積雪の可視化と除雪支援

齋藤　寛[*1]　小平　行秀[*1]　富岡　洋一[*1]

1.　はじめに

近年冬季間は、北日本や東日本の日本海側を中心に、大雪となり、幹線道路や高速道路などで大規模な交通障害を発生させる。市街地でも積雪によって、交通に大きな影響をもたらす [1]。

一方、積雪が一定の深さになると、自治体を中心に、道路の除雪が行われる。しかし、各家庭に関していえば、各自で除雪を行なう必要がある。個人による除雪は、身体的な負担がとても大きく、屋根からの落雪や除雪機の操作ミスといった事故にも注意しながら行う必要がある。特に、一人暮らしの高齢者にとっては負担が大きい。

道路であれ、家庭であれ、除雪を効率的に行うためには、できるだけ早い段階で対策を立てることが求められる。積雪が少ない段階の方が、除雪に対する負担も少ない。しかし、一晩で数十cmや数m積もることもあるため、定期的に監視する必要がある。また、定期的な監視の他にも、除雪を支援する取り組みも必要である。

こうした問題に対し、我々はこれまでに、ICTを利用した積雪の可視化と除雪支援に関する2つの研究を行ってきた。1つは、オープンソースハードウェアとセンサーネットワークを利用した積雪の可視化である。もう1つは、家の雪を除雪する自動除雪ロボットである。本稿では、これら2つの研究と今後について紹介する。

2.　オープンソースハードウェアとセンサーネットワークを利用した積雪の可視化

我々は、2015年からの2年間、総務省戦略的通信研究開発推進制度（SCOPE）の支援の下、オープンソースハードウェアとセンサーネットワークを利用した積雪の可視化と除雪支援システムの研究開発を行った。そのために、リアルタイムで積雪を計測することができるセンサーノードを開発し、その結果をwebに表示するシステムを構築した。

積雪を計測するセンサーノードは、Arduino [2]と呼ばれるオープンソースハードウェアを用いた。Arduinoは基板情報が公開されているため、互換基板の開発が容易である。また、センサーやアクチュエータの取り付けと制御が容易で、開発環境もフリーで提供されている。

図1と表1は、開発したセンサーノードと使用した部品を表す。基板にはArduino Fio、無線通信にはZigBee規格を実装したXBee Pro S1、積雪の測定には超音波距離センサー MB7384/MB7386 HRXL-MaxSonar-WRSTを用いた。電源は、リチウムポリマーイオン電池とソーラーパネルである。

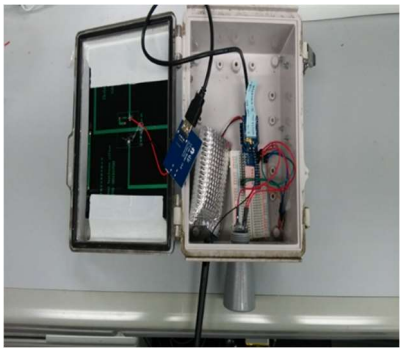

図 1　開発したセンサーノード

表 1　使用した部品

マイコン基板	Arduino Fio
無線モジュール	XBee Pro S1
距離センサー（音波）	MB7384 HRXL-MaxSonar®-WRST MB7386 HRXL-MaxSonar®-WRST
リチウムポリマーイオン電池	6,600mAh
ソーラーパネル	3.0W
その他	Lipoライダー 温度センサー

センサーネットワークは、ZigBee [3]で構成した。マルチホップメッシュ型のネットワークを採用し、3種類のノードを準備した。1つは積雪データを集約するサーバーに設置したコーディネータ、もう１つは通信データを中継するルーター、残りは積雪を計測するエンドデバイスである。

積雪の可視化として、webページの開発を行った。開発したwebページは、図2に示す通り、ノード毎のページとネットワーク全体のページからなる。ノード毎のページでは、ノード毎の積雪状況と通信状況を確認することができる。ネットワーク全体のページでは、全てのノードの積雪状況と通信状況、及び指定した時間前との積雪の差異を確認することができる。

積雪の計測は、30分毎に行った。ただし、ノードの設置位置や超音波距離センサーの精度を考慮し、1回の計測で1分間センサーのデータを読み取り、異常値を排除した平均値を積雪データとしている。

実験として、会津大学の周りにセンサーネットワークを構築し、計測した積雪の精度、計測した積雪データをエンドデバイスからコーディネータまで送信したときの受信率、及びバッテリーライフを評価した。

図3は、構築したセンサーネットワークをGoogle Mapに

*1　会津大学コンピュータ理工学部　E-mail hiroshis@u-aizu.ac.jp

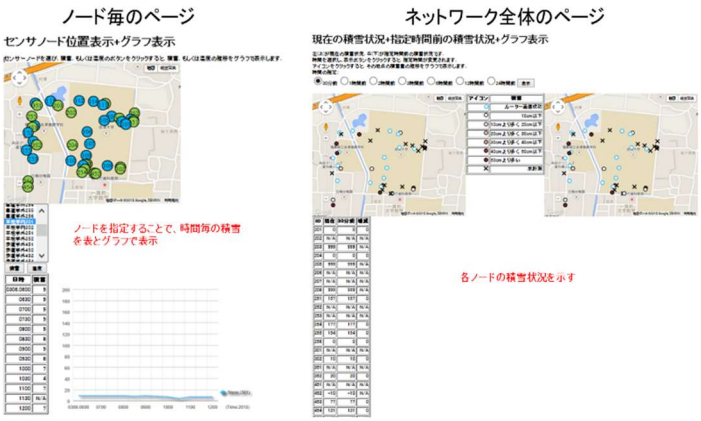

図 2　開発した web ページ

図 3　実験で構築したセンサーネットワークを Google Map に表示

図 4 設置したエンドデバイスの例

表したものである。構築したセンサーネットワークは、42個のセンサーノードからなり、内訳はコーディネータが1個、ルーターが21個、エンドデバイスが20個である。積雪の計測は、車道、歩道、及び積雪が平たんとなるところで行った。車道と歩道の積雪の計測は、会津若松市役所の協力のもと会津若松市所有の街灯にエンドデバイスを設置することで行った。積雪が平たんとなるところは会津大学の中庭を利用した。図4は、設置したエンドデバイスの例を表す。車道と歩道の積雪の計測には、街灯の高さ2-3m、街灯に対しセンサーの角度が15-25度の範囲となるようエンドデバイスを設置した。積雪が平たんとなるところは、高さ1.3m、支柱に対しセンサーの角度が0度となるようにエンドデバイスを設置した。

車道や歩道の積雪の計測精度は、実際の積雪に対し誤差が非常に大きくなった。これには幾つかの要因があり、街灯に対してセンサーの角度を15-25度としたこと、風の

表 2 ノードの受信率

受信率	ノード数
90% - 100%	33 (80%)
80% - 89%	3 (7%)
60% - 79%	2 (6%)
40% - 59%	3 (7%)
39%以下	0 (0%)

影響で街灯やエンドデバイスが揺れたことが挙げられる。この問題を解決するためには、センサーの角度をつけないよう車道や歩道の真上にエンドデバイスを取り付けることや取り付ける位置を下げることが考えられる。しかし、除雪や交通の妨げにならない、エンドデバイスが雪に埋もれないようにする必要がある。一方、30分で積もる積雪の上限を設けることで、計測値の範囲をプログラムレベルで制御することも考えられる。例えば、30分で積もる積雪の上限を10cmと仮定した場合、30分前の積雪が40cmであれば、30分後の積雪は40cmから50cmの範囲の計測データのみを用いて求める。仮にその範囲を超えた場合は、50cmと補正することが考えられる。

計測した積雪データをエンドデバイスからコーディネータまで送信したときの受信率は、2015年1月13日の13時から2015年1月27日の17時半（約2週間）にかけて評価した。表2に示す通り、コーディネータを除く41個のノードのうち、33個のノードの受信率は90%以上だった。一方、3個のノードは受信率が40%-59%となった。なお、ノード間の距離は数mから100m前後である。この実験では、センサーネットワークを構築したが、より広範囲にわたって（例えば市町村単位）積雪を確認するのであれば、3GやLTE、もしくは特定小電力無線（例えば920MHz）の使用が考えられる。

バッテリーライフは、2015年1月8日の13時から2015年2月12日の10時（約1ヶ月強）にかけて確認した。コーディネータを除く41ノードのうち、29ノードが生存していた。そのため、ソーラーパネルやリチウムポリマーイオン電池の容量を上げることで、1シーズン（約4カ月）持たせることが期待できる。一方、生存ノードの殆どが受信率90%以上という事を考えると、受信率が低いノードは、ネットワークに再接続しようした際に電力を大きく消費したか、もしくは太陽光が十分に当たっていないことが考えられる。そのため、センサノードの設置位置を決める際に十分な調査が必要である。

3.　除雪ロボット

積雪が増えると、各家庭での除雪の負担が大きくなる。特に、高齢者にとっては非常に深刻な問題である。この問題を解決する方法として、除雪ロボットが挙げられる。除雪ロボットに関しては、幾つかの研究機関で研究が行われているが [4][5]、大型なため家庭で使うには向いて

いない。より多くの人に除雪ロボットの利点を享受してもらうためには、安全性や低価格化が望まれる。

この問題を解決するために、我々は今現在、自動除雪ロボットの研究開発を行っている。また、除雪の開始タイミングを知らせる簡易積雪計と組み合わせることで、積雪の計測から除雪までの自動化を目指している。

簡易積雪計の機能は、以下のとおりである。

・定期的に積雪を計測
・積雪の結果をwebページにて可視化
・一定の積雪になったら、除雪ロボットに除雪を開始するよう指示

一方、自動除雪ロボットの機能は以下のとおりである。

・簡易積雪計から除雪の指示が来たら、あらかじめ指定した除雪ルートを自動で除雪
・除雪ルートは、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)を用いて決めておく
・除雪ルートに障害物がないかをLight Detection and Ranging (LiDAR)や深層学習 (AI)にて確認
・GPSの情報を用いることで、除雪ルートを逸脱したときに戻れるようにする

図5は、開発した簡易積雪計とその構成を表す。簡易積雪計は、前節で紹介した平たんな場所で積雪を計測するセンサーノード（エンドデバイス）をベースとし、Arduino Fioの代わりにRaspberry Pi 3 Model B [6]を用いた。30分に1回の動作の中で、複数回距離センサーのセンシング値を読み込み、異常値を除いた値の平均値を取得した積雪値としている。一方、距離センサーによる計測に精度の問題があることを踏まえ、目視にて積雪が確認できるようカメラを搭載している。また、夜間も問題なく撮影できるよう、赤外線投光器やリレーモジュールを搭載している。なお、距離センサーは地面からの高さ約110cmのところに、支柱に対し角度をつけずに設置している。そのため、この簡易積雪計の積雪の誤差は、数cm以内に抑えることができている。

簡易積雪計は、積雪が一定値を超えた場合（例えば15cm）、User Datagram Protocol (UDP)通信にて、除雪ロボットに除雪指示を出す。また、除雪ロボットと通信ができるよう、簡易積雪計からWi-Fiによる電波を発破し、除雪ロボットが受信できるようにするか、あるいは3G/LTEモジュールを介して公衆回線に接続する。

積雪の可視化では、現在の積雪量、気温や湿度をグラフで表示したwebページを開発した。また、撮影したカメラ画像も表示させているため、webページにて目視にて積雪を確認することができる。

図6は、開発中の除雪ロボットとその構成を表す。除雪ロボットは、CuboRex社のCuGo v3 [7]をベースとしている。

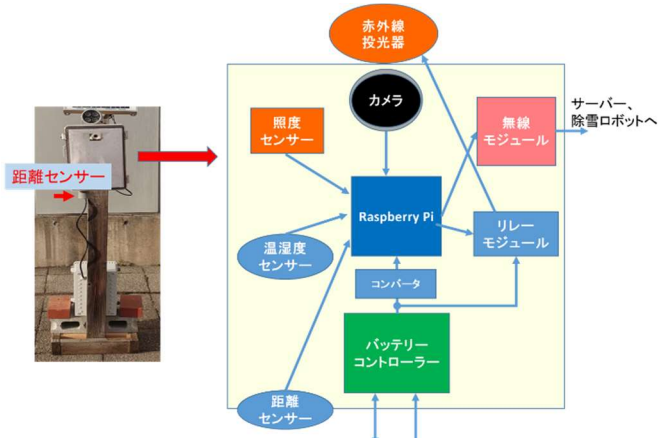

図 5 開発した簡易積雪計とその構成

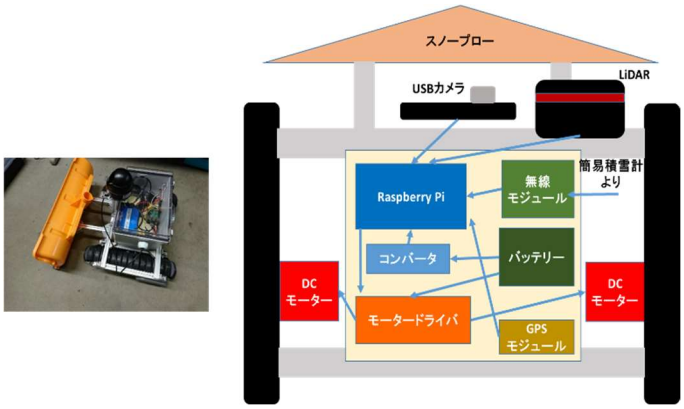

図 6 自動除雪ロボットとその構成

CuGoは、自動走行などの研究開発を容易に実現するための電動クローラユニットである。CuGoに対し、スノープロー、USBカメラとLiDARを外側に設置し、Raspberry Pi 3 Model Bやリチウムバッテリー、モータードライバ、およびGPSモジュールを防水ケースの中に設置した。

除雪ロボットは現在開発中で、この冬（2022年12月から2022年3月）に実証実験ができるよう自動走行の準備にとりかかっており、Raspberry Piに、Ubuntsu 18.04とROS Melodic 1.14.13を実装した。ROSは、ロボット用のソフトウェアプラットフォームである。また、SLAMはGoogleのCartographer 1.0.0を、LiDARはSlamtecのPRLiDAR A3M1を使用している。

自動走行は、以下の手順で行う。SLAMによる自己位置推定と地図作成のために、自分で決めた除雪ルートに対し、LiDARを動かしながらCuGoをマニュアル操作する。LiDARから得た障害物までの距離などを基に、Cartographerで地図を作成する。作成した地図の上で、除雪ロボットの除雪ルートをnavigaionなどを用いて決定する。次に、決定した除雪ルートに沿って除雪ロボットが移動できるようプログラムを準備する。プログラムは、簡易積雪計からの積雪指示を受信したら、指定した除雪ルートに沿って自動走行できるようCuGoを制御する。一方、除雪ルートの途中に障害物（例えば車、雪の塊）な

どがある場合、回避できるようにする必要がある。また、除雪ルートから逸脱しないよう、あらかじめ除雪範囲の緯度、経度を求めておき、GPSモジュールを定期的に読み込んで、除雪ルートをそれた場合は、修正するようにする。

障害物の検出には、深層学習を用いる。物体検出として定評がある、YOLO （You Only Look Once）を用い、障害物の画像を準備して学習を行う。学習後に得られた学習済みモデルをRaspberry Piに実装することで、走行中にカメラが撮影した画像より障害物を検出し対応する（回避、もしくは停止の上、管理者に知らせる）。

この冬の実証実験では、除雪ルートに沿って除雪ができるかを確認する。また、どういった雪質に対し、どのくらいの積雪まで対応することができるかを確認する。

4. おわりに

本稿では、我々がこれまでに除雪をテーマに研究してきた、オープンソースハードウェアとセンサーネットワークを利用した積雪の可視化と家の雪を除雪する自動除雪ロボットを紹介した。

積雪の可視化の発展として、簡易除雪計を幾つか展開して、町全体の積雪状況や路面状況をリアルタイムに表示するシステムや、除雪車に対する最適な除雪経路探索、雪捨て場の状況をリアルタイムで監視し、街角の積み上げられた雪を捨てるのに最適な雪捨て場の探索といったことが挙げられる。

家の雪を除雪する自動除雪ロボットに関しては、単にスノープローで押し出すだけでなく、指定したところに雪を運ぶことや、除雪車が家と道路の間に置いて行った雪を深層学習で検出し、片付けるといったことなどが挙げられる。

謝辞

本研究を遂行するために支援してくれた、会津大学の齋藤研、小平研、及び富岡研の学生諸君、積雪の可視化で協力して下さった会津若松市役所の方々、および総務省に感謝致します。

参考文献

[1] NHK, “記録的大雪　各地で平年大幅に上回る積雪 落雪などに十分注意 “, https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220206/k10013469371000.html

[2] Arduino, “What is Arduino”, https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction

[3] Connectivity Standards Alliance, “Zigbee, The Full-Stack Solution for All Smart Devices”, https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/

[4] S.Craig et al. , ″Autonomous Snowplow Design″, ION GNSS+, 2044 - 2057, 2013.

[5] T.Sato et al. , ″Development of An Autonomous Snowplow″, Proceedings of JSPE Semestrial Meeting, 2003S(0), 33-33, 2003.

[6] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 3 Model B”, https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/

[7] CuboRex, “CuGo v3”, https://cuborex.com/cugo#05