

風速によってセンシング頻度を変化させる 大気汚染の監視の省電力化

河竹 純一¹ 高谷 悠太郎² 串田 高幸¹

概要：大気汚染の状況は世界中で監視されており，監視領域の拡大のためには商用電源の接続を必要としない環境発電による監視が必要である．環境発電によって大気汚染の監視を行うとき，マイクロコントローラの消費電力量が発電機の発電量を上回ることによってバッテリーの残量がなくなると，マイクロコントローラが動作しなくなる．そのため，大気汚染の監視を常時行うためには消費電力量を削減する必要があるという課題がある．そこで風速と AQI の相関関係を利用し，風速の値からセンシング頻度を決定する手法を提案する．これによってセンシング頻度は風速に伴って変化し，変化量が少ないときに電力が削減される．評価として，定期的にセンシングを行う手法と提案手法の電力消費量及び取得したデータの正確度の比較を行う予定である．

1. はじめに

背景

各国の環境を担当する行政機関は大気汚染の状況を常に監視しており，大気質の指標として AQI (Air Quality Index) を公開している [1]. AQI は，汚染物質による人間の健康への被害の度合いを表す指標にもなっており，この値が大きいくほど影響が大きくなる．日本の環境省によると，常に監視する理由として，人間の健康に影響する緊急事態に対してただちに対策を講じることや，インターネットを通じて大気汚染の状況を地域住民に周知することをあげている [2].

汚染状況を監視するための装置は各国によって異なっているが，電力は電力会社が提供する商用電源から供給されている．商用電源から電力を供給すると，際限なく電力が得られるためシステムの持続性は担保されるが，設置可能な場所が限られる．例えば，インドでは大都市圏での AQI 監視は行っているが，郊外においては行われていない [3]. その理由は，インドの電力網の整備不足であることが考えられる．CNN^{*1}によると，2017 年時点で電力網とつながっていないインド国民は約 2 億 4000 万人であり，安定した電力供給がされていない地域を含めるとこれより更に拡大

する [4]. したがって，監視対象とする範囲を拡大するためには電力を自給する監視手法が必要になる．

電力を自給する方法として，自然エネルギーから発電を行う環境発電がある [5]. 環境発電によって大気汚染の監視を行うとき，環境発電を行う発電機，電力を蓄積するバッテリー，AQI を測定するセンサ，制御用のマイクロコントローラを必要とする．したがって，発電機がバッテリーに対して電力の供給をし，バッテリーがマイクロコントローラに対して電力を供給する．そしてマイクロコントローラが動作することによってソフトウェアの命令コードが実行され，センサによって大気汚染データが取得される．マイクロコントローラが動作することによってバッテリーの電力は消費される．

環境発電によって得られる電力を基にした AQI の監視として Village Green Project がある [6]. Village Green Project では，AQI を監視するデバイスを公園のベンチに設置し，太陽光発電と風力発電を用いて電力を供給している．環境発電を用いる場合，その発電量は環境の変化に依存する．例えば太陽光発電によって電力を供給するとき，発電量は日照量に依存する．したがって，天候の悪化によって日照量が減少すると，発電量は日照量に伴って低下する．また，風力発電によって電力を供給するとき，発電量は風量に依存する．

課題

環境発電によって大気汚染の監視を行うとき，マイクロコントローラの消費電力量が発電機の発電量を上回るこ

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

² 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

^{*1} ワーナー・メディア・ニュース・スポーツが所有するアメリカ合衆国向けのニュースチャンネル

とによってバッテリーの残量がなくなると、マイクロコントローラが動作しなくなる。マイクロコントローラが動作しないことによってソフトウェアの実行は不能になり、大気汚染の監視をするという機能が実現できなくなる。したがって、大気汚染の監視を常時行うためには、消費電力量が発電量を上回ることがないように消費電力量を削減する必要があるという課題がある。

例として、太陽光発電によって発電し、マイクロコントローラの ESP32、大気汚染データを取得する PMS5003 を使用するときの課題を以下に説明する。まず、太陽光パネルを使用したときの発電量は、252 mm×187 mm のパネルを用いたとき、約 200 mW～600 mW である [7]。また、消費電力量をテスターで計測したところ、ESP32 は、待機時 (Deep Sleep モード) で約 30 mW、通常時で約 130 mW、PMS5003 は約 200mW であった。なお、1 日あたりの日照時間は、日本の年平均日照時間の約 2000 時間を 365 で割り、約 5.5 時間とする。したがって、1 日の発電量は最大で約 3300 mWh、消費電力量は最小で約 720 mWh である。この消費電力量は最小値であり、大気汚染の監視をするためにセンサからデータを取得すると、消費電力量はこの値より大きくなる。このことから、消費電力量はセンサデータを取得する頻度 (以下センシング頻度) に依存することがわかる。例えば、センシング頻度を 1 分に 1 回とし、センサのセットアップに 10 秒の時間を要すると、マイクロコントローラとセンサの電源が 10 秒間オンになり、50 秒間 Deep Sleep モードに移行する。式 (1) の計算により 1 日あたりの消費電力量 ρ_1 は 1920 mWh となる。

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{30mW \times 50s + (130mW + 200mW) \times 10s}{60s} \times 24h \\ &= 1920mWh\end{aligned}\quad (1)$$

このとき、発電量の 3300 mWh が消費電力量の 1920mWh を上回っているため、バッテリー残量が減少することはない。しかし、悪天候によって日照時間が減少したりセンシング頻度を高くするとバッテリー残量が減少し、バッテリー残量がなくなる可能性が高まる。例えば、発電量が 500 mW で日照時間が 5.5 時間のとき、1 日の発電量は 2750 mWh となる。また、センシング頻度を 30 秒に 1 回とすると、式 (2) の計算により 1 日あたりの消費電力量 ρ_2 は 3120 mWh となる。

$$\begin{aligned}\rho_2 &= \frac{30mW \times 20s + (130mW + 200mW) \times 10s}{30s} \times 24h \\ &= 3120mWh\end{aligned}\quad (2)$$

このとき、発電量の 2750 mWh が消費電力量の 3120 mWh を下回っているため、バッテリー残量は減少する。このように、大気汚染の監視を常時行うためには、消費電力量が

発電量を上回ることがないように消費電力量を削減する必要がある。ただし、マイクロコントローラを動作させ続けるためには消費電力量を 0 にすることはできないため、制約条件としては「1 時間に 1 回のセンシング頻度 (アメリカの環境省が Web サイトの AQI の値を更新する頻度) でセンサからデータを取得してサーバに送信すること」とする。1 時間に 1 回以上のセンシング頻度でデータを取得する理由は、背景で述べた人間の健康に影響する緊急事態の発覚までの時間が、センシング頻度が高いほど短縮されるためである。

各章の概要

第 2 章 関連研究では、上述した課題に関連する研究とその比較をする。第 3 章 提案では、課題を解決するための提案方法とその方式について詳しく述べる。第 4 章 実装と実験環境では、提案内容の実験についてハードウェアとソフトウェアの構成や実験環境について述べる。第 5 章 評価と分析では、実験の結果を分析して提案内容の評価及び検証をする。第 6 章 議論では、本研究の提案、実験、評価について議論すべき内容について述べる。最後に、第 7 章 おわりにで本稿のまとめと貢献した内容、今後の展望について述べる。

2. 関連研究

IoT における省電力手法に関する研究を以下に挙げる。

Chatterjea らは、無線センサーネットワークにおけるノードの自律的なセンシング頻度制御スキームを提案した [8]。この研究では、アプリケーションが非常に高いエネルギー消費量を持つ特殊なセンサ、たとえば海洋環境を監視するための水質センサを必要とする場合に、これらのセンサから生のデータを収集すると過度のエネルギー消費につながることを指摘している。そこで著者は、測定されたパラメータの変動性に基づいてノードが自律的にセンシング頻度を変更するスキームを提案している。この研究では、測定するセンサのパラメータの変動性からセンシング頻度を変更しているが、そのパラメータの因果関係にあるデータを使用することに関しては言及されていない。

Reilly らは、大気汚染監視システムを構築するうえで、省電力手法として太陽光発電を使用することを提案した [9]。この研究では、粒子状物質、オゾン、一酸化炭素をそれぞれ 1 分に 1 回取得しつつ、必要な電力は太陽光発電のみで補うオフグリッドを実現している。ただし、発電量と消費電力量の具体的な計算はされておらず、消費電力を削減することに関しては言及していない。

Zhang らは、NB-IoT, LoRa を使用した低電力の広域ネットワーク情報監視アプローチを行った [10]。この研究では、太陽光発電による電力供給が行われており、消費電力量が少ない通信方式と、測定をしないときに IoT デバ

イスの電源を切ることによって消費電力の削減を行っている。また、Foleaらは、室内の二酸化炭素レベル、温度、相対湿度、絶対圧力、光の強さを監視し、IEEEに基づく既存の無線インフラストラクチャを使用して測定データを送信するシステムを提案した [11]。この研究では、低消費電力のセンサや通信方式を組み合わせることによって、小型バッテリーで3年間動作し続けると結論付けている。これらの研究は、省電力手法として環境発電を行うことや通信方式を変えることが提案されているが、センシング頻度を変更することによる手法については言及されていない。

3. 提案方式

大気質が変化する要因としては、自然的状況と地理的状況の2つの要因が存在する [12]。中でも自然的状況の一つである「風」がAQIに与える影響は、気温、湿度、日射量、日照時間に比べて大きい [13]。したがって本提案では、風速とAQIの変化量の関係に基づき、風速によってセンシング頻度を変化させることでAQIの変化量が小さいときの消費電力量を削減する。そこで、風速とAQIの変化量に関係があることを調べるために基礎実験を行った。

基礎実験

提案手法を確立するため、風速とAQIを1分毎に測定する基礎実験を行った。図1に実験の様子を図を示す。実験は東京工科大学のFOODS FUU 前広場にて、2021年7月29日(16:04-17:47)、2021年7月30日(13:50-16:00)、2021年8月2日(10:54-12:35)で行った。図1の画面左にあるのは制御用のマイクロコントローラであるESP32であり、画面上にあるのは粒子状物質測定センサPMS5003である。PMS5003は粒子状物質の0.1Lあたりの個数を粒子の直径ごとに測定するセンサである。したがって、PMS5003から取得したPM2.5の個数濃度(個/0.1L)からAQIを算出している。その際、個数濃度は粒子の密度を $1g/cm^3$ として1立方メートルあたりの質量に変換している [14]。ある

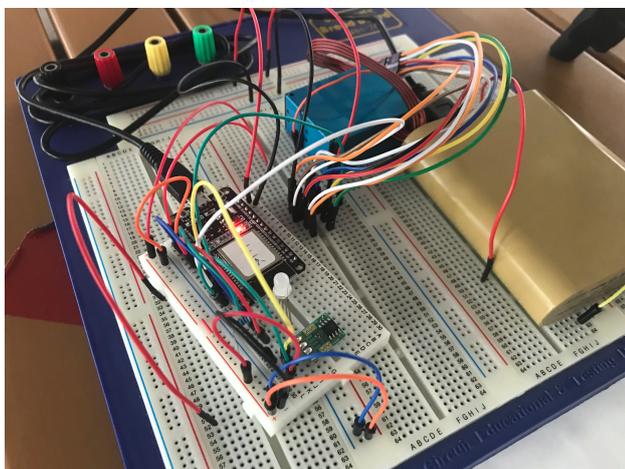


図1 実験の様子

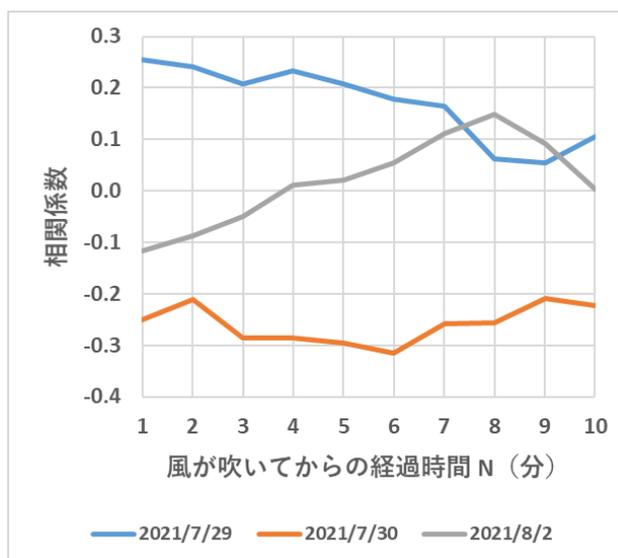


図2 風速とその風が吹いてから N 分後の AQI の相関係数

汚染物質 p の測定濃度 C_p に対する AQI の値 I_p はアメリカ合衆国の環境省が定めた濃度区間と指数区間を用いて式 (3) によって算出される [1]。ただし、 C_p は PMS5003 によって測定した PM2.5 の個数濃度から算出した濃度であり、 C_p の値があてはまる濃度区間の下限値を BP_{Lo} 、上限値を BP_{Hi} 、 C_p の値があてはまる指数区間の下限値を I_{Lo} 、上限値を I_{Hi} とする。なお、 BP_{Lo} 、 BP_{Hi} 、 I_{Lo} 、 I_{Hi} は、アメリカの環境省が持つ濃度区間と指数区間の対応表の値を参照している。

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (3)$$

次に、風速と AQI の相関関係を調べるため、測定した風速と AQI のデータから相関係数を算出した。なお、ある時刻に吹いた風がそれ以降の AQI の値の変化に与える影響を調べるために、風が吹いてからの経過時間 (N 分) ごとに相関係数を算出した。図2に風速とその風が吹いてから N 分後の AQI の相関係数を示す。各実験日で最も相関が強かったのは、7月29日で $N=1$ のとき相関係数が 0.255、7月30日で $N=6$ のとき相関係数が -0.31、8月2日で $N=8$ のとき相関係数が 0.149 となった。相関関係が弱い理由としては以下のことが考えられる。

- AQI の値の変動の要因が、風以外にも存在する。
- 人間の健康に影響を与える AQI の基準が 100 であることに對して、AQI の値が相対的に低いことから変動が少ない。
- 風速が目視による 1 分間隔の測定であったために、誤差及び突発的な強風の測定漏れがある。

また、3 日間で算出した相関係数の正負が一致していないことから、日や時間帯によって相関関係が変化していることが推測される。これらの課題については第 6 章 議論で解決策について述べている。

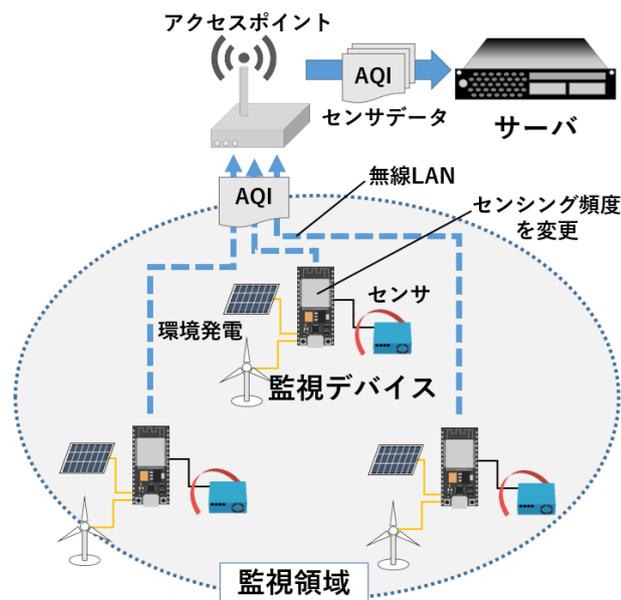


図 3 提案内容のコンセプト図

提案方式

図 3 に提案内容のコンセプト図を示す。図 3 は監視する領域（監視領域）にて太陽光パネルと風力発電機から得られる電力を監視デバイスに供給している。ここでの監視デバイスとは、センサデータを取得するセンサ、アクセスポイントを通してサーバと通信可能なマイクロコントローラの 2 つの総称である。監視デバイスは、大気成分センサから汚染物質の濃度を取得しており、近傍のアクセスポイントを通してセンサデータをサーバに送信している。このときマイクロコントローラは下記のアルゴリズムに基づいてセンシング頻度を変更する。

センシング頻度の変更方法は、AQI の変化量が大きいほどセンシング頻度を高くし、AQI の変化量が小さいほどセンシング頻度を低くすることとする。理由としては、AQI の変化量が大きいほど、センシングしていない期間の極値が正確に取れない可能性が高まるためである。そこで基礎実験のデータを用いて、センシング頻度を決定する方法を説明する。図 4 に提案手法のアルゴリズムの流れを示す。

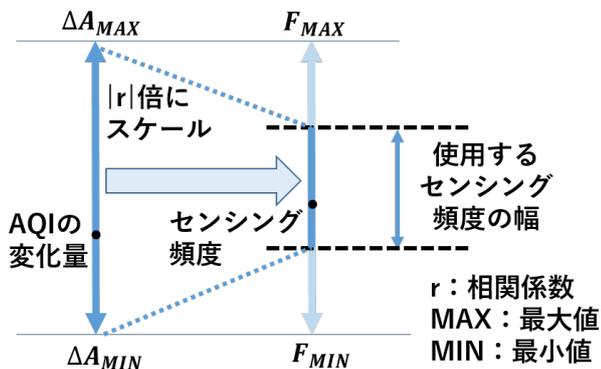


図 4 提案内容のアルゴリズム

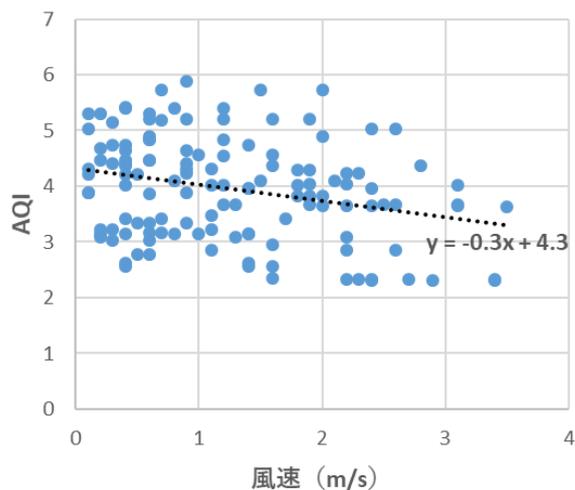


図 5 2021 年 7 月 30 日の風速と風が吹いてから 6 分後の AQI の散布図

まず、風速と風が吹いてから N 分後の AQI の相関関係のうち、最も強い相関関係を示したときの N の値を算出する。次に、風速と AQI の回帰直線の方程式より、風速から N 分後の AQI の値を算出する。次に、センシングしたときの AQI の値と回帰直線の方程式から算出した AQI の差から単位時間あたりの AQI の変化量を算出する。次に、AQI の変化量の最大値を ΔA_{MAX} 、最小値を ΔA_{MIN} とし、それぞれ 24 時間以内の過去の時系列データのうちの最大値と最小値とする。また、センシング頻度の最大値を F_{MAX} 、最小値を F_{MIN} とし、最大値はセンサの最大応答時間に 1 回、最小値は N 分に 1 回の頻度とする。したがって、センシング頻度の値は次のセンシングまでの時間の逆数（単位時間あたりのセンシング回数）となる。すなわち、次のセンシングまでの時間が短いほど F_{MAX} に近い値をとり、次のセンシングまでの時間が長いほど F_{MIN} に近い値をとる。その次に ΔA_{MAX} から ΔA_{MIN} までの取りうる全ての AQI の変化量に対して F_{MAX} から F_{MIN} までのセンシング頻度を均等に対応させ、相関係数の絶対値倍にスケールする。このときのセンシング頻度を「使用するセンシング頻度」とする。相関係数の絶対値倍にスケールする理由としては、相関係数の絶対値が 1 に近いほど使用するセンシング頻度の幅を大きくし、相関係数が 0 に近いほど使用するセンシング頻度の幅を小さくするためである。これは、相関係数の値によって回帰直線によって得られる AQI の値の信頼性が異なるためである。

次に、センシング頻度の具体的な算出方法について説明する。そこで例として、2021 年 7 月 30 日の基礎実験のデータをもとに、14:05 の風速と AQI の値から 14:05 の次にセンシングするまでの時間を算出する。図 5 に 2021 年 7 月 30 日の風速と風が吹いてから 6 分後の AQI の散布図を示す。14:05 の風速は 1.2m/s、AQI は 4.30 であった。ま

た、相関関係が最も高くなったときの相関係数は風が吹いてから6分後のとき (N=6) の相関係数で-0.31であり、そのときの回帰直線の方程式は $y = -0.3x + 4.3$ となった。したがって、1分あたりのAQIの変化量 ΔA は式 (4) によって0.06と算出される。

$$\Delta A = \frac{4.30 - (-0.2931 \times 1.2 + 4.3203)}{6} \approx 0.06 \quad (4)$$

また、図4における ΔA_{MAX} は2.87, ΔA_{MIN} は0であった。 F_{MAX} は、使用した大気成分センサ PMS5003 の最大応答時間より1秒に1回の頻度, F_{MIN} はN=6より6分に1回の頻度である [15]。したがって、 ΔA_{MAX} から ΔA_{MIN} に対して F_{MAX} から F_{MIN} までのセンシング頻度を均等に対応させ、相関係数の絶対値倍にスケールすると、次にセンシングするまでの時間 F は式 (5) によって232.82秒と算出される。

$$F = |-0.31| \times \frac{1 - 360}{2.87 - 0} \times 0.06 - \frac{(1 + |-0.31|)(1 - 360)}{2} \approx 232.82 \quad (5)$$

ユースケース・シナリオ

本提案が適用可能なユースケースシナリオとして、Village Green Project における運用が挙げられる。図6にユースケースシナリオにおける監視方法の図を示す。大気

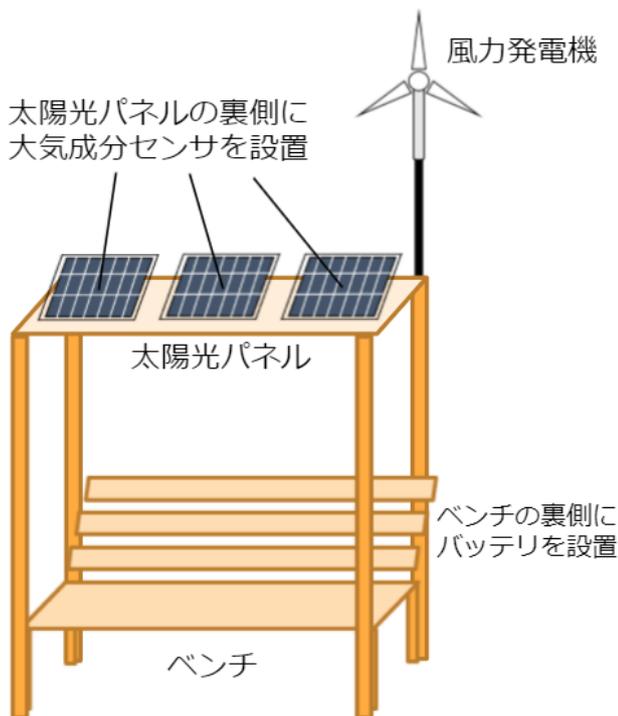


図6 ユースケース図

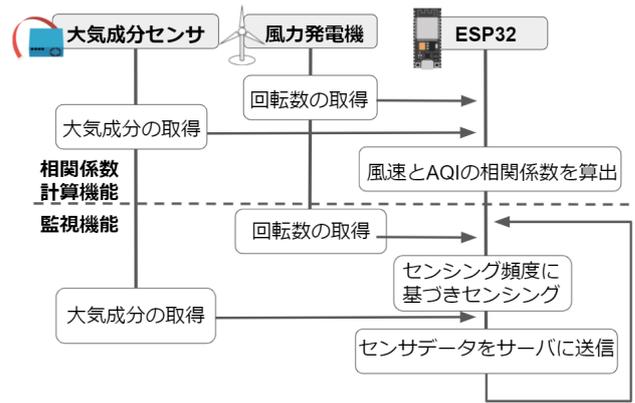


図7 ソフトウェアの実装図

成分センサの電力を太陽光発電と風力発電によって自給し、提案手法によって消費電力を削減することによって、Village Green Project の要件を満たすことが可能になる。したがって、それぞれの監視デバイスは商用電力による電力の供給が不要になるため場所の制限がなくなり、環境発電による持続的な監視が可能になる。

4. 実装と実験方法

実装

図7に開発するソフトウェアの構成図を示す。ソフトウェアは、AQIと風速の相関係数を算出する機能(相関係数計算機能)と監視時に大気成分データを取得する機能(監視機能)に分けられる。この二つの機能について以下に説明する。まず、センシング頻度を変化させる機能を実装するにあたって、AQIと風速の相関係数を算出する必要がある。したがって、大気成分を取得するモジュールと風力発電機の羽の回転数を取得するモジュールを作成し、センシングデータとして取得する。取得したデータから、風が吹いてからの経過時間Nの値を変動させたときのAQIと風速の相関係数を算出する。

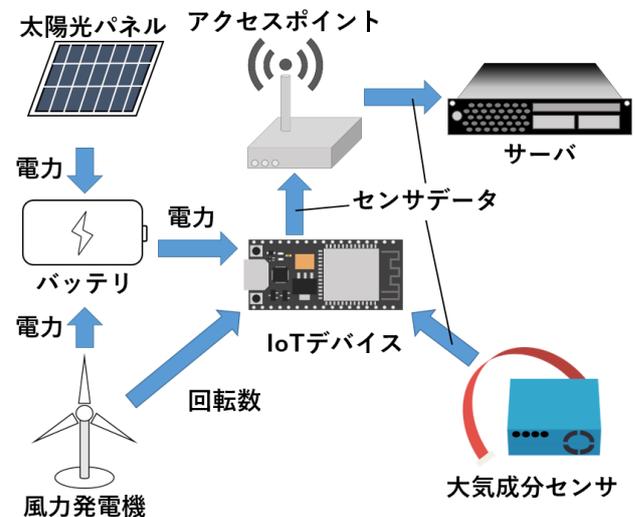


図8 ハードウェアの実装図

次に、監視機能について説明する。風力発電機の回転数を取得したのち、センシング頻度を決定するモジュールにセンシング頻度を参照する。そのセンシング頻度に基づいて大気成分を取得する。また、そのときの電流と電圧を取得し、取得したデータを1時間ごとにサーバに送信する。

図8にハードウェアの実装図を示す。図8のIoTデバイスはアクセスポイントを通してサーバと通信可能なマイクロコントローラのことである。バッテリーと大気成分センサが接続されており、太陽光パネルと風力発電機が発電することによって電力を供給している。風力発電機からは回転数も取得している。また、センサデータは近傍のアクセスポイントを通してサーバに送られる。

実験環境

実験環境は、基礎実験と同様の環境を予定している。東京工科大学構内のFOODS FUU 前広場においてAQIの監視を行い、電流値と電圧値を計測することによって消費電力を測定する。

5. 評価手法と分析手法

センシング頻度を一定にする手法と、変化させる本稿の手法の比較を行うために、それぞれの手法のAQIの監視状況における消費電力量を計測することによって評価を行う。また、取得したデータがどれだけ正しい値に近いかという正確度についても評価を行う。したがって、センサの最大応答時間である1秒ごとにセンシングする監視デバイスを用意し、そこで得られるデータを**正しい値**とする。評価するための実験期間は10日間とする。評価項目を以下に示す。

- (1) 1時間あたりの平均消費電力量 (mWh)
- (2) 取得したデータの正確度 (%)

消費電力量は、実験開始時から実験終了時までの時間で消費した電力量の1時間あたりの平均値とする。取得したデータの正確度は、正しい値に対して各手法で得られるデータがどれだけ近いかを百分率で表したものとす。なお、評価結果として、横軸が時間軸、縦軸が評価項目の時系列データとして折れ線グラフを作成する。また、1日分のデータを1セットとして、1セットごとに四分位数を算出することによって結果を分析する予定である。

6. 議論

本稿では、センシング頻度を風速に基づいて変化させることによってAQIの変化量が小さいときの消費電力を削減する手法を提案した。しかし、課題となる点が残されている。風速とAQIの相関関係が弱いことである。これは、大気成分の変化する要因が風速のみではなく、天候、風向き、地形、近隣の工場の稼働状況、交通状況にもあるからである。また、大学構内におけるAQIの値がもともと低い

ことによって変化量が小さいことが考えられる。したがって、場所を移動して実験を行う必要がある。移動先として都心である新宿中央公園を予定している。さらに、基礎実験では目視による風速の測定を行っており、1分おきの瞬時値を記録していた。そこで、1分の間で変化した値を加味するために10秒おきに記録し、それを平均化することで正確な相関係数を算出することを予定している。

また、今回行った基礎実験によって、相関係数の値が日や時間によって変化する可能性が高いということがわかった。このことから、相関係数を算出する期間を常に変更する必要がある。そこで、測定する時刻から24時間前までのデータを使用して相関係数を算出する方法を提案する。理由としては、大気汚染は人間の社会活動によって引き起こされるものであり、24時間が人間の社会活動の周期の一つだからである。

本提案では、風速とAQIの相関係数が0に近いほどセンシング頻度が一定になるため、風速とAQIに相関関係がない場合に従来のセンシング頻度を一定にする手法との差別化が図れないという課題がある。したがって、風速とAQIの相関関係がない場合には、Chatterjeaらが提案している測定したパラメータの変動性に基づくセンシング頻度の変更が必要になる[8]。相関係数によってセンシング頻度の算出方法を変えることによってセンシング頻度の変更が常時可能になる。例えば、相関係数が0.1以上のときに本提案を使用し、相関係数が0.1未満のときにAQIの値の変動性に基づいてセンシング頻度を変更することによって、相関関係がない場合においても省電力化が実現できる。

また、本提案のアルゴリズムではバッテリーの残量を考慮していない。したがって、監視デバイスを省電力化することができたとしても、マイクロコントローラが動作し続けるという保証はない。そこで、バッテリー残量を考慮して、バッテリー残量が少ないときほどセンシング頻度を低くする方法を提案する。ただし、第3章課題で述べた制約条件を満たす必要がある。

評価として10日間の実験を行う予定であるが、実験データの不足によって有意な結果がでなかった場合、さらに日数を増やして実験する予定である。

7. おわりに

本稿では課題として、環境発電による大気汚染の監視においてマイクロコントローラが動作し続けるという制約条件のもとに、消費電力量を削減する必要があるということあげた。そこで風速とAQIの関係から、風速によってセンシング頻度を変化させることによる省電力な監視を提案した。評価として、定期的にセンシングを行う手法と提案手法の電力消費量及び取得したデータの正確度の比較を行う予定である。

参考文献

- [1] United States Environmental Protection Agency(EPA): Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI), <https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf> (Retrieved 07/19/2021).
- [2] Ministry of the Environment Government of Japan: 環境大気常時監視マニュアル, https://www.env.go.jp/air/osen/manual_5th/chpt1.pdf (Retrieved 07/03/2021).
- [3] The World Air Quality Project: World’s Air Pollution: Real-time Air Quality Index, <https://waqi.info/> (Retrieved 07/03/2021).
- [4] CNN: インド、60万全村落への電力供給を達成 政府が宣言, <https://www.cnn.co.jp/business/35118694.html> (Retrieved 07/03/2021).
- [5] Vullers, R., van Schaijk, R., Doms, I., Van Hoof, C. and Mertens, R.: Micropower energy harvesting, *Solid-State Electronics*, Vol. 53, No. 7, pp. 684–693 (2009).
- [6] United States Environmental Protection Agency: Village Green Project, <https://archive.epa.gov/epa/air-research/village-green-project.html> (Retrieved 07/19/2021).
- [7] 杉本一彦, 串田高幸: 太陽光発電を用いた IoT デバイスの動的な省電力手法, CDSL-TR-041, 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部 クラウド・分散システム研究室 (2021.Feb.1).
- [8] Chatterjea, S. and Havinga, P.: An adaptive and autonomous sensor sampling frequency control scheme for energy-efficient data acquisition in wireless sensor networks, *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Springer, pp. 60–78 (2008).
- [9] Reilly, K. M., Birner, M. T. and Johnson, N. G.: Measuring air quality using wireless self-powered devices, *2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, pp. 267–272 (online), DOI: 10.1109/GHTC.2015.7343983 (2015).
- [10] Zhang, X., Zhang, M., Meng, F., Qiao, Y., Xu, S. and Hour, S.: A Low-Power Wide-Area Network Information Monitoring System by Combining NB-IoT and LoRa, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 590–598 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2018.2847702 (2019).
- [11] Folea, S. C. and Mois, G.: A Low-Power Wireless Sensor for Online Ambient Monitoring, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 742–749 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2014.2351420 (2015).
- [12] 小川智弘, 瀧本真理, 並河良治, 大西博文, 山田俊哉, 江橋英治, 小根山裕之, 大城 温, 大野順通: 道路環境影響評価の技術手法, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0383pdf/ks0383.pdf> (Retrieved 07/03/2021) (2007.6).
- [13] Larissi, I. K., Antoniou, A., Nastos, P. T. and Paliatsos, A. G.: The role of wind in the configuration of the ambient air quality in Athens, Greece, *Fresen Environ Bull*, Vol. 19, No. 9, pp. 1989–1996 (2010).
- [14] 高橋幹二: エアロゾル学の基礎, 森北出版 (2003.7).
- [15] Yong, Z.: 2016 product data manual of PLAN-TOWER — Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series data manual, <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/>

resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf (Retrieved 07/03/2021) (2016.6).