情報処理学会論文誌 Vol.60 No.3 779–790 (Mar. 2019)

利用者のネットワーク機器を監視する監視装置との通信品質を改善する移動ロボット制御手法

小川 康一[1,2,a)] 吉浦 紀晃[1,2]

受付日 2018年6月25日, 採録日 2018年12月4日

概要：これまで我々は，利用者設置のネットワーク機器を監視する小型コンピュータとカメラを利用した監視装置を開発している．さらに，複数の監視機器からの監視情報を，廊下を自動巡回する移動ロボットが無線 LAN で取得し，移動体通信回線を利用してサーバに中継送信し，集中管理する手法を提案している．当該手法では，監視装置からの監視情報を移動ロボットが無線 LAN で取得する際に，通信状況の悪い地点で収集を行ってしまい，時間を浪費するという問題点があった．そこで本稿では，移動ロボットと監視装置の間の通信効率が良い地点を探索し，監視情報の収集を行うロボットの移動方式を改善する手法を提案する．本手法を実装し，大学内での実験により提案手法の有効性を確認した．

キーワード：ネットワーク障害対応，ネットワーク機器監視，移動ロボット

A Method of Communication Control for Collecting Data of Mobile Robot that Monitor User's Network Equipment

Kohichi Ogawa[1,2,a)] Noriaki Yoshiura[1,2]

Received: June 25, 2018, Accepted: December 4, 2018

Abstract: We have already proposed and developed a monitoring method by using small computers and web cameras to grasp the status of network equipment of users. Moreover, we have also developed a mobile robot that collects the monitoring information from monitoring devices. However, there is a problem that the communication between the monitoring devices and the mobile robot is not completed before the mobile robot moves leave the computers because the monitoring method does not consider the amount of data that are saved in each monitoring device and the communication quality between the mobile robot and the monitoring devices. In order to improve this problem, this paper proposes a new method of controlling the mobile robot to optimize the communication quality between the mobile robot and the monitoring devices. This paper also implements the proposed method and evaluates the effectiveness of the proposed method through experiments.

Keywords: network trouble management, network equipment monitoring, mobile robots

1. はじめに

大学にとって学術情報基盤は，欠かすことのできない重要な要素の 1 つである．なかでも学術ネットワーク（以下，ネットワーク）はインターネットの接続に不可欠である．ネットワークの利用者である教職員や学生が講義や文献検索，研究などに利用している．そのため，多くの大学がネットワークを整備し，運用管理は情報センタ（以下，センタ）が行っている．

埼玉大学（以下，本学）では，全学で光ファイバ直収ネットワーク [1] を運用しており，利用者の部屋とセンタのサーバ室の双方でメディアコンバータの利用が必須となっている．本学の場合，利用者の部屋のメディアコンバータに

[1] 埼玉大学情報メディア基盤センター
Information Technology Center, Saitama University, Saitama 338–8570, Japan
[2] 埼玉大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama 338–8570, Japan
[a)] kogawa@mail.saitama-u.ac.jp

© 2019 Information Processing Society of Japan

接続するネットワークは利用者が自由に利用できるネットワークであり，利用者が用意したIT機器をそのネットワークに接続できる．このメディアコンバータは，センタが管理を行っており，センタに運用責任がある．メディアコンバータに接続する機器は利用者の購入したものであるため，運用管理は本来利用者が行うものである．しかし，利用者は必ずしもITに詳しくないため，利用者自身で障害を解決できない．そのため，本学ではセンタが利用者のネットワーク機器の障害解決の補助を行っている．このような対応は，大学ではよく行われている．また，利用者が発生させたネットワーク障害が大学のネットワーク全体に影響を及ぼすこともあり，センタとしても障害を放置するわけにはいかない．さらに，利用者側のメディアコンバータをSNMP（Simple Network Management Protocol）[2]で監視できたとしても，光ファイバケーブルの断線，メディアコンバータの故障，メディアコンバータの電源の抜け（ネットワーク機器室設置のメディアコンバータとは異なり，利用者居室設置のため利用者側の不注意である程度の頻度で起きる）などがどれもSNMP通信不可としかならず区別できない．カメラでLEDを監視して移動体通信回線で報告する提案方式 [3] であれば，これらの区別も可能になる．以上のことから，本学の環境では，利用者の部屋のネットワーク環境で発生する障害対応や，機器の監視が必要になる．

一方で，本学のセンタは，少数の人員で大学全体のネットワークも含めた情報システムの管理運用を担っている状況にある．本学も含めた現在の国公立大学のおかれた状況では，ネットワーク管理に携わる人員を増やすことは財政面から現実的ではない．よって，多少の費用により前述の障害対応が可能となるのであれば，非常に有益である．また，ネットワーク管理という一般的な視点から考えた場合でも，人員を増やして障害対応にあたるよりも，障害対応の仕組みや方法を構築するほうが望ましいと考えられる．

障害対応の方法としては，ネットワークの管理運用において，省力化のためにSNMPなどの監視プロトコルを利用したネットワーク機器の監視システムを導入することは広く行われている．しかし，利用者は監視プロトコルに対応していないネットワーク機器を購入する傾向にあり，通常の監視システムでは監視できない．

我々はこの課題に対し，先行研究において，利用者が設置したネットワーク機器を監視する小型コンピュータとカメラを利用した監視装置を提案している [3]．また，監視装置の近傍を巡回する移動ロボットを用いることで，複数の監視装置の監視情報を1つの通信回線で収集する方式も提案している [4], [5]．しかし，監視装置からの監視情報を移動ロボットが無線通信で取得する際に，通信状況の悪い地点で監視情報を収集し時間を浪費するという問題点があった．

そこで本稿では，移動ロボットと監視装置間の通信が円滑に行われる地点にロボットを移動させる制御方式を提案する．本稿の提案手法の目的は，電波状況が安定していない場合であっても，監視装置からの監視情報の収集を安定的に行うために，電波強度が強い位置を探索し，監視情報の収集を行うことである．本手法を実装し，大学内での実験により提案手法の有効性を確認した．

本稿は，移動ロボットをネットワーク管理に利用するが，類似の研究として，データセンタにおける移動ロボットの利用がある [30]．データセンタは，サーバルームのような固定された一定の空間であり，設置機器に変更や増減が想定されるが，壁の位置やラックの位置が頻繁に更新される環境ではない．一方，本稿の移動ロボットを利用した監視は，大学の構内を想定しており，データセンタと比べると，環境変化が大きく，また，画一的ではない．このような環境での移動ロボットのネットワーク監視への利用は，従来にないものであると考えられる．

本稿の構成は次のとおりである．2章では，提案手法を理解する前提として先行研究と先行研究の問題点について述べる．3章では，予備実験について説明する．4章では，本稿で提案する手法を説明する．5章では，提案手法の実装方法を説明する．6章では，実装したシステムによる実験と結果について説明する．7章では，本稿の考察を行う．8章では課題について述べ，9章で関連研究について説明する．10章で本稿をまとめる．

2. 基盤となる研究

本章では本稿で提案する手法の前提として，これまでに我々が提案している先行研究について述べる．

2.1 監視装置によるネットワーク機器の監視手法

我々は，Webカメラで撮影したネットワーク機器のLEDインジケータ（以下，LED）の画像データをRaspberry Piで処理することで，LEDの点滅状態から監視対象のネットワーク機器が正常状態か異常状態かを把握する監視システム [3] を提案した．収集した監視情報は，移動体通信回線の通信端末を利用しサーバへ送信する．先行研究は，ネットワーク管理者が障害対応時に行う，目視の動作に着目したものである．ネットワーク機器の表示部は，機器の状態や接続箇所の状態を表している．WebカメラでLEDの表示数や位置情報を定期的に収集する．収集した画像は，画像処理を用いると，正しい状態と異常時の状態が異なるので，この情報を利用してネットワーク機器の状態変化により障害を検知する．この動作例を**図1**に示す．

ネットワーク障害時，監視対象のネットワーク機器が管理するネットワークは利用できない．そこで，監視情報を収集するために，通信キャリアの移動体通信網とインターネットを経由して監視情報をサーバへ送信する．

© 2019 Information Processing Society of Japan



図 1 画像処理による LED 検出の例
Fig. 1 Detection LED indicators of a media converter by image processing.

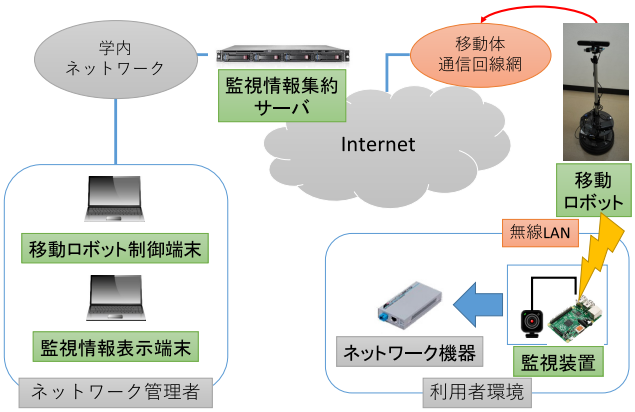


図 2 移動ロボットを用いた監視システムの概要
Fig. 2 Overview of monitoring system by a mobile robot.

2.2 移動ロボットによる監視情報の収集手法

2.1 節の手法は，監視専用の移動体通信回線を監視装置分用意する必要があり，コスト高となる．この解決策の 1 つとして，監視装置の近傍を移動ロボットが巡回する情報収集手法を提案している [4], [5]．**図 2** にこの情報収集手法を実装した監視システムの概要を示す．監視システムは，監視装置，移動ロボット，監視情報集約サーバ（以下，サーバ），監視情報表示端末（以下，表示端末），移動ロボット制御端末（以下，制御端末）で構成される．

移動ロボットと監視装置間の通信は，無線 LAN によるアドホックネットワークを構成し，実現する．移動ロボットからサーバへの通信には，移動体通信網経由のインターネットを用いる．サーバは学内ネットワークに接続している．移動ロボットの制御用コンピュータと監視装置にはどちらも Raspberry Pi を用いる．Raspberry Pi のモデルは Raspberry Pi 2 Model B であり，無線 LAN インタフェースを標準で内蔵していないモデルである．監視装置の Raspberry Pi には，移動ロボットとの通信用の無線 LAN インタフェースを持つ．移動ロボットの Raspberry Pi には，環境地図作成や位置同定のための各種センサを接続し，さらに無線 LAN インタフェースと移動体通信回線用の通信端末を追加してある．

移動ロボットは，制御用コンピュータをはじめとする機器を動作させるため，モバイルバッテリを搭載している．以下に各機器の詳細を列挙する．なお，Raspberry Pi で利用している無線 LAN インタフェースの Buffalo WLI-UC-GNM2 は無指向性である．

- 移動ロボット
  ロボット：ルンバ 780 [6]
  コンピュータ：Raspberry Pi 2 Model B
  無線 LAN インタフェース：Buffalo WLI-UC-GNM2
  通信端末：Docomo L-02C
  OS：Ubuntu 14.04 LTS
  3D 深度センサ：Xtion Pro Live
  レーザレンジファインダ：Hokuyo URG-04LX-UG01
- 監視装置
  コンピュータ：Raspberry Pi 2 Model B
  OS：Ubuntu 14.04 LTS
  カメラ：Buffalo BSWHD06M
  無線 LAN インタフェース：Buffalo WLI-UC-GNM2
- サーバ
  コンピュータ：HP ProLiant DL320G6
  CPU：Intel Xeon 2.53 GHz Dual Core
  メモリ：8 GB
  補助記憶装置：HDD 600 GB × 2（RAID1）
  OS：Ubuntu Server 14.04.4
  ネットワークインタフェース：1000Base-T × 2

移動ロボットの制御は，オープンソースのロボット用のソフトウェアプラットフォームである ROS（Robot Operating System）[7] を利用している．監視装置の設置箇所の自動巡回は，ウェイポイントで行う．ウェイポイントの実現にはデッドレコニング [8] と SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）[9] を用いている．

デッドレコニングは，車輪型の移動ロボットに適用する計測方法の 1 つであるオドメトリ（odometry）[10] を利用し，車輪の回転角度から把握可能な移動量により自己位置を算出する方法である．ただし，物理的な位置のずれや車輪の摩擦に弱く，誤差が蓄積するため，センサで適宜修正する必要がある．そこで，環境地図の作成と自己位置の推定を行う SLAM を用いる．SLAM を行うため，移動ロボットに 3D 深度センサ（Xtion Pro Live）[11]，レーザレンジファインダ（URG-04LX-UG01）[12] を接続する．巡回地点の設定は，SLAM で作成した環境地図上で，監視装置の設置箇所を座標として管理者が手動で指定する．デッドレコニングと SLAM の実装は，ROS の標準パッケージにより実現可能である．

移動ロボットは搭載されたセンサにより自律的に動作するが，環境地図は手動操作で移動ロボットを操作し，収集したデータを基に制御端末で作成する．自動巡回の巡回地点の設定は，作成した環境地図を基に，制御端末で座標を確認し，巡回プログラムに座標を設定する．

2.3 移動ロボットによる情報収集時の課題

先行研究 [4], [5] で移動ロボットは，移動しながら監視装置からデータを取得する想定である．しかし，これまでの

© 2019 Information Processing Society of Japan

実験で監視装置に蓄積されたデータ量が多い場合，移動ロボットと監視装置間の通信が想定時間内に完了しないことがあった．

本稿の目的は，大学の教職員の居室や研究室で発生したネットワーク障害への対応である．ネットワーク障害の原因特定のために監視装置を設置し，この監視装置から移動ロボットが監視情報を収集する．そして，この収集は部屋のドア越しに行われる．このとき，部屋内に人がいることや，人や物が移動することも考慮する必要がある．鳴海らの研究 [13] や梅谷らの研究 [14] により，室内に人物が介在することで無線の電波状態が変化することが分かっている．人以外にも他の無線 LAN デバイスや電子機器の外乱により，電波が弱まることも想定される．

先行研究 [5] の実験結果から，部屋のドア越しの無線 LAN のアドホック通信のスループットは，移動ロボットの位置に対して敏感であると想定される．移動ロボットが監視装置の近傍で停止する位置は，管理者が手動で決定しているため，通信速度が速いとは限らない．そこで，監視装置の近傍より通信に適した位置があるという仮説をおいた．

3. 予備実験

本章では，前章の課題と仮説を検証するために行った予備実験について述べる．

移動ロボットと監視装置間で通信を行う位置を決定するために，本稿では無線 LAN の受信電波強度である RSSI（Received Signal Strength Indicator）を用いる．RSSI 値の変化と，移動ロボットの通信に適した位置の探索範囲を予備実験により確認する．

予備実験は本学センタが管理する部屋で実施した．この部屋にはメディアコンバータが設置されており，このメディアコンバータが監視対象で，実験のために監視装置が常設されている．

各構成機器の大きさと設置位置について**図 4** に示す．移動ロボットの制御を行う Raspberry Pi は，移動ロボットの支柱の上にあり，Raspberry Pi の無線 LAN インタフェースは，床から約 90 cm のところにある．この Raspberry Pi で RSSI 値の計測を行う．また，監視装置の Raspberry Pi の無線 LAN インタフェースは，床から約 60 cm のところにある．

監視装置が設置されている部屋の廊下において，壁面から約 30 cm 間隔で観測地点を設定する．**図 3** のように探索範囲を決定した理由は，図 3 のような監視装置の設置の場合，図 3 の下の部分は別の部屋へのドアであるため，移動ロボットは図 3 の下に近づくことはできない．よって，図 3 のドアの中央の右は探索範囲を広げることができず，ドアの中央の右約 90 cm から左約 180 cm のエリアを探索範囲としている．また，廊下全域ではなく壁寄り約 90 cm までが探索範囲であるが，廊下の幅が約 180 cm であり，歩

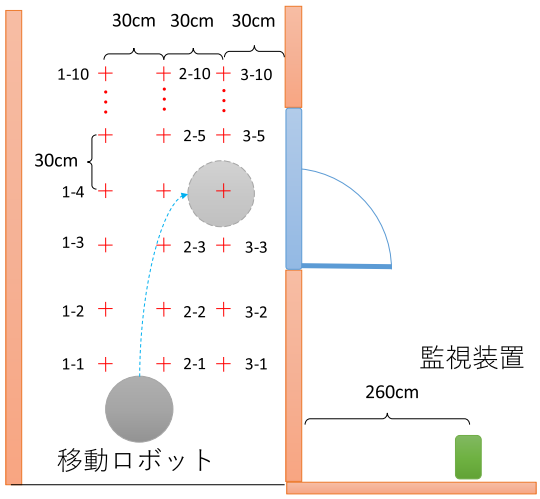


図 3 各観測地点の RSSI 値の確認方法

Fig. 3 Confirmation of the RSSI value of each observation point.

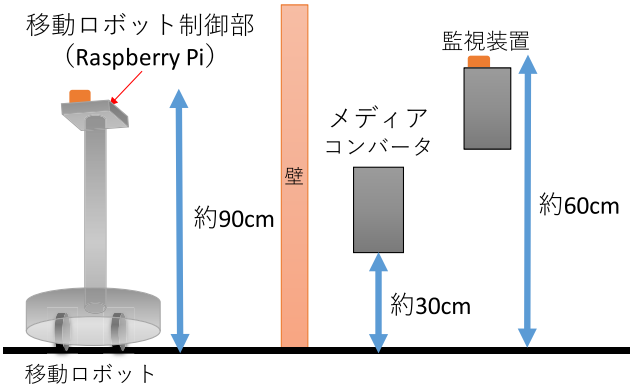


図 4 各機器の大きさと設置位置

Fig. 4 Size and the installation position of each device.

行者の歩行するスペースを確保するため，廊下の幅半分だけを移動ロボットが利用する範囲としている．また，移動ロボットが壁に衝突する可能性をなくすため，探索範囲は壁寄り約 30 cm までとしている．

また，本稿で，探索間隔を約 30 cm としている理由は，移動ロボットの移動範囲である廊下の幅半分を 3 等分したものを利用しているためである．探索間隔は細かい方が好ましいが，観測に時間がかかる．そこで，本稿では廊下の幅を利用して観測地点の間隔を決定した．観測地点は，廊下の手前側から 1-1 とし，順に 1-10 までの観測地点を配置する．

研究室で一般的に利用されている壁の厚さは約 15 cm であった．壁の材質はコンクリートの構造壁であり，ドアの素材は木が中心で一部に鉄が使われている．監視装置が設置されている場所は部屋内の壁面から約 260 cm 離れた場所にある．

この予備実験では，部屋のドアは閉め切った状態で，移動ロボットを模した Raspberry Pi を用い，各観測地点において監視装置の RSSI の値を計測する．本稿では簡単の

© 2019 Information Processing Society of Japan

表 1 各観測地点における RSSI の平均値
Table 1 Average value of RSSI at each observation point.

point	RSSI (dBm)	point	RSSI (dBm)	point	RSSI (dBm)
1-10	-76.0	2-10	-74.0	3-10	-72.5
1-9	-75.5	2-9	-75.0	3-9	-74.0
1-8	-71.0	2-8	-72.0	3-8	-79.0
1-7	-73.5	2-7	-78.5	3-7	-80.5
1-6	-77.0	2-6	-80.0	3-6	-79.5
1-5	-71.0	2-5	-80.0	3-5	-75.5
1-4	-68.0	2-4	-79.0	3-4	-73.5
1-3	-71.0	2-3	-80.0	3-3	-69.0
1-2	-73.5	2-2	-75.0	3-2	-79.0
1-1	-73.0	2-1	-71.0	3-1	-71.5

表 2 各観測地点における通信帯域（平均値）
Table 2 Communication bandwidth at each observation point (Average value).

point	Mbps	point	Mbps	point	Mbps
1-10	6.07	2-10	5.24	3-10	7.66
1-9	5.85	2-9	6.34	3-9	6.21
1-8	1.54	2-8	5.67	3-8	0.59
1-7	1.79	2-7	0.64	3-7	0.07
1-6	1.20	2-6	1.57	3-6	0.90
1-5	8.23	2-5	0.26	3-5	1.88
1-4	8.07	2-4	0.93	3-4	2.53
1-3	7.42	2-3	1.06	3-3	7.82
1-2	6.57	2-2	1.82	3-2	0.80
1-1	6.24	2-1	6.00	3-1	6.85

ため，移動ロボットの姿勢は，つねに廊下の長手方向を向くものとする．

RSSI と通信帯域は，各観測地点で計 3 回取得した．これらの計測した結果から平均値を割り出した．各観測地点での RSSI を**表 1** に，通信帯域を**表 2** に示す．実際，縦約 270 cm，横約 90 cm の間でも RSSI 値の違いが見られた．通信帯域の測定には iperf [15] を用いた．iperf の計測方法は TCP であり，ウインドウサイズは 85.3 KByte であった．iperf の計測パラメータとして，読み書きのバッファサイズ（-l オプション）は初期値の 8 KByte であり，データを送る秒数（-t オプション）は初期値の 10 秒である．

この予備実験で，監視装置に近い観測地点で RSSI 値が良好であるとは限らないことや，同じ観測地点でも数分後には RSSI 値が増減していることが分かった．よって，時間や状況に応じてロボットを移動させる必要性が確認された．

電波強度と通信スループットは相関するものの，調査範囲では同じ RSSI でも通信速度の大きなばらつきがある．たとえば，比較的強度の強い −71 dBm でおおむね 6〜8 Mbps が得られるものの，1 カ所だけ 1.54 Mbps しか得られない地点がある．

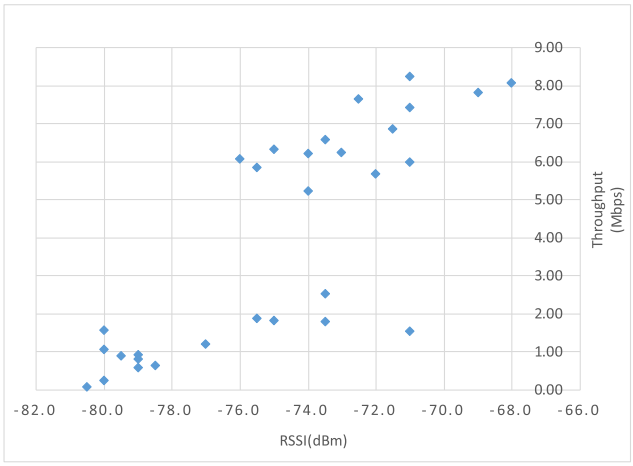


図 5 RSSI と通信帯域の散布図
Fig. 5 A scatter diagram of RSSI and communication bandwidth.

IBSJapan 社の Web ページ [16] によれば，パケットを信頼できる最低の RSSI 値は −70 dBm であるとしている．我々の予備実験でも RSSI 値が −70 dBm を超えていれば，確実に 7 Mbps 以上のスループットが得られることを確認している．監視装置で収集したデータ量は，メディアコンバータを監視対象とした先行研究 [3] の監視システムの場合，1 回の監視で 13 Kbyte であり，1 日で約 7.2 Mbyte，1 カ月で約 220 Mbyte である．仮に，1 日ごとに移動ロボットが巡回する設定であった場合には，約 10 秒程度の停止時間を確保できればデータの交換が完了する．

RSSI と通信帯域の関係を**図 5** に散布図として示す．本稿の実験環境では，RSSI の最大値は −68 dBm で，平均値は −74.93 dBm である．そのため，本稿において移動ロボットは，−70 dBm を満たす地点で通信することを目標とする．

4. 提案手法

前節の予備実験の結果をふまえ，移動ロボットと監視装置間の通信が円滑に行われる位置にロボットを移動させる制御方式を提案する．監視装置とロボットは無線アドホック通信を行うため，RSSI を用いて通信状況の良い位置を探索することにする．具体的には，SLAM のウェイポイントに移動してからその前後左右に移動して RSSI を計測する．本来，通信状況が良い位置を全探索することが望ましいが，探索に多くの時間を要するため，監視システムとして動作させる場合には非現実的である．移動ロボットによる監視装置との通信位置の探索手順を**図 6** に示す．

移動ロボットは，先行研究 [5] で実現した方法により，SLAM を利用して環境地図を作成し，監視装置の近傍の

© 2019 Information Processing Society of Japan

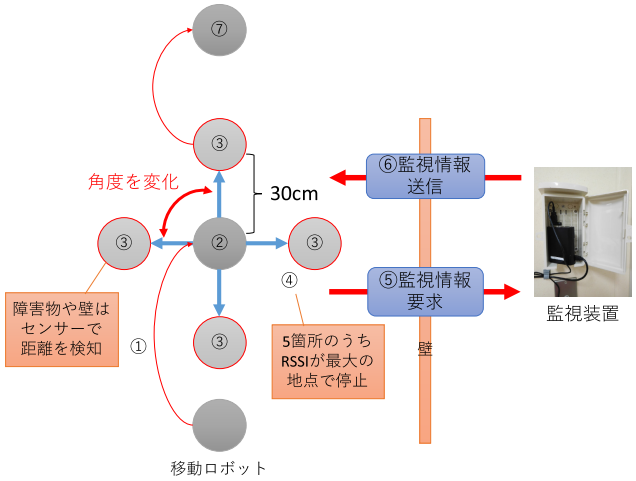


図 6 移動ロボットの通信位置の探索手順

Fig. 6 Communication procedure between mobile robot and monitoring device.

任意の場所をウェイポイントの巡回地点として設定し，指示どおり移動できるものとする．手順は以下のようになる（図中の番号は以下の番号に一致）．

① 移動ロボットは，ウェイポイントにより指定位置に移動．
② 移動ロボットは指定位置で停止し，監視装置の MAC アドレス情報をもとに RSSI 値を取得．
③ 移動ロボットは監視装置との RSSI 値を前後左右で取得．
④ 5 カ所で RSSI 値が最大となる位置へ再度移動し停止．
⑤ 移動ロボットから監視装置へ監視情報の送信を要求．
⑥ 監視装置から移動ロボットへ監視情報を送信．
⑦ 移動ロボットは受信完了を確認し，次の巡回地点へ移動．

ウェイポイントのために指定した任意の巡回地点を中心とし，その前後左右の約 30 cm を探索の範囲とする．約 30 cm と規定した点は，予備実験と同様，移動ロボットの移動範囲である廊下の幅半分を 3 等分したものを利用しているためである．前後左右の探索時に，壁が隣接している場合にはレーザレンジファインダにより衝突検出を行う．

5. ロボットの移動制御を考慮した監視システムの実装

本章では，前章で述べた提案手法に基づき，具体的な実装方法について述べる．

5.1 移動ロボットを利用した監視システムの概要

監視システムの概要を図 7 に示す．システムは，2.2 節で示したシステムの構成と同様に，監視装置，移動ロボット，サーバ，表示端末，制御端末で構成する．本稿では，先行研究と同様にロボットフレームワークとして ROS を採用する．

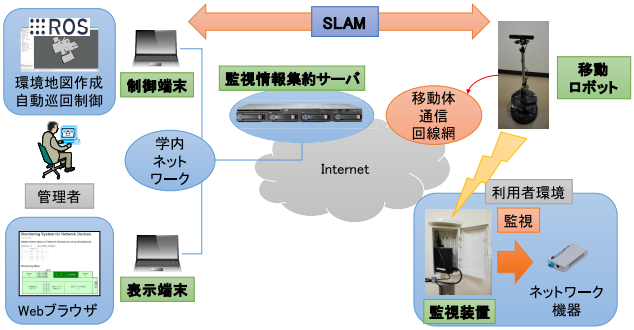


図 7 監視システムの構成概要

Fig. 7 A monitoring system architecture based on our method.

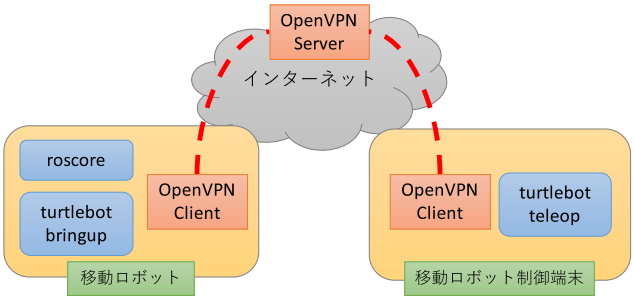


図 8 移動ロボットと制御端末の関係図

Fig. 8 Connection between a mobile robot and a control terminal in ROS framework.

監視システムの動作は，

1. 環境地図の作成
2. ウェイポイントの移動方法
3. 上下左右の RSSI 値を計測
4. 最良の RSSI 値の位置に移動
5. 監視装置から移動ロボットへのデータ転送
6. 移動ロボットからサーバへのデータ転送

の順で動作する．以下の節において，順に説明する．

5.2 環境地図の作成方法

SLAM には，現在様々な手法が考案，研究されている．ROS においてもいくつかの SLAM が実装されているが，本稿では ROS に標準で実装されている navigation パッケージの gmapping [17] を利用する．gmapping は，Grisetti らのアルゴリズム [18] を利用しており，グリッドベースの FastSLAM2.0 に該当する．ROS における gmapping により SLAM を実施する手順は以下のとおりである．

1. 移動ロボットを起動し，ゲームパッドで遠隔操作が可能な状態にする．このときの ROS における関係を図 8 に示す．
2. 巡回スタート地点に移動ロボットを設置し，移動ロボットに接続したレーザレンジファインダで周辺探索が可能となっていることを制御端末で確認する．
3. 移動ロボットを遠隔操作することによりオドメトリとセンサ情報など，環境地図作成のもとになるデータを

© 2019 Information Processing Society of Japan

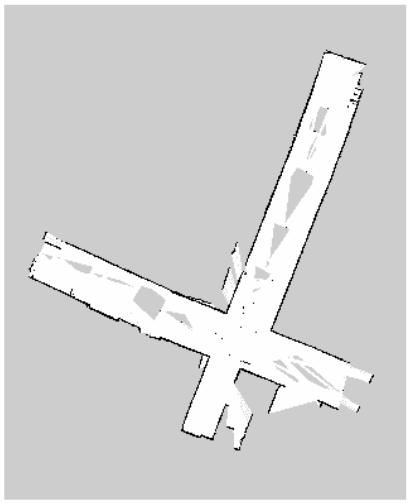


図 9 gmapping により作成した環境地図
Fig. 9 An example of an environmental map created by gmapping.

収集し，rosbag [19] で記録する．操作端末の GUI 画面を確認しながら操作する．

4. 収集したデータから，環境地図を作成する．

上記の手順により作成した本学センタ 2F のフロア地図を図 **9** に示す．

5.3 ウェイポイントにおける巡回地点の指定方法と移動ロボットの探査移動方法の実装

ウェイポイントの巡回地点は，前節で作成した環境地図や監視装置の位置などをもとに，手動操作でネットワーク管理者がウェイポイントを決定する．このウェイポイントの決定方法としては，RSSI の測定を行い決定する方法も考えられるが，この測定などの作業自体が管理者に負担になる．そこで，環境地図や監視装置の位置などからウェイポイントを決定することで，適切なウェイポイントの決定を行うための手間を省いている．

位置が決まると図 **10** のようにその地点の x 座標，y 座標が画面上で確認できる．これを巡回プログラムに組み込む．

ROS でのウェイポイントの実装は actionlib [20] を使用する．actionlib は Client と Server に分けて実装可能だが，本稿では簡単のため，1 つのプログラムで実装する．実装には Python を用いた．また，移動ロボットの RSSI 値探査のために，ROS で前後左右に移動する命令を記述した．移動ロボットの移動量は，3 章の予備実験で行った観測地点の単位である約 30 cm の範囲となるよう調整した．また，ウェイポイントの実装は文献 [10] を参考に実装した．前後左右のロボットの移動制御については文献 [21] のオドメトリを使ったプログラム，odom_out_and_back.py を参考に実装した．

移動ロボットが監視装置と通信するための最適な場所で

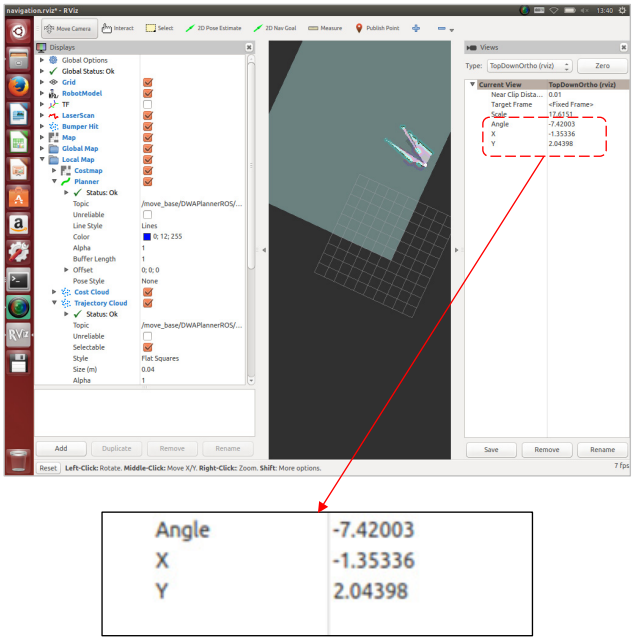


図 10 巡回地点の確認の例
Fig. 10 An example of checking a traveling point.

停止するために，移動ロボットの無線 LAN インタフェースでアドホックネットワークを構成した監視装置の RSSI 値を収集する．収集した RSSI 値は制御端末で受信する．この通信にも MQTT を利用する．監視装置の特定は，移動ロボットと監視装置間で構成するアドホックネットワーク上で確認可能な監視装置の MAC アドレスを用いる．あらかじめ移動ロボット内に MAC アドレスと監視装置のホスト名の対応表を作成し，随時対応を確認する．

監視装置の特定は，次のような手順で行われる．各監視装置にはウェイポイントが決められており，移動ロボットはウェイポイントに到達したときに，そのウェイポイントに対応する監視装置の MAC アドレスを，MAC アドレスと監視装置のホスト名の対応表から取得する．よって，MAC アドレスとホスト名の対応表が大きくなったとしても，表の探索に必要とする時間は表の走査を 1 回行えばよいので，運用上大きな問題になることはない．

5.4 監視データの通信方式

監視装置と移動ロボット間，移動ロボットとサーバ間の監視情報のための通信は，先行研究 [3], [4], [5] と同様に MQTT（Message Queue Telemetry Transport）[22] を利用する．MQTT は通信プロトコルの 1 つである．発生したデータを中継装置（Broker）が転送することでデータの利用者に届ける方式で，Broker は多段階構成でもよい．Broker がデータの蓄積も行うので，通信状況が不安定な場合でも通信可能になるまで待って通信を行うため，問題なく使用できる．MQTT は，Publish/Subscribe モデル（出版購読モデル）を採用しており，プロトコルヘッダが小さいという特徴がある．MQTT の実装には，参照実

© 2019 Information Processing Society of Japan

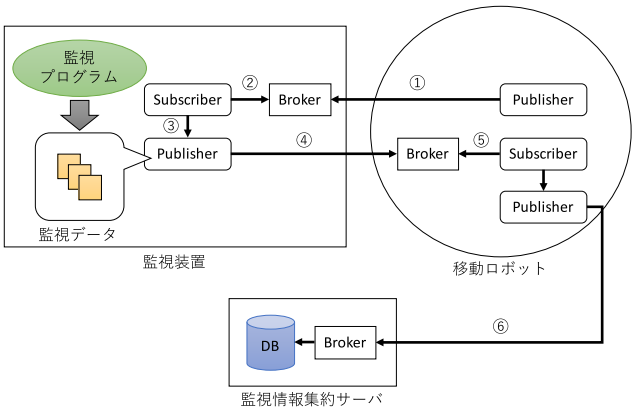


図 11 監視データの通信方式
Fig. 11 Communication method of monitoring data.

装として利用されているオープンソースソフトウェアの Mosquitto [23] を採用する．

MQTT は，データを送出する Publisher，データを受信する Subscriber，Publisher と Subscriber の間を取り持つ中継の役割を担う Broker で構成される．Publisher は事前にデータを必要とする配信先を知る必要がなく，自分の範囲内の Broker にデータを送信するだけでよい．

図 11 に監視データの通信方式の概要を示す．本システムの各機器の役割は，監視装置は Publisher と Broker を兼務する．移動ロボットは Broker，サーバは Subscriber である．通常 Publisher から送出されたデータはいったん Broker に蓄積される．しかし，Broker の役割を担うロボットがいつ監視装置に近接してくるかが特定できないため，監視装置と移動ロボットにそれぞれ Broker の役割を持たせ，移動ロボットを起点として監視装置からのデータを受信する方式とした．サーバは，移動ロボット内のデータを購読することにより監視データを取得する．

監視装置と移動ロボット間の通信は無線 LAN により，事前にアドホックネットワークを構成する．移動ロボットは，サーバと通信可能となった段階で，データの送受信を行う．監視情報は，WebSocket で直接リアルタイムに管理者の操作端末に送信する．移動ロボットとサーバの間の通信は移動体通信回線を用い，このネットワーク上で MQTT を利用する．移動ロボットと制御端末間，移動ロボットとサーバ間の通信は，移動体通信回線のインターネット接続サービスを用い，セキュリティを考慮し OpenVPN [24] を用いて接続する．

監視装置，移動ロボット，サーバ間での監視情報の通信は図 11 のようになる．以下に具体的な手順を示す（図中の番号は以下の番号に一致）．

① 移動ロボットが監視装置に監視情報の送信を指示する．
② 監視装置は，内部の Broker を通じ，常時待機中の Subscriber で移動ロボットの指示を受信する．
③ 監視装置内で指示を受けた Subscriber が Publisher を起動する．
④ 監視装置内の Publisher が蓄積された監視情報を移動ロボット内の Broker へ送信する．
⑤ 移動ロボット内で待機待ち受け状態にある Subscriber が，Broker 内の監視情報を受信し，Publisher へ指示を送る．
⑥ 移動ロボットの Publisher は，サーバ内の Broker へ監視情報を送信する．監視情報はサーバ内のデータベースに格納する．

この通信手順は，RSSI 計測に基づいて通信に適していると思われる位置に移動が完了してから行われる．先行研究 [4] においても同様の手順を行っているが，先行研究 [4] で手管理者が手動で行っている①は，本稿では自動で行っている．自動化は Python のスクリプトで実装する．Python のモジュールである Paho-mqtt [25] を用いる．

本稿の提案手法では，移動ロボットと監視装置の間の監視情報の送受信は MQTT により行われる．よって，本稿の提案手法における通信の信頼性の保証は，MQTT の機能を利用しており，その信頼性も同程度となる．また，通信不良状態の場合，監視情報の送受信が行われず，監視情報が監視装置に保存され，通信状態が良好になると送受信が行われる．

6. 実験

本章では，前章で述べた監視システムを用い，本学で運用しているメディアコンバータを監視対象とした実験について述べる．

ここでは，予備実験と同様にメディアコンバータの監視情報を収集する実験を行う．提案手法を採用した場合と，採用しなかった場合の状態を比較する．実験場所は本学センタ 2F のシステム管理室と大判プリンタ室の 2 カ所の監視装置設置箇所を用いた．システム管理室には，監視装置 1，大判プリンタ室には監視装置 2 を設置している．監視装置 1 は予備実験で利用した環境であり，監視装置 2 は廊下との間の壁から約 500 cm 離れた場所にあり，床からの監視装置 2 の無線 LAN インタフェースまでの高さは，監視装置 1 と同様に約 60 cm である．監視装置 2 のドアは鉄製で，ドアの一部に透明なガラスが入っており，部屋の内部が廊下から確認できる．**図 12** に平面図を示す．

各監視装置には，あらかじめ 1 日分の監視データ（7.2 Mbyte）を蓄積する．1 つは，提案手法を採用してデータを取得する（条件 A）．もう 1 つは，提案手法から RSSI の探索手順をはずして移動ロボットを停止させ，データを取得する（条件 B）．各地点におけるデータ収集にかかる時間を計測した．比較の実験は各 30 回実施した．実験では，RSSI，通信時間，移動ロボットの探索時間を計測し，平均値を求めた．**表 3** に比較実験の結果を示す．

実験結果より，提案手法を用いた条件 A は，RSSI 値が

© 2019 Information Processing Society of Japan

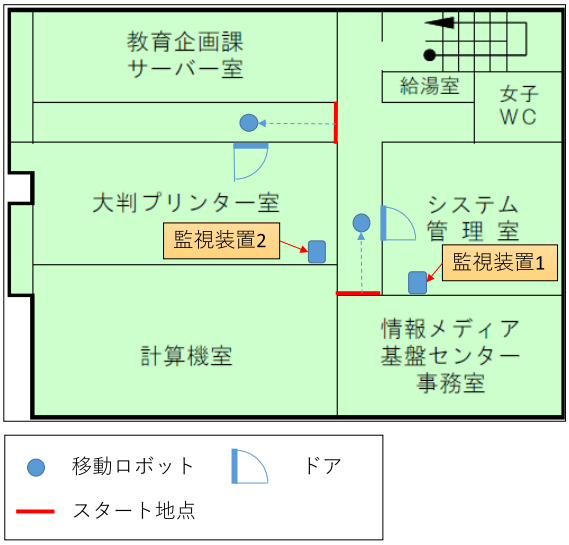


図 12 実験に使用した建物の平面図
Fig. 12 A plan view of building used for experiment.

表 3 提案手法と従来手法の比較
Table 3 Comparison between proposed method and previous method.

手法	監視装置 1				
	RSSI [dBm]	RSSI 標準偏差	通信時間 [s]	通信時間 標準偏差	探索時間 [s]
条件A	-62.9	(2.4)	6.0	(0.7)	38.0
条件B	-66.2	(1.8)	6.5	(0.9)	9.7

手法	監視装置2				
	RSSI [dBm]	RSSI 標準偏差	通信時間 [s]	通信時間 標準偏差	探索時間 [s]
条件A	-64.5	(2.2)	6.1	(1.0)	36.5
条件B	-67.9	(1.3)	7.5	(1.5)	8.1

良好な場所でデータの転送が行われていることを示している．監視装置 2 は，設置箇所の扉の一部にガラスを用いており，このことが実験結果の RSSI 値に現れていると考えられる．本実験において，監視情報の送受信が失敗することはなかった．よって，提案手法は，監視情報の収集時間のウェイポイントで定めていた位置での電波強度が変化する場合にも，電波強度の最も強い位置を見つけ，監視情報を収集可能であることが分かった．提案手法の目的は，電波状況が安定していない場合であっても，監視装置からの監視情報の収集を安定的に行うために，電波強度が強い位置を探索し，監視情報の収集を行うことであり，この目的は達成できたといえる．

また，提案手法が RSSI の向上や通信時間の短縮に有効であるかを t 検定により調べた．RSSI および通信時間いずれも，監視装置 1 と監視装置 2 において，条件 A と条件 B に有意水準 5%で有意差があった．よって，提案手法が RSSI の向上と通信時間の短縮に有効であるといえる．

しかし，問題もある．通信を開始する地点を決定する時間，つまり，探索時間は提案手法で大きくなっている．探索時間も合わせた監視情報の収集全体で必要となる時間は増加している．よって，監視情報の収集時間を短くするためには，探索時間を短くするなどの改善が必要である．

7. 考察

本章では本稿における考察を述べる．

7.1 移動ロボットの探索の移動量の決定方法

提案手法では，移動ロボットが監視装置と通信するために，停止位置と前後左右に位置を移動し最適な通信箇所を探索する．本稿では，移動量を移動ロボットの移動範囲である廊下の幅半分を 3 等分した約 30 cm と設定した．この移動量は，現状では固定化されているが，状況に応じて調整する方法が考えられる．これには，環境地図を作成する際に RSSI のデータを事前に収集し，機械学習の手法を活用して移動量を自動調整する方法が考えられる．

7.2 RSSI の探索方法の改善

本稿の実験結果で移動ロボットは，提案方法により −70 dBm 以上の電波強度の位置を見つけることができた．しかし，提案手法では，−70 dBm 以上の電波強度の位置を見つけることができなかったとしても，最も電波強度が強い位置での通信を可能とする．また，従来手法と比べて，電波強度が強い位置での監視情報の収集が可能となった．

一方，実験結果の探索時間，つまり，移動ロボットが通信する位置を決定し移動するまでの時間は，従来手法に比べて大幅に増加している．これは，5 カ所の電波強度を測定しているためである．この時間を短縮する方法が提案手法に必要となる．この方法の 1 つとして，−70 dBm の位置を見つけた時点で探索を終了し，その地点で監視情報の収集を行う方法が考えられる．この方法を行った場合，本稿の実験結果では，30 回の実験のうち，27 回で 1 カ所目の探索で −70 dBm 以上の電波強度の位置を見つけることができ，探索時間の大幅な削減が可能となる．また，残り 3 回では 2 カ所目の電波強度の探索で，−70 dBm 以上の電波強度の位置を見つけることができ，2 カ所目の探索に 4 秒を必要とした．よって，−70 dBm を利用して探索を打ち切る方法が有効である可能性がある．今後，様々な環境での実験を行い，この方法の有効性を調べる必要がある．

7.3 サービスの実現性とコスト比較

先行研究である文献 [3] の各監視装置に移動体通信回線を用いる方法と本稿の提案手法のコストを比較する．移動体通信回線として，監視装置で用いる回線は SORACOM Air [26] で算出した．移動ロボットの SIM カードは，OCN モバイル ONE [27] で算出した．**表 4** に結果を示す．単純なコスト比較は難しいが，初期費用を含めて検討した場合，

© 2019 Information Processing Society of Japan

表 4 監視装置に移動体通信回線を用いる場合と本稿の提案方式を用いた場合のコスト比較

Table 4 Comparison of cost between the proposed method and previous method.

監視装置に移動体 通信回線を利用する場合	本稿の提案手法を用いる場合
※SORACOM Airを利用した場合 初期費用 USBドングル1台あたり約5,000円 **ランニングコスト** **（カッコ内はUSBドングル費用）** 10枚で約14,000円（50,000円） 30枚で約40,000円（150,000円） 50枚で約67,000円（250,000円）	初期費用 移動ロボット1台約200,000円 **ランニングコスト** SIMカード 1枚約1,000円（月）

※注意
・ランニングコストは，SORACOM Air for セルラー基本料金にSIMカードの初期費用が含まれています。（利用日数30日）
・SIMカードはデータ通信のみです。
・速度クラスはs1.minimum(32Kbps）です。
・データ量は日中が15600KB,夜間が3120KBです。

移動ロボットが 30 台の監視装置を監視できれば，本稿の提案手法である移動ロボットによる監視情報の収集の優位性が主張できるものと考えられる．

しかし，この比較には注意が必要である．移動ロボットを長時間動作させる場合，耐久性や連続稼働可能時間を考慮してロボットの機種選定や運用台数を考える必要がある．また，移動ロボットのバッテリを充電する時間を考慮する必要がある．よって，現実的には複数の移動ロボットを交互に利用して監視を行う必要があると考えられる．

たとえば，移動ロボットを複数台運用し，1 つのロボットが充電をしている間に別のロボットを稼動させ，監視を継続する方法が考えられる．本稿の提案手法を実際に利用する場合には，必要となる監視情報の収集の頻度や，ネットワーク障害の検知速度などを事前に検討する必要がある．監視システムとして実装する際には，事前調査が重要となる．

本稿では，移動体通信回線を利用しているが，移動ロボットが移動している際に，通信が弱くなってしまう電波の谷の問題にも注意しておくべきである．幸い，実験環境では遭遇していないが，このような場合には，通信が可能な箇所にロボットを移動させる方法を検討している．

本稿では，1 日分のデータを用いて実験を行ったが，監視スケジュールとして，5 分ごとに巡回しても同様の結果が得られるものと考える．

7.4 通信に最適な箇所の探索の必要性

本稿では，移動ロボットが前後左右と中心の 5 カ所を移動して，各箇所の RSSI 値を測定し，最も良い RSSI 値の箇所をデータ収集の場所として選択している．一方で，RSSI 値の標準偏差を用いて振れ幅を 1 つの指標とし，安定性を確認可能である．本稿では，RSSI は通信速度を向上させる目的で利用しており，実験の結果，通信に十分な品質を確保できたと判断したため，標準偏差を利用してまで正確なデータ収集の場所を探索する必要はないと考えている．

8. 課題

本章では本稿における課題について述べる．

8.1 移動ロボットが他の動作を兼務するメリット

現実的な運用では，ネットワーク機器の監視目的に限定して，移動ロボットを走行させることはコスト高である．そこで，たとえば学内のセキュリティの一環として構内の監視を行う方法が考えられる．この方法はプライバシを考慮する必要があるが，廊下などにいる人物の人数を把握することや，無線 LAN アクセスポイントの品質確認，不正なアクセスポイントの探索などの他のサービスとの連動を行う方法が考えられる．今後これらのサービスとの連動を考えていきたい．

8.2 RSSI によるウェイポイントの実現性

現状ではレーザレンジファインダを用いて，あらかじめ環境地図を作成し，ウェイポイントにより監視装置を設置している近傍まで移動する方法をとっている．本稿で採用した RSSI による手法を応用し，電波強度が強い場所をウェイポイントとして設定し巡回する方法が考えられる．本稿の提案手法にあるとおり，毎回ウェイポイントにより手動で最初に指定した地点にいったん訪れてから RSSI 周辺探索を行うのは効率が悪い．そこで，前回の巡回で RSSI が最適であった位置を RSSI 探索の初期位置とする方法が考えられる．

特定の箇所をウェイポイントの候補として，適切な場所を選ぶのではなく，通信範囲内においてウェイポイントとして RSSI の最もよい地点を選択する方法も今後の課題である．特定の箇所をウェイポイントの候補として選ぶ場合でも，その選び方や選ぶ個数も今後の課題である．また，監視情報の取得を定期的に行う場合には，1 回あたりの監視情報の送受信量が少ないと考えられる．この場合，送受信に支障のない程度の RSSI の地点で通信を行えばよく，最大の RSSI の地点を探す必要はないものと考えられる．移動ロボットの巡回方法に応じて通信位置の条件を決定することも今後の課題である．

8.3 提案手法の有効性の検証

本稿では，提案手法の有効性を実験によって示した．実験は，大学内の 1 つの建物で行ったが，この提案手法を広く利用するためには，今後，様々な環境で有効であることを検証する必要がある．

9. 関連研究

本稿は，通信途絶時に通信拠点を移動して情報収集し，通信可能な送信先に運ぶ，Data Mule [28] やメッセージフェ

© 2019 Information Processing Society of Japan

リー [29] の研究に位置付けられる．本稿は，ウェイポイントであらかじめ経路が決定しており，メッセージフェリーを行う移動体として移動ロボットを用いている．

文献 [30] は，本稿と同様に，移動ロボットを SLAM によりウェイポイントで走行させ，環境情報の収集を行っている．しかし，当該研究は，巡回範囲がデータセンタ内であり，限定的な利用にとどまっている．

本稿は，監視装置が環境情報を収集するセンサであるととらえると，ワイヤレスセンサネットワーク研究の一部と考えることができる．ワイヤレスセンサネットワーク研究において，移動ロボットが活用されている研究例は数多く存在する．その中で移動ロボットは，ワイヤレスセンサネットワークを構築，または補助する目的で利用されている．鈴木ら [31] は，移動ロボットを用いてワイヤレスセンサネットワークを構築し，被災地情報を収集するシステムを提案している．当該研究では，センサノード間の RSSI 値を計測しながらノードを配置する．

移動ロボットによる情報収集は，サーバルームやデータセンタの環境情報収集に利用する方法が試みられている．文献 [32] のように NFC タグを床に埋め込み，移動ロボットを巡回させる方法があるが，あらかじめ準備する必要があり，本稿が対象とするような広い構内を範囲とする用途には大量のセンサが必要で，コストがかかる．

IBM は，データセンタでの移動ロボット利用の研究 [33], [34] を行っている．データセンタでは，電力消費量の軽減が課題となっており，移動ロボットにより温度や湿度などの情報を巡回して取得する．これらの研究は巡回範囲がデータセンタ内であり，限定的な利用にとどまっている．

移動ロボットに RSSI を利用した研究 [35], [36] がある．しかし，これらの研究は RSSI を位置推定の指標として用いており，本稿のようなワイヤレスセンサとの通信が良好となる箇所を探索する手法とは異なる．

10. おわりに

本稿では，我々が提案する移動ロボットによる情報収集手法の問題点をあげるとともに，移動ロボットと監視装置の間の通信効率が良い地点を探索し，監視情報の収集を行うロボットの移動方式を改善する手法を提案した．提案手法の有効性を大学内での実験により確認した．

監視スケジュールは，移動ロボットの仕様を考慮する必要があるが，提案手法によりネットワーク機器の監視のための人手が不要となり，ネットワーク監視におけるサービスレベルは向上するものと考えられる．今後は課題解決を行い，研究を進めていきたい．

謝辞 本稿の一部は，JSPS 科研費 17H00371 の助成によるものである．

参考文献

[1] 小川康一，吉浦紀晃：埼玉大学における光ファイバ直収型ネットワークの運用経験について，情報処理学会研究報告インターネットと運用技術（IOT），Vol.2015-IOT-30, No.10, pp.1–8 (2015).

[2] Coexistence between Version 1, Version 2, and Version 3 of the Internet-standard Network Management Framework, The Internet Society (2003).

[3] 小川康一，吉浦紀晃：小型コンピュータと画像処理技術を活用したネットワーク機器監視手法の提案と実装，情報処理学会論文誌，Vol.59, No.3, pp.1026–1037 (2018).

[4] 小川康一，吉浦紀晃：移動ロボットと小型コンピュータを活用したネットワーク機器監視手法，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム（DICOMO），pp.1354–1361 (2017).

[5] 小川康一，吉浦紀晃：移動ロボットによる環境地図を用いたネットワーク機器監視情報の自動収集手法，情報処理学会研究報告，インターネットと運用技術，Vol.2017-IOT-39, No.1, pp.1–7 (2017).

[6] iRobot 社ホームページ（オンライン），入手先 ⟨https://www.irobot-jp.com/⟩（参照 2018-06-19）.

[7] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B.P., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A.Y.: ROS: An open-source Robot Operating System, *ICRA Workshop on Open Source Software* (2009).

[8] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: *Probabilistc Robotics*, The MIT Press (2005), 上田隆一（訳）：確率ロボティクス，毎日コミュニケーションズ (2007).

[9] 友納正裕：SLAM 入門，オーム社 (2017).

[10] Gerkey, B., Smart, W. and Quigley, M.: *Programming Robots with ROS*, O'Reilly Media (2015).

[11] Asus Xtion Pro Live（オンライン），入手先 ⟨https://www.asus.com/jp/3D-Sensor/Xtion_PRO_LIVE/⟩（参照 2018-06-19）.

[12] 北陽電機株式会社ホームページ URG-04LX-UG01（オンライン），入手先 ⟨https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=17⟩（参照 2018-06-19）.

[13] 鳴海宏理，藤井雅弘，渡辺　裕：複数の受信強度観測に基づく人の存在検知システムの開発，第 73 回全国大会講演論文集，pp.269–270 (2011).

[14] 梅谷智弘，澤田祐志，田村祐一：無線 LAN 信号強度を利用した屋内環境における状態変化検出の検討，システム制御情報学会論文誌，Vol.28, No.4, pp.140–146 (2015).

[15] iperf (online), available from ⟨https://iperf.fr/⟩ (accessed 2018-06-19).

[16] IBS Japan ホームページ，RSSI について（オンライン），入手先 ⟨http://www.ibsjapan.co.jp/tech/details/metageek-solution/understanding-rssi.html⟩（参照 2018-06-19）.

[17] gmapping (online), available from ⟨http://wiki.ros.org/gmapping⟩ (accessed 2018-06-19).

[18] Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W.: Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters, *IEEE Trans. Robotics*, Vol.23, No.1, pp.34–46 (2007).

[19] rosbag（オンライン），入手先 ⟨http://wiki.ros.org/ja/rosbag⟩（参照 2018-06-19）.

[20] actionlib (online), available from ⟨http://wiki.ros.org/ja/actionlib/⟩ (accessed 2018-06-19).

[21] Goebel, R.P.: *ROS By Example INDIGO, Volume 1*, Lulu (2017).

[22] MQTT (online), available from ⟨http://mqtt.org/⟩ (accessed 2018-06-19).

[23] Mosquitto (online), available from ⟨https://mosquitto.

© 2019 Information Processing Society of Japan

org/⟩ (accessed 2018-06-19).
[24] OpenVPN: Open Source VPN (online), available from ⟨https://openvpn.net/⟩ (accessed 2018-06-19).
[25] Paho-mqtt (online), available from ⟨https://pypi.python.org/pypi/paho-mqtt⟩ (accessed 2018-06-19).
[26] SORACOM Air（オンライン），入手先 ⟨https://soracom.jp/services/air/⟩（参照 2018-06-19）.
[27] OCN モバイル ONE（オンライン），入手先 ⟨http://www.ntt.com/personal/services/mobile/one/data.html⟩（参照 2018-06-19）.
[28] Anastasi, G., Conti, M. and Di Francesco, M.: Data collection in sensor networks with data mules: An integrated simulation analysis, *IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp.1096–1102 (2008).
[29] Bhadauria, D. and Isler, V.: Data gathering tours for mobile robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3868–3873 (2009).
[30] Rosa, S., Russo, L.O. and Bona, B.: Towards a ROS-based autonomous cloud robotics platform for data center monitoring, *Proc. 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation* (*ETFA*), pp.1–8 (2014).
[31] 鈴木 剛，杉崎隆二，川端邦明，羽田靖史，戸辺義人：移動ロボットによる無線センサネットワークの構築と管理および環境情報の収集，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.4, pp.140–146 (2010).
[32] Choi, W., Park, K.W. and Park, K.H.: SCOUT: Data center monitoring system with multiple mobile robots, *The 7th International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management*, pp.150–155 (2011).
[33] Lenchner, J., Isci, C., Kephart, J., Mansley, C., Connell, J. and McIntosh, S.: Towards data center self-diagnosis using a mobile robot, *Proc. 8th International Conference on Autonomic Computing* (*ICAC*), pp.81–90 (2011).
[34] Nelson, J.C., Connell, J., Isci, C. and Lenchner, J.: Data center asset tracking using a mobile robot, *SIGMETRICS*, Harchol-Balter, M., Douceur, J.R. and Xu, J. (Eds.), pp.339–340, ACM (2013).
[35] Menegatti, E., Zanella, A., Zilli, S., Zorzi, F. and Pagello, E.: Range-only SLAM with a mobile robot and a wireless sensor networks, *International Conf. on Robotics and Automation* (*ICRA*), pp.1699–1705 (2009).
[36] Zhou, N., Zhao, X. and Tan, M.: RSSI-based mobile robot navigation in grid-pattern wireless sensor network, *Chinese Automation Congress* (*CAC*), pp.497–501 (2013).



小川 康一 （学生会員）

1974 年生．2014 年産業技術大学院大学産業技術研究科修了．情報システム学修士（専門職）．現在，埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程に在学中．2007 年より同大学情報メディア基盤センター勤務．基幹ネットワークの運用と研究に従事．電子情報通信学会，日本ソフトウェア科学会，日本ロボット学会，IEEE，ACM 各会員．



吉浦 紀晃 （正会員）

1968 年生．1991 年東京工業大学工学部情報工学科卒業．1997 年同大学大学院博士課程単位取得退学．博士（学術）．東京工業大学助手，群馬大学助教授を経て，現在，埼玉大学大学院理工学研究科教授．ソフトウェア検証やネットワーク運用技術の研究に従事．電子情報通信学会，社会情報学会各会員．

© 2019 Information Processing Society of Japan