

様々な降雨状況における土砂災害センシング 情報送信スケジュール手法の性能評価

出原 聡[†] 小林 真[†] 新 浩一[†] 西 正博[†]

[†]広島市立大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

土砂災害による人的被害を低減するためには、土砂災害前兆現象を早期に検知する必要がある。土砂災害前兆現象は山間地で発生するため、設置するセンサシステムにはバッテリーや太陽光パネル、長距離通信が可能な回線が必要となる。太陽光パネルで電力を供給していることから、降雨にともなって発生する土砂災害時に十分な発電が行われない可能性が高い。本研究では、土砂災害をモニタリングすることを目的として、限られたエネルギーにより、土砂災害危険時にセンサデータを頻繁に送信するSBA (Soil water index and Battery Adaption) スケジューリング手法を提案する。

2 土砂災害モニタリングシステム

本研究で検討する土砂災害モニタリングシステムは、加速度センサ、太陽光パネル、バッテリー、LPWA (Low Power Wide Area) 通信モジュールから構成される。図1に土砂災害モニタリングシステムの構成を示す。地面に打ち込んだ杭にモニタリングシステムを取り付けて、土砂災害前兆現象としての土砂移動を加速度センサで捉える。

山間地でセンシングした加速度センサデータはLPWAを用いて、LPWA基地局経由でサーバに送信される。得られたセンサデータはサーバで収集・管理される。図2に、実際に山中に設置した土砂災害モニタリングシステムの写真を示す。

3 提案手法

土砂災害モニタリングシステムの送信間隔を決定するための送信スケジュール手法として、SBA スケジューリングを提案する。土砂災害モニタリングシステムでは、土砂災害危険時により頻繁にセンサデータを収集できる必要がある。センサシステムはサーバから土砂災害の危険度をダウンリンク通信で受信して、周囲の危険度を把握する。提案手法は、センサデータを送信するたびに、次にスリープ状態から復帰して送信するまでの間隔を、土壌雨量指数に応じた多段階送信間隔制御とバッテリー残量に応じた送信間隔制御の2つの制御手法に基づいて決定する。

本研究では、土砂災害危険時を土壌雨量指数に基づいて定義した。土壌雨量指数とは現在までの降雨による土壌に溜まった水分量を数値化した指標である[1]。また、土壌雨量指数が気象庁の大雨注意報を発令する基準である90を越えている時を、土砂災害危険時とした[2]。

3.1 雨量多段階制御

本システムは、通信端末としてLPWAを用いる。LPWAでは省電力化を実現するために端末と基地局とは常時接続しておらず、アップリンク通信をトリガとしてのみダウンリンク通信を行うことができる。土砂災害危険時以外にセンサシステムが全くデータを送信しないと、サーバから危険度を受信できないため、センサシステムは土砂災害危険時を察知することができない。さらに、土砂災害危険時になる直前の送信間隔を小さくしないと、土砂災害危険時になったことを察知することが遅れて、センサデータを長時間送信できない場合がある。

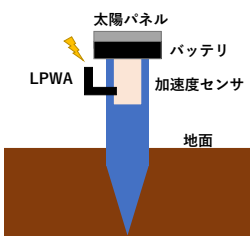


図1: システムの構成

図2: 山に設置したシステム

これらの課題を解決するため、提案手法では土砂災害危険時だけではなく、土砂災害危険時以外もセンサデータを送信するとともに、土壌雨量指数が土砂災害危険時の基準値 (S_{adv}) に近づくと送信間隔を短くする。具体的には、土砂災害の恐れがない時には長い送信間隔 T_{safe} [分] で、土砂災害危険時の土壌雨量指数となったときには短い送信間隔 T_{danger} [分] で、土砂災害危険時に近い土壌雨量指数になったときには送信間隔 T_{pre} [分] でデータを送信する。土壌雨量指数が土砂災害危険時の基準値に近づいたと判断する閾値として、土壌雨量指数を計算する際のタンクモデルにおける第1タンクの第2流出孔の深さ $L = 60$ mm を用いた[1]。この値は、表面流出が大規模に発生していることを表す。本研究では、土壌雨量指数が60以下の時を平常時、60以上90以下の時を豪雨時と定義した。

3.2 バッテリー適応制御

本システムは太陽光パネルから電力を得ているため、使用可能な電力には限りがある。土砂災害が発生するような降雨が続いて太陽光パネルの発電量が低下している状況では、送信間隔を短くして過度な送信を行うとバッテリー切れを起こして、結果的にセンサデータを長時間送信できなくなる。

この課題を解決するために、提案手法ではバッテリー残量に応じて平常時の送信間隔 T_{safe} [分]、豪雨時の送信間隔 T_{pre} [分]、土砂災害危険時の送信間隔 T_{danger} [分] を決定する。よりバッテリーの残量が多いほど送信間隔を短くして、バッテリーの残量が少ないほど送信間隔を長くする。

例えば、土砂災害危険時には、送信間隔 T_{danger} を、送信間隔の最小値 (T_{danger}^{\min}) にバッテリー残量割合の逆数を乗じた値にする ($T_{danger}^{\min} \times \frac{B_{full}}{B_{remain}}$)。 B_{full} [Wh] はバッテリー容量、 B_{remain} [Wh] はバッテリー残量である。但し、土砂災害危険時にバッテリー残量が少ない状況であったとしても、送信間隔を長くしすぎると土砂災害発生を捉えることができない。これを防ぐため、危険時の最大送信間隔 (T_{danger}^{\max}) を設定した。土砂災害危険時の送信間隔 (T_{danger}) は、以下の式(1)になる。

$$T_{danger} = \min \left(T_{danger}^{\min} \times \frac{B_{full}}{B_{remain}}, T_{danger}^{\max} \right) \quad (1)$$

平常時の送信間隔 T_{safe} と豪雨時の送信間隔 T_{pre} も、送信間隔の最小値、最大値をそれぞれ設定する。

4 評価

4.1 評価環境

SBA スケジューリングの性能を明らかにするために、実際の気象記録を用いた計算機シミュレーションにより、土砂災害危険時における最悪未送信時間を評価した。最悪未送信時間とは、シミュレーション期間中で土砂災害危険時にセンサデータを最も長い間送信しなかった時間のことである。提案手法の有効性を示すため、以下の5つの手法と比較した。

1. 一定間隔送信手法 (一定間隔): 一定の間隔でセンサデータを送信する手法である。一定間隔送信手法と提案手法を比較することで、提案手法の送信間隔を変化させる制御の消費電力節約の効果が見られる。本稿のシミュレーションでは送信間隔を1分とした。

2. LQ-Tracker[3]: 実行時間とスリープ時間のデューティ比をバッテリー残量により決定して、バッテリー残量を目的値に保つ手法である。この手法は環境発電型センサシステムにおいて、定期的にセンシングすることを目的としている。本稿では、LQ-Trackerのデューティサイクルを1時間、目標値を65%とした。実行時間中は1分毎の送信を行うものとした。

3. 土壌雨量指数に応じた多段階送信間隔制御手法 (雨量指数適応型): 提案手法 SBA スケジューリングの土壌雨量指数に応じた多段階送信間隔制御のみを行う手法である。土壌雨量指数 (S) に応じて多段階に分けた送信間隔はそれぞれ T_{safe} を 60 分, T_{pre} を 30 分, T_{danger} を 1 分とした。本手法と提案手法を比較することで, 提案手法がバッテリー残量に応じてセンサデータを送信する効果が明らかとなる。

4. バッテリー残量に応じた送信間隔制御手法 (バッテリー適応型): 提案手法 SBA スケジューリングのバッテリー残量に応じた送信間隔制御のみを行う手法である。土砂災害の危険性が少ない平常時 ($S < S_{adv}$) には送信間隔 T_{safe}^{min} は 60 分, T_{safe}^{max} は 120 分とした。土砂災害危険時 ($S_{adv} \leq S$) には送信間隔 T_{danger}^{min} は 1 分, T_{danger}^{max} は 30 分とした。本手法では豪雨時に送信間隔を短くするという制御を行わない。本手法と提案手法とを比較すると, 提案手法が豪雨時に送信間隔を短くする効果が明らかとなる。

5. SBA (Soil water index and Battery Adaption): 3 節で述べた提案手法である。 T_{safe}^{min} は 60 分, T_{safe}^{max} は 120 分, T_{pre}^{min} は 1 分, T_{pre}^{max} は 60 分, T_{danger}^{min} は 1 分, T_{danger}^{max} は 30 分とした。

4.2 長期的な雨天が続く気象状況での評価

長期的な雨天は土砂災害の危険性を高くして, 全天日射量の減少によるバッテリー残量の低下を引き起こす。各手法が長期的な雨天に対する性能を明らかにするため, 豪雨が続くことを想定した気象状況でシミュレーションを行った。気象庁の 2018 年広島県の記録を参考として, 雨天の日の 10 分間降水量は 0.83 mm とした。 h 時における全天日射量 (L MJ/m²) は, 以下の式に基づいて算出する。 $L = \max(L_{max} \sin((h - 6)\pi/12), 0)$ 但し, L_{max} は 12 時の 1 時間全天日射量で $L_{max} = 0.30$ MJ/m² とした。パネルの発電能力を 2 W, バッテリー容量を 20 Wh, 初期残量を 20 Wh とした。

図 3 に雨天が続いた時の最悪未送信時間を示す。横軸は雨天が続いた日数, 縦軸は最悪未送信時間 [秒] である。全ての手法で, 雨天が 6 日以上続く状況では, 雨天が続けば, 最悪未送信時間が増加している。これは全ての手法において雨天が 6 日間続くこととバッテリー切れが生じるためである。但し, 広島の 2011 年から 2020 年の気象記録によると, 12 時の 1 時間全天日射量が 0.30 MJ/m² 以下を記録した日は, 5 日以上連続しない。

雨天が 3 日以内のとき, 一定間隔送信手法が最も小さい最悪未送信時間を達成する。但し, 連続雨天日数が 3 日のとき, SBA スケジューリングの最悪未送信時間は約 160 秒である。土砂災害における避難を考えると小さい値であると考えられる。雨天が 4 日続いたとき, SBA スケジューリングの最悪未送信時間は約 300 秒 (約 5 分) であるのに対して, 一定間隔送信手法は約 12000 秒 (約 2 時間) である。約 2 時間は避難の観点から考えると大きな値である。そのため, SBA スケジューリング手法は, 土砂災害における避難を促すための土砂災害前兆現象の検知に有効であると考えられる。

4.3 晴天連続 5 日後, 雨天連続 5 日の気象現象での評価

5 日間晴天が続いた後に, 5 日間雨天が続く気象状況でシミュレーションを行った。5 日間の晴天で得られる限られた日射量で蓄電を行い, 蓄電されたバッテリー残量を効率良く使用

できるかを明らかにする。晴天の日の 10 分間降水量は 0 mm とする。1 時間全天日射量は 6 時を日の出, 18 時を日の入として, 12 時の 1 時間全天日射量を 1.96 MJ/m² とした。雨天の日の降水量と全天日射量は, 4.2 節の評価と同一のものとした。バッテリー容量を 20 Wh, 初期残量を 0 Wh とした。

図 4 に晴天が 5 日続いた後, 雨天が 5 日続く気象状況での最悪未送信時間を示す。横軸は太陽光パネルの発電能力 [W], 縦軸は最悪未送信時間 [秒] である。SBA スケジューリングとバッテリー適応型手法と LQ-Tracker は太陽光パネルの発電能力が 2.2 W 以下のとき, 他の手法に比べて, 最悪未送信時間が小さい。3 つの手法はバッテリー残量に応じて送信間隔を決定しているため, バッテリー残量の節約を実現できている。他の手法はバッテリー残量が少ない場合であっても, 過剰に送信して, 早期にバッテリー切れが発生している。太陽光パネルの発電能力が 2.2 W 以上のとき, SBA スケジューリングとバッテリー適応型手法と LQ-Tracker の中でも, SBA スケジューリングが最悪未送信時間を最も小さくできている。これは SBA スケジューリングが土砂災害危険時になる以前に送信間隔を短くして, 早期に土砂災害危険時であることを察知して, 送信間隔を短くできているからである。

4.4 2018 年広島における気象データを用いた評価

実際の気象現象における性能を評価するために, 実際に広島県内で土砂災害が発生した 2018 年の 10 分間降水量 [mm] と 1 時間全天日射量 J [MJ/m²] を用いて評価した [4]。バッテリー容量を 20 Wh, 初期残量を 0 Wh とした。

図 5 に 2018 年の広島の気象における最悪未送信時間を示す。横軸は太陽光パネルの発電能力 [W], 縦軸は最悪未送信時間 [秒] である。提案手法である SBA スケジューリングは太陽光パネルの発電能力が 1.5 W から 2.8 W とき, 最も最悪未送信時間を小さくできている。2.9 W 以上のとき, SBA スケジューリングの最悪未送信時間は約 160 秒以下, 一定間隔送信手法は約 60 秒である。土砂災害における避難を考えると共に小さい値であると考えられる。このことから, 避難を促すための土砂災害センシングシステムとして, 提案手法が有効であると考えられる。

5 おわりに

本研究では, 土砂災害前兆現象を早期に検知する, センシング情報送信スケジュール手法として, SBA スケジューリングを提案した。連続する雨天の気象状況と晴天日数が少ない気象状況, 2018 年の広島の気象記録を用いた計算機シミュレーションを行った。その結果, 土砂災害危険時になる 3 つの気象状況であっても, 最悪未送信時間を小さくできた。

参考文献 [1] Y. Ishihara et al., “Runoff model for flood forecasting,” Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Jul. 1979.

[2] 広島地方気象台, “警報・注意発表基準一覧表 (広島県),” https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/hiroshima/kijun_3410000.pdf. (2022/1/4 閲覧)。

[3] C.M. Vigorito, et al., “Adaptive control wireless sensor networks,” in Proc. of IEEE SECON '07, Jun. 2007.

[4] 気象庁, “過去の気象データを検索,” <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (2022/1/4 閲覧)。

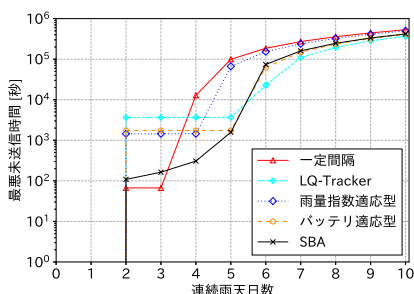


図 3: 長期雨天が続く気象状況に対する最悪未送信時間

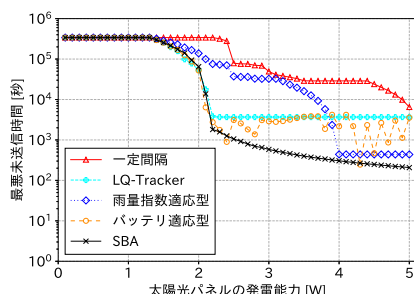


図 4: 太陽光パネルの発電能力に対する最悪未送信時間

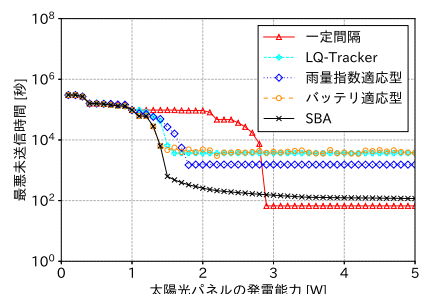


図 5: 2018 年広島における気象における最悪未送信時間