLAN の帯域幅を広げ、酢スループットを向上させる”というものである。

この際の動きにはいくつか拘束条件が存在する（小節 3 B 参照）。したがって我々は、その拘束条件の下、それぞれのロボットがどのように動くのが最適なのかを評価する。そのために我々は複数のロボットで構成されるシステムに対して最適化問題を定式化する。

3.1 前提条件

最適化問題の定式化の前に、いくつかの前提条件を以下のように定義する。

1. 各々のロボットは調査対象地域で自身の仕事を行っている。
2. ロボットは平らな地面もしくは床の上にいる
3. 各々のロボットは WLAN コネクションと 3G コネクションを持つ
4. 3G 通信はロボット-センター基地間の通信に用いられ、一定のスループットを持つ。

5. WLAN 通信は 2 つのロボット間の通信時に用いられ、ロボット間距離によってスループットが変動する（近いほど高スループット、遠いほど低スループット）。

6. 全ての通信は UDP で行われる。なぜなら本研究では、例えば高精細な動画を転送するようなことを想定しているため、パケットの順序を順番通りにする必要がないためである

7. 各々の WLAN コネクション間の干渉は考慮しないものとする

8. 各々のロボットの速度は一定で、ロボットは全方向に自由に動くことができる。

9. 各々のロボットの仕事能率は $[0,1]$ の値であり、そのロボットが全く動かなかった場合は 1 である。

3.2 最適化問題

本小節で最適化問題を定式化する。Fig.4 は 5 台のロボットで調査活動をする場合を示している。Fig.4 を通して、いくつかのパラメータと変数を説明する。

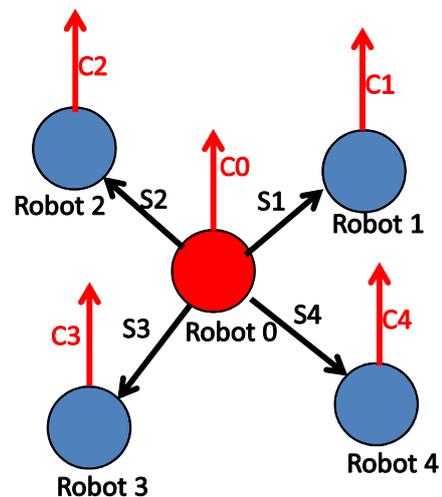


Fig.4 Object of optimal problem ($n = 5$)

C_i : ロボット ($i-1$) の 3G リンクのスループット

S_i : ロボット ($i-1$) - ロボット 0 間の WLAN リンクのスループット

ここで、 $i = 1, \dots, n$ である。

Fig.4 で表記されているパラメータ以外にも、以下のような変数を用いる。

l_i : ロボット ($i-1$) - ロボット 0 間の距離

v_i : ロボット ($i-1$) の移動速度

L_i : ロボット ($i-1$) の移動距離

w_i : ロボット ($i-1$) の仕事能率 リンクアグリゲーションのために動かされてしまうロボットは、いくらか自身の仕事の能率が下がってしまうだろうという考えから定義されている変数。ロボットがリンクアグリゲーションのために動いた距離 L_i に関する変数である。

また、最適化問題の目的関数もしくは拘束条件で考慮する指標が必要であるが、現時点で提案する指標は以下の6つである。

- (1) リンクアグリゲーションにより得られる合計のスループット
- (2) 各々のロボットの仕事能率の和
- (3) あるロボットが大きな情報をリアルタイムで送りたいと考えたときから、所望のスループットを得るまでの時間
- (4) リンクアグリゲーションのために動くロボットの台数
- (5) 送りたいデータの容量
- (6) リンクアグリゲーション開始時からの通信時間

以上より、次のような最適化問題を定式化する。

<p>目的関数: 最大化 (or 最小化): 指標 (1)-(6)のうちの一つ</p> <p>拘束条件: 指標(1)-(6)に関する不等式</p>

4. 数値解析

4.1 今回解いた最適化問題

本数値解析は MATLAB にて行った。全パターンを計算して解いた。最適化問題は以下のようなものを扱った。

<p>Maximize: value (2)</p> <p>Constraints: value (1) $\geq C_d$ [Mbps], and value (3) $\leq T_d$ [s]</p>

Figure 5 は、今回もちいた仕事能率のグラフである。リンクアグリゲーションのためにロボットが全く動かなければ1、動けば0ということを示している。

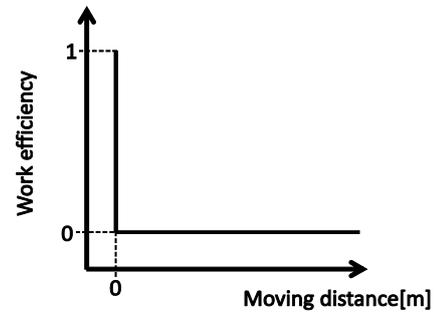


Fig.5 Relationship between work efficiency and moving distance of one robot

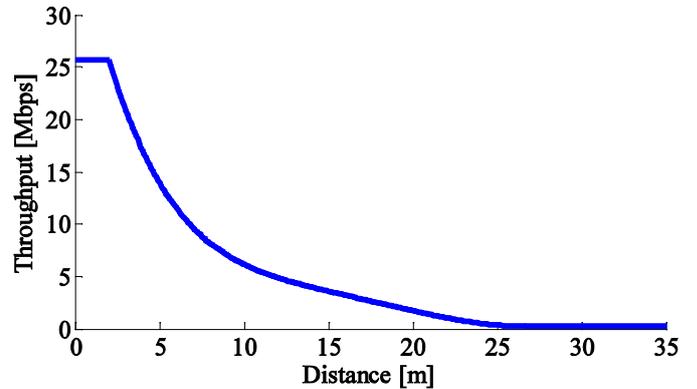


Fig.6 Characteristic of throughput of WLAN

Figure 6 は、本解析で用いる2つのロボット間の距離とWLAN通信のスループットの関係を示している。また本解析ではロボット間距離とスループットが直接的に関係しているものとする。Figure 6のグラフは、実際に2点間距離とスループットの関係の実験[4]の結果をもとに、最小二乗法を用いて5次曲線と直線で表したものである。[4]の実験はIEEE802.11gで行われたため、Fig.6は11gを用いた場合を想定している。

各ロボットの初期位置はFig.7のようになっている。

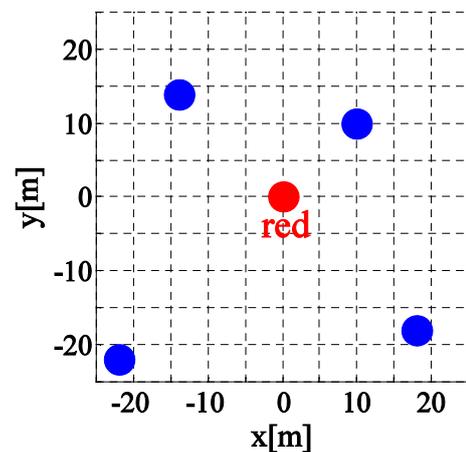


Fig.7 Initial position of the robots

各パラメータは以下のようにになっている、
ロボットの台数：

$$n = 5$$

各ロボットの位置:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_5 \\ y_1 & \dots & y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\text{m} & 10\text{m} & -14\text{m} & 18\text{m} & -22\text{m} \\ 0\text{m} & 10\text{m} & 14\text{m} & -18\text{m} & -22\text{m} \end{bmatrix}$$

各ロボットの 3G 回線:

$$C_i = 5 \text{ [Mbps]}$$

各ロボットの移動距離：

$$v_i = 1 \text{ [m/s]}$$

以上の設定で、以下の範囲で数値解析を行った。

$$0 \leq T_d \leq 25[\text{s}], \text{ at } C_d = 8, 10, \dots, 24[\text{Mbps}]$$

4.2 各パラメータ選択の理由

3G のスループットが $C_i = 5 \text{ Mbps}$ である理由は、実際の LTE 通信がおよそ 5 Mbps であるためである。各ロボットの速度が 1 [m/s] である理由は、調査ロボットは一般的に高速で動けないものが多いためである。また速くないため、移動時と停止時の切りかえは瞬間的に行われるものとして、つまり切り替えは離散的に行われるということである。

ロボットの台数が 5 台である理由は、リンクアグリゲーションで得られるスループットが 15 Mbps あれば、現状で高精細な動画像と呼べる動画像がリアルタイムで転送できるため 5 台程度が適切な台数であると考えた。

T_d と C_d を 4.1 で述べた範囲で変動させて数値解析を行った理由は、これらの値が仕事効率に大きく影響するためである。

4.3 予想される結果

基本的に、時間 T_d が大きくなるほど、仕事効率は大きくなる。なぜなら、時間が多くあれば青ロボットがより近くまで近づけるためである。例えば、赤ロボットからの距離が大きいロボットで、かつ赤ロボットに十分近づくことが出来る青ロボットは動くべきである。

しかし、初期位置の状態赤ロボットが既に所望のスループット C_d を得られていた場合は、青ロボットが赤ロボットに近づく必要がない。つまり、それぞれのロボットの仕事効率は 1 となる。一方、所望のスループットが 3G 回線のスループットの合計以上である場合（本問題であれば 25 Mbps 以上）そのスループットを得る方法はない。

本研究では、各ロボットの仕事効率はバイナリ変数とする。したがってその和は整数となる（本問題では 0 以上 5 以下の整数）。また仕事効率が離散的な値であることから、拘束条件の内、所望のスループットのみが異なった場合でも、仕事効率が同じ値を取る場合がある。

本問題は P 問題ではない。なぜなら、ロボットの数が 1

台増えると計算コストは 2 倍となるからである。したがってロボット数の増大により計算量が爆発する。

4.4 計算結果

本数値解析の計算結果は Fig.8 である。

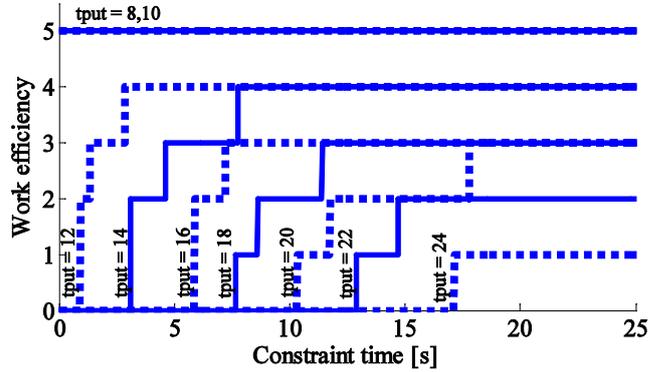


Fig.8 Characteristics among throughput of aggregated connection, work efficiency, and Constraint time

図 8 は、次の 3 つの指標の関係を示したグラフである。

- (1) 所望の合計スループット
- (2) 通信に関わるロボットの仕事効率の和
- (3) 所望のスループットを得るまでの時間の拘束

横軸が(3)時間拘束、縦軸が(2)仕事効率、各線が各所望スループット合計の場合の結果である。点線と実践が交互に描かれている理由は、重なっている部分を見やすくするためである。横軸は時間の流れを表しているのではなく、時間の拘束条件を示している。仕事効率が 0 であるということは、所望のスループットを得られないという事を意味する。

5. 考察

図 8 の結果は想定していた結果とほぼ同様であった（小節 4.3 参照）。 $t_{\text{put}} = 8, 10$ の線では、仕事効率が常に 5 であった。つまり初期位置の状態で既に所望スループットが得られており、動く必要がなかったということである。その他の線は、時間拘束がゆるくなるほど(グラフの右側に行くほど)仕事効率が大きくなっている。つまり、ロボットが集まるために十分な時間があれば、より大きい仕事効率を得られるという事である。図 8 は所望スループットが大きいほど仕事効率が小さくなるという事も示している。

異なるスループットの線同士で重なっている部分があるという結果は、小節 4.3 で予想されている通りになったといえる。もし仕事効率が移動距離に対して連続に変化するものであるとした場合、図 8 では重なっている部分は存在しなかったと考えられる。

我々が本数値解析のために使用した PC では、ロボットの数がおよそ 20 台以下であれば、計算時間の観点から解く

ことが可能であると言える。なぜなら、実際のロボットで構成されるシステムに適用する場合、所望のスループットを得るためにロボット同士集まろうと決めてから計算が終了するまでの時間だけ待っているような状況となるため、待つに堪える計算時間に収まる必要があるからである。ロボットの数がこれ以上の場合を扱うためには、計算手法をより効率的なものにするか、ハイスpek的な計算機を利用する必要がある。

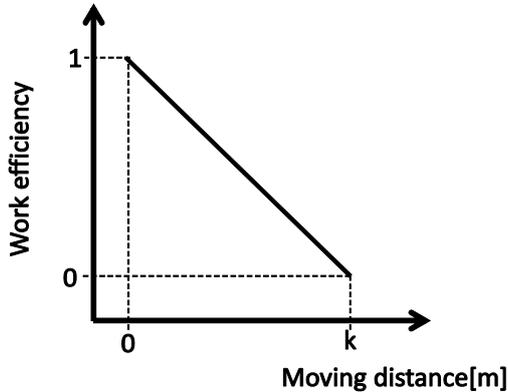


Fig.9 An example of continuous and monotonically decreasing

以上の観点から、我々のモデルは実際のロボットで構成されるシステムにも適用でき、我々が行った数値解析結果によって評価できるといえる。

6. 結論

本研究では、3G と WLAN で通信可能な複数のロボットで調査活動を行うようなシステムに対し、リンクアグリゲーション手法を適用させることを提案した。その際、ロボット間通信のスループット不足により合計スループットがリアルタイム通信にあたってボトルネックとなってしまうため、その際にロボット同士が協調して動きあうことで所望のスループットを得るというアイデアを提案した。そのロボットの動きを最適化問題とし、数値解析を行い結果を評価した。そして以上から、本モデルは実際のロボットで構成されるシステムに対しても適用でき、かつ有用であるということが出来、地雷埋設地帯や被災地などで今後活躍することが期待される。

今後は、WLAN 特有の問題である、Performance Anomaly 問題も考慮する予定である。

参考文献

- [1] K. Arikawa, S. Hirose, "Development of quadruped walking robot TITAN-VIII," Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference, 4-8 Nov 1996. 208 - 214 vol.1
- [2] S. Hirose, "Super-Mechano-Colony and SMC Rover with Detachable Wheel Units," Proc. TITech COE/Super Mechano-Systems workshop '99., pp. 67-72.
- [3] Yohei Hasegawa, Ichiro Yamaguchi, Takayuki Hama, Hideyuki Shimonishi, Tutomu Murase, "Deployable multipath

communication scheme with sufficient performance data distribution method," Computer Communications - COMCOM , vol. 30, no. 17, pp. 3285-3292, 2007

- [4] Saeko Iwaki, Tutomu Murase, Masato Oguchi, "Characteristic of Multirate through wireless LAN," DICOMO, 2011.
- [5] 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.