

## 軍艦島全域センサネットワーク構築に向けた検討

岡田 隆三<sup>†</sup>      小寺 志保<sup>†</sup>      富岡 昭浩<sup>‡</sup>      倉田 成人<sup>‡†</sup>      濱本 卓司<sup>‡‡</sup>      猿渡 俊介<sup>‡</sup>  
<sup>†</sup> 静岡大学      <sup>‡</sup> 日本航空電子      <sup>‡†</sup> 筑波技術大学      <sup>‡‡</sup> 東京都市大学

### 1 はじめに

軍艦島は、長崎県にある無人島であり、現在も経年劣化による建物の複雑な崩壊現象が発生している。筆者らは、軍艦島において崩壊中の建物の映像や音声、加速度といったデータを収集することで、建築構造解析に貢献することを目指して軍艦島モニタリングプロジェクトを進めている [1-3]。本稿では、軍艦島モニタリングを実現するためのネットワークインフラである軍艦島センサネットワークについて述べる。

### 2 軍艦島におけるネットワークインフラ

図1に軍艦島内の基地局を設置している建物と、モニタリング対象の建物を示す。3号棟は島内で最も高い場所にあるため、軍艦島モニタリングの中心となる基地局を設置している。具体的には、200 W のソーラーパネル2台、本島にある軍艦島資料館にセンサデータを伝送する小電力無線通信システム、カメラ3台を設置している。カメラ3台は軍艦島全域を捉えており、建物の大きな劣化を記録・検出するのに用いている。小電力無線通信システムとしては、仕様周波数帯が 25 GHz、上り下り最大同時通信が 56 Mbps、通信距離が最大約 10 km である日立国際電気の SINELINK 25G を用いている。軍艦島のモニタリング対象の建物からのセンサデータを収集して本島に送信する。

モニタリング対象の建物は、70号棟、65号棟、31号棟、日給住宅(16号棟、17号棟、18号棟、19号棟、20号棟)、30号棟である。常時微動を計測する加速度センサ、建物の異常音を取得するマイクロフォンを設置している。加速度センサとしては3軸、日本航空電子の高精度 MEMS 加速度センサを用いている。2015年12月現在では、70号棟に4台、65号棟に1台、30号棟に9台、31号棟に6台を設置している。各建物で取得したセンサデータは、3号棟の基地局で集約した後本島に対して送信される。

このような軍艦島モニタリングのネットワークインフラを実現するためには、以下の4つの要件を同時に満たす必要がある。1つ目は、基地局まで確実にデータを送信できることである。軍艦島モニタリングでは、取得したデータをもとに構造建築物の状態を判断するため、データは全て確実に基地局へ送信する必要がある。

2つ目は、スループットを高くすることである。軍艦島モニタリングでセンサノードから取得するデータは、加速度と音声である。加速度は 16 bit 100 Hz サンプリングで取得しているため、加速度センサ1つあたり x, y, z の3軸で 4.8 kbps となる。音声は 16 bit 48 kHz サンプリングで 768 kbps である。ソーラーパネルで発電するエネルギーの問題から常時のモニタリングはしないことを想定しているもの、これらのデータを全て送信するためには、高いスループットを実現できるネットワークインフラが望ましい。

3つ目は、マルチホップ通信で収集することである。5節の評価で詳細に述べるが、軍艦島は建物が密集している複雑な環境である

ため、モニタリング対象の建物から基地局まで常に見通し線 (LoS: Line of Sight) が得られるとは限らない。障害物がある場合、基地局まで直接通信するよりも、複数の経路を経由して通信する方が確実にデータを送信できると考えられる。

4つ目は、低コストで実現できることである。例えば、衛星通信等を使用すればモニタリング対象の建物から直接データを収集することは可能である。しかしながら、最終的にモニタリングシステムを軍艦島全域まで広げると考えると、できるだけ低コストで展開可能であることが望ましい。

### 3 中継局を用いた軍艦島センサネットワーク

2節の議論を踏まえ、本稿ではセンサノード、中継局、基地局の3種類のノードによって構築される軍艦島センサネットワークを提案する。図2に軍艦島センサネットワークの全体像を示す。基地局とセンサノードは、200 W のソーラーパネルと 50 Ah のバッテリーを具備しており、基地局ではカメラによるセンシングと本島へのデータ配送、センサノードでは加速度と音声の取得を行う。また、複数の無線インタフェースを具備しているため、複数チャンネルで同時に送受信ができる。

中継局は軍艦島全体に分散的に設置されており、数十 mW のソーラーパネルと 1 F のスーパーキャパシタによって駆動する。また、基地局は無線インタフェースを1つだけ具備する。低消費電力で動作させるため、昼間の晴天時だけセンサノードと基地局をつなぐセンサネットワークを構築する。このような単純な仕組みで中継局を実現することで、低コストでの実装が可能となり、軍艦島内に分散的に中継局を配置することができる。

以上の仕組みを持つセンサネットワークによって、センサネットワーク内の各経路で異なるチャンネルを利用することができる。異なるチャンネルが利用できれば、チャンネル1つあたりの容量は少なくとも複数チャンネルを束ねることで高速な通信を提供できる。

### 4 初期の実装

3節で述べた軍艦島センサネットワークの初期の実装として、920 MHz 帯と 2.4 GHz 帯の2種類の無線通信モジュールを用いたシステムを構築した。無線通信モジュールは周波数帯が 920 MHz ・データレートが 100 kbps のものと、周波数帯が 2.4 GHz ・データレートが 250 kbps のものの2種類を用いた。基地局やセンサノードを模したノート PC に、Intel Core i5-4200U を具備した ASUS 社の UX32LN、オペレーティングシステムに Linux の Ubuntu 12.04 を用いた。

図3に実装した軍艦島センサネットワークの全体像を示す。TUN は Linux が提供する仮想ネットワークカーネルドライバである。Linux からは TUN のインタフェースを通すことで、通常の IP を用いたアプリケーションをそのまま利用することができる。ノート PC と無線モジュールは USB で接続されている。各ノート PC では、それぞれ TUN を作成して、作成した TUN に IP アドレスを割り当てる。また、1回に送信できるデータの最大値である MTU (Maximum Transmission Unit) を、無線モジュールが扱うパケットで送信可能なサイズに設定している。TUN インタフェースと無線モジュールはブリッジ機構とシリアル通信を介して相互に通信する。

PC1 のアプリケーションで発生したパケットは MTU のサイズに分割された後、TUN インタフェースを介してブリッジ機構 Bridge1 に渡される。アプリケーションからパケットを受け取った Bridge1 では、通常のシリアル通信によって無線モジュール1に対してパケッ



図1: 軍艦島内のモニタリング対象の建物 [1]

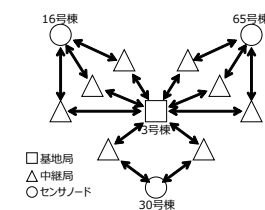


図2: 軍艦島センサネットワークの全体像

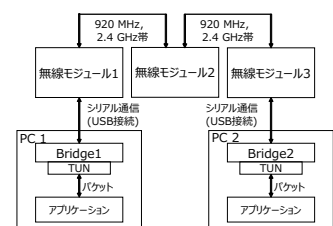


図3: 実装したシステムの全体像

トを送信する。Bridge1 と Bridge2 では、アプリケーション内で発生したパケットを送信する場合、受け取ったパケットをペイロードとして独自のヘッダを付与する。各無線モジュールでは、独自ヘッダに含まれるスタートコードを用いてパケットの先頭を検出し、パケットを受信する。パケットを受け取った無線モジュール 1 は無線通信によって無線モジュール 2 に対してパケットを送信する。無線モジュール 1 よりパケットを受け取った無線モジュール 2 は、無線通信によって無線モジュール 3 へとパケットを送信する。パケットを受信した無線モジュール 3 は、シリアル通信によって PC2 上の Bridge2 へとパケットを送信する。最後に Bridge2 は、受け取ったパケットからペイロード部を抽出した後、TUN インタフェースへと渡す。TUN インタフェースに渡ったペイロードは Linux カーネルを通してアプリケーションへと送信される。

5 初期的評価

実装した軍艦島センサネットワークの基本性能を評価した。特に、軍艦島センサネットワークでは、920 MHz 帯と 2.4 GHz 帯のどちらの無線モジュールを用いるべきかを検討する必要がある。

5.1 通信距離の評価

基本性能を評価することを目的として、920 MHz 帯と 2.4 GHz 帯の無線モジュールの通信距離を計測した。2 つの無線モジュールを用いて、ACK の返答数からパケット到達率を算出した。静岡大学浜松キャンパスにおいて、無線モジュール間の距離を変化させながら、1 回の評価につきパケットを 100 個送信した。無線モジュール間の距離は 0 m から 300 m まで、50 m ずつ変化させた。920 MHz 帯の無線モジュールでは送信電力は 1 mW と 20 mW、2.4 GHz 帯の無線モジュールでは送信電力は 10 mW とした。

図 4 に通信距離に対するパケット到達率を示す。縦軸はパケット到達率、横軸は無線モジュールの通信距離 [m] である。図 4 より、以下の 2 つのことが分かる。

1 つ目は、2.4 GHz 帯の無線モジュールが常に高いパケット到達率を達成していることである。2.4 GHz 帯を用いた場合、通信距離が 50 m と 300 m のときのパケット到達率の差は 2 % とほとんど変わらない。一方、920 MHz 帯・送信電力 20 mW の無線モジュールを用いた場合、通信距離が 50 m の時と比べて 300 m の時の到達率は 52 % 劣化している。920 MHz 帯・送信電力 1 mW の無線モジュールは、通信距離が 250 m 以上になるとパケットが届かなかった。

2 つ目は、通信距離が短い場合、送信電力にかかわらず 920 MHz 帯の無線モジュールの方が 2.4 GHz 帯の無線モジュールよりパケット到達率が高いことである。通信距離が短い場合、パケット到達率は外部の電波などによる干渉によって変化する。920 MHz 帯は外部の電波などによる干渉の影響をほとんど受けない。一方、2.4 GHz 帯は他の無線 LAN や Bluetooth などの電波による干渉を受けやすく、通信距離が短い場合でもパケット到達率が低くなったと考えられる。しかしながら、軍艦島では外部の電波による干渉は少ないため、2.4 GHz 帯が干渉の影響を受けることは少なくなると予想される。

5.2 軍艦島での通信距離の検証

軍艦島での 920 MHz 帯の基本性能を評価するため、920 MHz 帯の無線モジュールを用いた場合の通信範囲を計測した。5.1 節での評価では、2.4 GHz 帯の方が通信距離が長かった。しかしながら、920 MHz 帯の方が電波が回り込む性能が高いため、NLoS (Non Line of Sight: 見通し外) の場合は 2.4 GHz 帯よりも長い通信距離が得られるとされている。軍艦島は建物などの障害物が多いため、920 MHz 帯を用いた方が通信距離が長くなり、結果として少ない中継局数で軍艦島全域をカバーできる可能性がある。

図 5 に軍艦島における 920 MHz 帯の無線モジュールの通信範囲を示す。地図上に丸で示した部分が計測場所である。図 5 の丸が実線でつながれている経路が通信に成功した経路である。図 5 から、

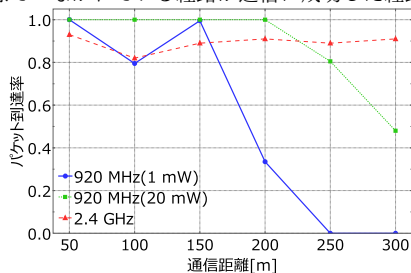


図 4: 920 MHz と 2.4 GHz の通信距離

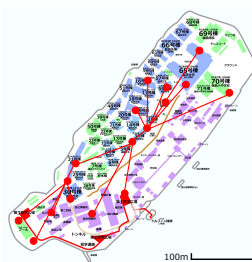


図 5: 軍艦島での通信距離の検証 [1]

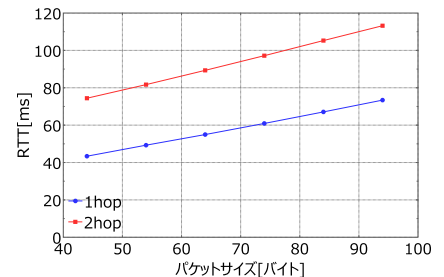


図 6: 遅延の計測

無線モジュールの通信距離が短くても通信できない場合が存在することが分かる。軍艦島では、920 MHz 帯の無線モジュールを用いた場合でも NLoS では通信できず、LoS が得られる場合のみ通信できると考えられる。

5.3 RTT とスループットの評価

PC と無線モジュールを接続するブリッジ機構の性能を評価するために、PC 間で無線モジュールを介して通信をした場合の、遅延時間とスループットを計測した。

まず、遅延時間を評価した。評価では、1 ホップと 2 ホップの場合の RTT (Round Trip Time) を ping によって計測した。1 ホップの場合は図 3 の無線モジュール 2 を除いて無線モジュール 1 から無線モジュール 3 に直接パケットを送信した。PC1 の TUN インタフェースには 192.168.230.1 を、PC2 の TUN インタフェースには 192.168.230.2 を割り振り、ペイロードサイズを変化させながら計測した。具体的には、ヘッダーを含めたパケットサイズを 44 バイトから 94 バイトに変化させ、100 回送信した際の RTT の平均を算出した。

図 6 にパケットサイズに対する遅延時間を示す。縦軸が遅延時間 [ms]、横軸がパケットサイズ [バイト] である。図 6 より、無線モジュールでの遅延が数十ミリ秒であることが分かる。計測結果より、1 ホップ時の RTT はパケットサイズを  $D$  とすると、式 (1) で近似できる。

$$T_{RTT,1hop} = 0.598D + 16.9 \quad (1)$$

同様に 2 ホップ時の RTT は、 $D$  を用いて式 (2) で近似できる。

$$T_{RTT,2hop} = 0.779D + 39.8 \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) より、実際に通信している以外のオーバーヘッドは、1 ホップの時は 16.9 ms、2 ホップの場合 39.8 ms であり、通信以外の遅延時間が大きいことが分かる。通信以外のオーバーヘッドは、ブリッジ機構によるものと無線モジュールによるものが挙げられる。ブリッジ機構は PC 上で動作しているため、オーバーヘッドは小さくなる。すなわち、無線モジュール上の処理がオーバーヘッドとなり、遅延を引き起こしていると考えられる。

次に、スループットを評価した。評価では、PC1 から PC2 への 1 ホップ時のスループットを計測した。スループットの計測には iperf [4] を用いた。計測の結果、1 ホップのスループットは約 18.6 kbps であった。物理層の伝送レートが 100 kbps であるので、約 18.6 % の性能しか出していないことが分かる。シリアル通信や無線モジュールのオーバーヘッドが原因であると考えられる。

6 おわりに

本稿では軍艦島センサネットワークの初期的実装と基本性能の評価について述べた。現在、2.4 GHz 帯を用いることを前提に通信プロトコルの実装を進めている。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (26289194, 代表: 濱本卓司) の助成を受けたものである。本研究の遂行をサポートして下さい長崎市世界遺産推進室に感謝致します。

参考文献

- [1] 軍艦島モニタリングプロジェクト, <http://sarulab.inf.shizuoka.ac.jp/battleship/>
- [2] 黒木琴海, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島センサネットワークのためのタスクスケジューリングの設計と評価情報処理学会研究報告, Vol.2015-MBL-77, No.21, (2015).
- [3] 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト その 1: 研究計画と予備計測/長期計測, 社団法人日本建築学会学術講演梗概集, (2015).
- [4] iperf, <https://iperf.fr/iperf-download.php>