

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：23201  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2015～2016  
課題番号：15K21390  
研究課題名(和文) 移動ロボットの遠隔制御エリア拡張を目的とするセンサノード配置箇所決定手法の開発

研究課題名(英文) Sensor Node Deployment Method for Expanding Communication Area by Utilizing Mobile Robot

研究代表者  
澤井 圭 (Sawai, Kei)  
富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：80624080  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動ロボットの遠隔操作範囲を拡張するための無線センサノード配置手法について検討を行い、実環境において提案手法の有効性について評価を行なった。評価実験では、スループットと電界強度を参照することで、無線センサノード配置箇所の決定、移動ロボットの移動による配置箇所変更を行うシステムについて検証を行なった。評価結果より、遠隔操作範囲拡張(ネットワーク構築範囲の拡張)性を確認することができた。また今後の課題では、配置箇所決定手法に用いるスループット計測に要する時間の短縮を検討する必要がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have been developing the sensor node deployment method for expanding communication area by utilizing mobile robot. Availability of proposed method in actual environment is confirmed by experimental results. Proposed method decides a position of sensor node by referring the value of throughput and RSSI between two sensor nodes. Moreover, this method can modify the sensor node position for maintaining communication quality between sensor nodes. Future task is to shorten throughput measurement time in deciding the position of sensor node.

研究分野：ネットワークロボティクス，情報通信工学

キーワード：遠隔操作 無線ネットワーク 移動ロボット スループット

1. 研究開始当初の背景

大規模震災が発生した際には、被害の予測が困難であることが報告されていた。そのため被災後の被害を最小限に抑えることを目的とした減災活動が注目され、被害状況の迅速かつ網羅的な把握が求められた。

情報収集は、レスキュー隊員による活動と共に、無人航空機などの飛行体を用いて行われる。しかし地下空間やプラント等の閉鎖空間では、上空からの情報収集が行えない。このような中、移動ロボットを用いた閉鎖空間における情報収集システムの検討が行われた。

移動ロボットは操作者により遠隔制御され、閉鎖空間内の情報を外部のレスキュー活動従事者へ提供する。遠隔制御は有線通信によって行われることが多く、通信品質の維持と共に移動ロボットへの電力供給が行える。一方で障害物に通信ケーブルが絡まり移動ロボットが制御不能になる事例や、物理的損傷により通信が断絶されるリスクがある。

無線通信による遠隔制御は、走破性能の低下とケーブルへの物理損傷を防止し、柔軟な探索活動を実施できる。課題は、通信距離に制限があることに加えて、障害物がある環境における通信品質の維持が難しいことが挙げられる。これらの課題に対し、複数の小型通信端末 SN (Sensor Node, 以下 SN) から構成される、無線センサネットワーク (Wireless Sensor Networks, 以下, WSN) を用いた移動ロボットの遠隔制御の検討が行われている。WSN は複数の SN が配置されたエリア内に簡易ネットワークを構築し、無線通信インフラやモニタリング機能を提供する。移動ロボットは移動経路状に SN を配置することで WSN を構築し、遠隔制御範囲の拡張や、通信品質維持への対応を行う。WSN を遠隔制御へ導入するためには、通信の要求仕様を決定し、SN の配置位置決定手法の開発が必要となる。

近年、移動ロボットは PC 制御によるものが多く、無線通信に TCP/IP に準拠したパケット通信が用いている。さらに遠隔制御では、移動ロボットが取得した動画像や各種センサ情報、そして制御コマンド等が送受信され、パケットの伝送量を考慮し送受信間隔管理が求められる。WSN 検討の多くは通信規格が IEEE802.15 (ZigBee) のため、パケット伝送量の確保が難しい。また WSN における SN 配置位置の決定には隣接 SN との距離や視認性、そして電界強度が用いられる。一方でパケット伝送量が多い無線通信において、隣接する SN との距離や視認性、そして電界強度を用いた計測では、パケットの伝送量や送受信間隔の管理が行えない。WSN を導入するには伝送速度を満たし、送受信間隔の管理が行える SN を用いる必要がある。そして、それら通信品質の評価を考慮した配置位置決定手法の開発が求められる。

本研究では移動ロボットの遠隔制御に求められる通信の要求仕様を明示し、パケット

伝送の通信速度と送受信間隔の計測が容易に行える無線 LAN (IEEE802.11 b, g, a, n) を WSN の通信規格へ採用し、無線通信中継機能を有する新たな SN の開発を行う。そして無線通信インフラ構築に際して求められる、SN の配置位置決定手法の設計を行い、開発した SN と移動ロボットへの実装評価により有効性の検証を行った。

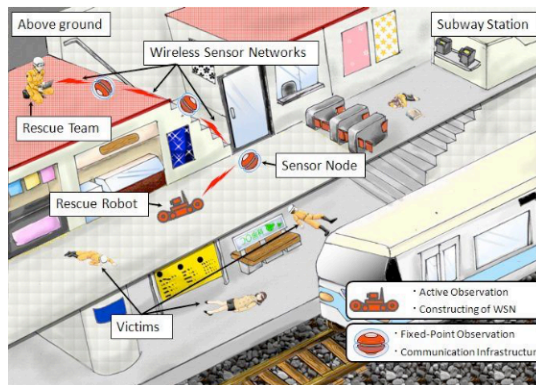


Fig. 1 SN を用いた移動ロボットの遠隔操作

2. 研究の目的

被災した閉鎖空間探索における移動ロボットの無線遠隔操作について検討が進んでいる。電波を用いた移動ロボット通信は距離に対する電界強度減衰と共に、障害物による通信品質低下が課題となり、SN 配置による通信距離の維持・拡張手法が提案されている。配置位置は、隣接 SN との視認性や電界強度参照によって決定する手法が多い。一方で通信規格には ZigBee 規格を採用しているものが多いため、TCP/IP に準拠した遠隔操作手法が一般的となっている移動ロボットへの導入が難しい。

本研究では実際に移動ロボットの遠隔操作を考慮した SN の設計・開発を行うと共に、RSSI, スループット、そしてパケット・ジッタを参照する SN の配置位置決定手法の開発を目的としている。

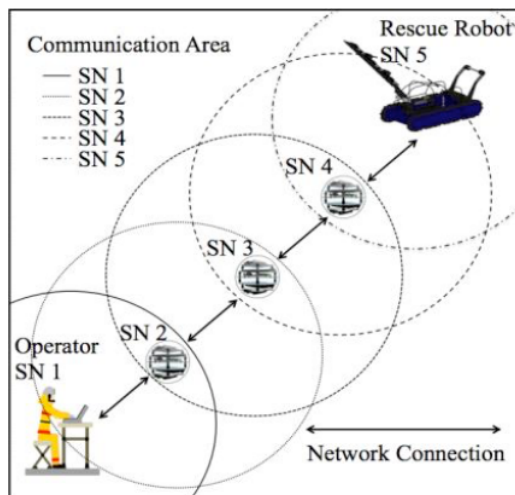


Fig. 2 SN 配置による通信経路の拡張

### 3. 研究の方法

本研究は、平成 27 年度に図 3 に示したような 2 つの無線 LAN モジュールを制御可能な SN の設計・開発を行った。また開発した SN のネットワーク構築性、及び遠隔操作性を評価するために移動ロボットによる SN 配置によるネットワーク構築実験を実環境下にて実施した。SN の設計では、移動ロボットによる携行・配置性についても検討した。

また平成 28 年度には提案する SN 配置位置決定手法について、開発した SN と移動ロボットを用いてネットワーク構築性、及び通信品質維持の観点にて有効性の確認を実環境下にて行った。

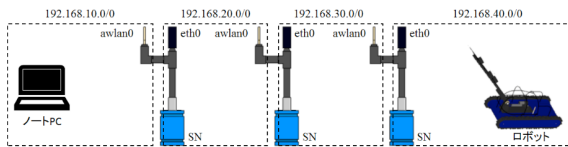


Fig. 3 移動ロボットの遠隔操作を考慮した 2 つの無線 LAN モジュールを制御可能な SN によって構成される無線ネットワーク

#### ■ 2 つの無線 LAN (IEEE802.11b, g) モジュールを制御可能な SN の開発

初年度は SN の要求仕様を基に、ハードウェア開発とネットワーク構築性能について評価を行う。平成 26 年度までに本研究では、移動ロボットの遠隔操作を考慮した SN の設計・開発に求められる仕様を明らかにしてきた(図 4)。SN の設計・開発は本仕様をもとに行なった。図 5 に、開発した SN を示す。

また開発した SN の通信性能、接続性等のネットワーク構築性は、実際にネットワーク構築を行い、移動ロボットの遠隔操作を行うことで評価を行った。評価結果では、実環境下においてネットワークの構築が可能であり、TCP/IP に準拠した移動ロボットの遠隔操作が行えることを確認した。

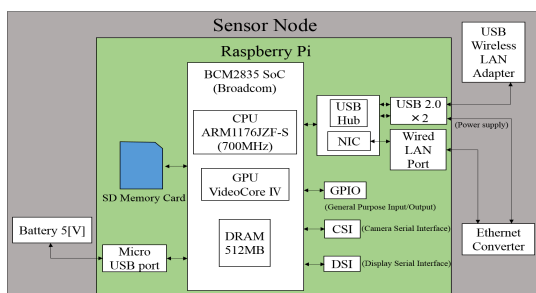


Fig. 4 設計・開発を行った SN の構成

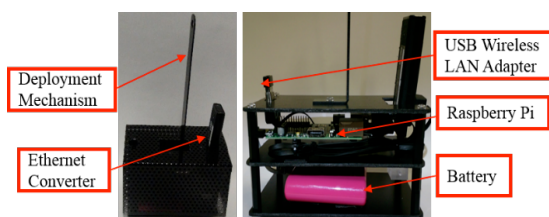


Fig. 5 開発した SN の外観

#### ■ SN の配置位置決定手法

提案する配置位置の決定手法は、操作者と移動ロボット間、各 SN 間の通信品質を随時計測する必要がある。そのため、通信経路への通信負荷を与えない手法として、移動ロボットが操作者へ送信する制御パケットの受信間隔を計測することで通信品質(スループット、ジッタ)を算出する方法を提案した。

制御パケットを用いたスループット算出では、パケットの遠隔操作者への返送は常に行われていることとし、先に到着したパケットと次に到着したパケットの時間差を算出することとした。スループットを  $T$  [bps], 送信パケットサイズを  $B$  [byte], パケット到着時間差を  $t$  [s] とすると、式(1)からスループットを算出できる。

$$T = 8B / t \quad (1)$$

ジッタは、操作者が移動ロボットから受信するパケットの到着時間間隔の揺らぎを計測することで算出を行う。 $i$  番目に受信したパケットの受信時刻を  $P_i$  とし、受信したパケットの総数を  $N$  とする。そして移動ロボットのパケット送信間隔を  $T_s$  とすることで、式(2)からジッタを算出できる。 $T_s$  を超えた際には罰則点を付与することとする。

$$P = \frac{\sum(T_s - (P_i - P_{i-1}))}{N} \quad (2)$$

#### ■ 配置位置決定手法の実装、及び実環境下での評価実験

平成 28 年度は、配置位置決定手法を SN と移動ロボットへ実装し、実環境下にてネットワークの構築性能について評価実験を行った。図 6 に、配置実験に使用する移動ロボットを示す。実験では移動ロボットを用いて SN を実際に配置し、ネットワーク構築を行う。

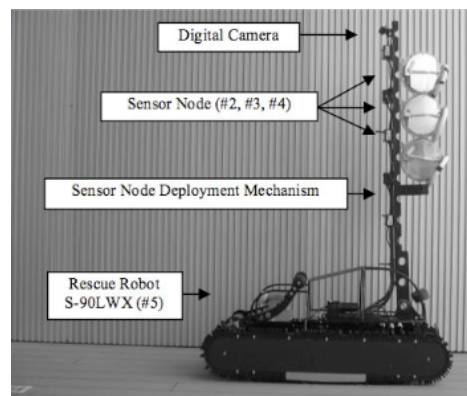


Fig. 6 SN 配置機構を備えた移動ロボット

評価実験では初年度に検討を行った通信品質計測手法を用いてスループット、及びジッタを算出することで SN 配置位置を決定する。SN 間の通信品質を保つことで、操作者と移動ロボット間の通信品質を維持出来ることを確認した。また本提案手法を用いた際

のネットワーク拡張機能を検証し、移動ロボットの遠隔操作範囲の拡張性について評価を行った。また構築したネットワークエリア内にて、動画像取得、各種センシング機能を用いた移動ロボットの遠隔操作実験を通じて、提案手法の実利性について議論を行った。

評価実験では、SN3 台とレスキューロボット1台用いて4 hopのマルチホップネットワークを構築し、SN配置によるネットワーク拡張実験を行った。実験場所は他の無線LAN環境が存在しない屋外130m直線通路にて実施した。また配置位置決定に用いるスループットの閾値を端末間10[Mbps]、End-End間1.0[Mbps]とした。1つ目のSNを0[m]地点に配置し、5[m]間隔で端末間、End-End間のスループット、及びジッタを計測した。

#### 4. 研究成果

実験結果を図7に示す。実験の結果から、提案手法を用いたSN配置による遠隔操作範囲の拡張、及びEnd-End間スループット値の維持が可能であることを確認することが出来た。設定した閾値を考慮したSN配置は、40m、60m、100m地点にて行った。そして移動ロボットの遠隔操作に必要な通信品質の閾値とした端末間10[Mbps]、End-End間1.0[Mbps]を、130m間の全てにおいて下回らなかった。ジッタにおいても全計測地点において、揺らぎは生じなかった。SN配置を行わなかった際には、40m地点にて閾値を下回った。本実験結果より提案手法を用いたSN配置位置決定がネットワーク拡張に有効であったことを確認した。

一方で、移動ロボットの計測地点間の移動時間に対して、スループットとジッタの計測時間が非常に多くなることが実際の被災地利用に際しての課題であることを確認した。

今後は、計測時間短縮を目的とした帯域非圧迫型通信品質計測手法について検討を行い、被災地利用を考慮したWSNを用いる移動ロボットの遠隔操作について研究を行う。

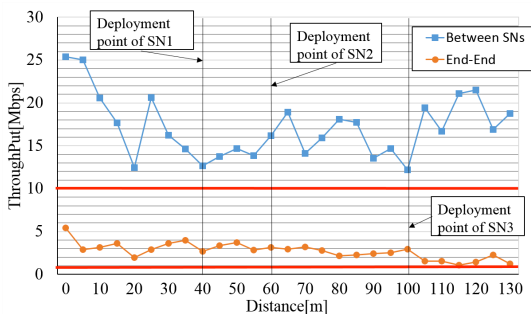


Fig. 7 計測したSN間スループット、End-End間スループット

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

[学会発表] (計 2 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤井 圭 (SAWAI Kei)

富山県立大学・工学部知能デザイン工学科・講師

研究者番号：80624080