

Bluetooth Low Energy マルチホップ通信を用いた 斜面崩壊予兆検知システムの実装と評価

藤本まなと¹ 松本誠義¹ 諏訪博彦¹ 荒川豊¹ 侯亜飛¹
塚本悟司² ウエバージュリアン² 矢野一人² 畑山満則³

概要：近年、台風やゲリラ豪雨等の影響により大規模な土砂災害が頻発している。これらに伴って短期的に危険性が增大した際の斜面崩壊の予兆検出やリアルタイムモニタリングが求められている。これまでの方法としては、センサ杭をもちいた簡易斜面変位監視システムの利用などがあるが、導入コストや敷設リスク、システムの拡張性などの問題を抱えている。本稿では、これらの問題を解決するため、Downhillと呼ばれる斜面崩壊の早期検知と警報を目的とした新たなシステムを提案する。Downhillは、センサ端末として中古スマートフォンを用いており、高所の警戒区域から麓の中央端末サーバまでセンシングデータを届けるため、各センサ端末はBluetooth Low Energy (BLE)を利用したアドホックネットワークによって接続されている。Downhillでは、センサ端末が斜面の崩壊を検知した時、BLEネットワークを介して加速度データやGPSデータをサーバまでマルチホップ通信を用いて送信することでデータを収集・監視・警告を行う。我々は、実際にDownhillを実装し、斜面崩壊の警戒地域においてDownhillが利用可能かどうかを調査するための実地実験を行った。その結果、安定したマルチホップ通信を実現し、斜面崩壊の警戒地域においても有効にDownhillが利用できることを確認した。

Implementation and Evaluation of Slope Failure Detection System Using Bluetooth Low Energy-based Multi-Hop Communication

MANATO FUJIMOTO¹ SEIGI MATSUMOTO¹ HIROHIKO SUWA¹
YUTAKA ARAKAWA¹ YAFEI HOU¹ SATOSHI TUSKAMOTO²
JULIAN WEBBER² KAZUTO YANO² MICHINORI HATAYAMA³

1. はじめに

近年、台風やゲリラ豪雨等の影響により山間部において大規模土砂災害が多数発生しており、減災対策が急務となっている。大規模な土砂災害が発生すると、河川に土砂ダムが堆積し、決壊すると下流域の集落に甚大な被害を及ぼすため、堆積した土砂の短期的な監視が必要となる。このような状況において、土砂災害の原因となる斜面崩壊の予兆や発生の検知を比較的容易かつ即時設置できるシステムを構築する技術が望まれている[1]。

上記のような斜面崩壊検知システムを実現するには、次の5つの要件、1)安価に構築可能であること、2)多数の無線インターフェースを有していること、3)斜面崩壊を検知するための多数のセンサを有していること、4)耐久性があること、5)防水性があること、が望まれる。

これまでの斜面崩壊検知システムの候補として、センサ杭[2]がある。このシステムは、斜面の変位を監視するセンサ杭と通信のためのゲートウェイ、PCなどから構成される。本システムは、斜面崩壊検知において一定の効果はあるが、

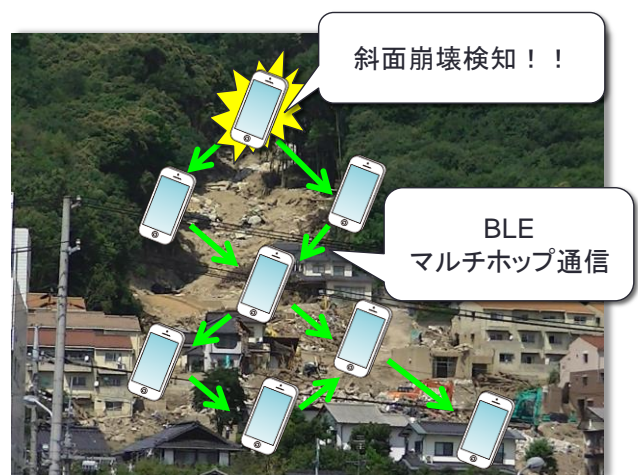


図1 Downhill：斜面崩壊予兆検知システム

このシステムに利用される傾斜計や歪計等のセンサは非常に高価であるため、広範囲に設置することへの障壁となっている。また、Raspberry PiやArduino等も候補として考えられるが、通信機能を持たせるために3Gモジュールなどを取り付けなければならないため、高価となる。電池、充放電回路、センサの取り付け、防水化などを考えると、Raspberry PiやArduino自体が大きくなることが懸念されるため、扱いにくくなる。さらに、ワイヤセンサ[3]を用いた

¹ 奈良先端科学技術大学院大学, Nara Institute of Science and Technology

² ATR 波動工学研究所, ATR Wave Engineering Laboratories

³ 京都大学, Kyoto University

手法も候補ではあるが、有線はケーブルの切断等の恐れがあり、監視対象地域の状況によっては、敷設が困難となる場合もある。本研究では、これら問題点を解決するため、スマートフォンアプリケーションによる M2M 型無線センサネットワークを構築し、斜面崩壊予兆検知システムの実現を目的として研究開発を行う。

提案システムは **Downhill** と呼ばれ、斜面崩壊の早期検知と警報を目的としたセンサネットワークシステムである。Downhill では、センサ端末として中古スマートフォンを用いる。中古スマートフォンを用いる理由は、多数の無線インターフェースと多数の無線センサを元々有しており、電池や充放電回路、デバッグ用ディスプレイまで備えている。また、防水のものも多く、年間 10 億台程度の中古スマートフォンが市場に流通するため、非常に安価に入手可能である。そのため、災害時に壊れたとしても使い捨てが可能であるという利点も有する。図 1 に示すように、Downhill では、高所の警戒区域から麓の中央端末サーバまでセンシングデータを届けるために各センサ端末は BLE (Bluetooth Low Energy)[4]を利用したアドホックネットワークによって接続されている。Downhill においてセンサ端末が斜面の崩壊、すなわち地滑り、を検知した時、BLE ネットワークを介して加速度データや GPS データをサーバまでマルチホップ通信を用いて送信することでデータを収集し、監視・警告を行う。以下に Downhill の貢献をまとめる。

- **コストの削減効果**：本システムはスマートフォンさえあればそれ以外のコストは必要がないため、センサ杭を用いたシステムと比べて安価である。
- **システム敷設の簡便性**：システム敷設は、ある一定距離にスマートフォンを置くだけなので、危険な山中における敷設のリスクを低減できる。
- **システムの拡張性**：Downhill をダウンロードすることでセンサ端末としての複製ができるため、必要に応じてセンサ端末数を簡単に増やせる。
- **低消費電力システム**：BLE アドホックネットワークを用いているため、低消費電力なシステムである。

Downhill は ACM HotMobile 2016[5]において、既にデモ発表を行っている。そこで本研究では、奈良先端大構内でのマルチホップ通信実験や土砂災害の発生が危惧されている滋賀県湖南市の山中において Downhill が利用可能かどうかを調査するための実地実験を行った。その結果、安定したマルチホップ通信を実現し、斜面崩壊の警戒地域においても有効に Downhill が利用できることを確認した。

本稿では、これらをまとめたものであり、第 2 章では、斜面崩壊予兆検知システムの必要性について述べる。第 3 章では、提案システムである Downhill について述べる。第 4 章では、斜面崩壊の警戒地域における Downhill マルチホップ通信実験について述べる。第 5 章では、本論文における結論を述べる。

2. 斜面崩壊予兆検知システムの必要性^[6]

本章では、斜面崩壊予兆検知システムが利用される想定環境と現状の課題について述べる。2.1 節では、想定環境について述べる。2.2 節では、現状の課題を述べる。

2.1 想定環境

本研究において想定している監視対象エリアは、山間部等の斜面が存在する場所、かつ傾斜や土壌の関係から斜面崩壊が発生する可能性があるエリアである。いわゆる、土砂災害警戒区域や特別警戒区域が本研究における想定エリアに含まれる。このような場所に対して長期的な降雨もしくは集中的な豪雨などが発生した場合、土砂災害発生のリスクが極めて高まるため、短期的な経過観察が必要となる。

経過観察に関しては、斜面崩壊の予兆検知が非常に重要であり、降雨量、斜面の滑り、土中水分量等の把握が必要不可欠である。当然、データを取得するエリアは極めて危険なエリアであらうため、人手によるデータ収集は避けなければならない。そのため、センサによるモニタリングが求められると同時に、観測結果は離れた安全な場所で確認できる必要がある。

観測結果は、避難タイミングの判断に使用されることが想定されるため、できるだけリアルタイムかつ切れ目のないモニタリングが求められる。

2.2 現状の課題

上記のような状況に対して、従来の経過観察の方法としては、センサ杭を用いた手法[2]やワイヤセンサを用いた手法[3]が提案されている。しかし、これらの手法は以下の2つの課題がある。

第一の課題は、コストである。例えば、センサ杭は、1本17万円であり、通信距離は約100-300m程度であるため、仮に直線で1kmの範囲をカバーしようとする平均200mの通信距離が必要であると想定して5本必要となる。さらに、情報を集約するゲートウェイが65万円、ゲートウェイの電源を確保するためのソーラー電源として40万円が必要となる。さらに、データをサーバにアップロードするための通信費として、月4万円程が必要とされる。加えて、サーバと通信するためのPCも必要となり、合計約200万円となる。短期的な斜面崩壊監視システムとしては、コストの削減が課題となる。

第二の課題は、敷設の危険性・困難性である。従来システムの設置には、最低2名以上の人員が必要であり、半日から1日必要となる。センサ杭は地面に刺して設置するため、かけやによる打ち込みが必要となる。なお、玉石混じりの地盤の場合、スコップなどで掘り越して設置する必要がある。土砂災害などの災害現場は人の立ち入りが困難であり、斜面の状態を検知するセンサ端末の敷設には大きな危険を伴う。端末設置の際の敷設作業者の安全を確保するには、空中からの端末の撒布など、人の立ち入りを必要としない

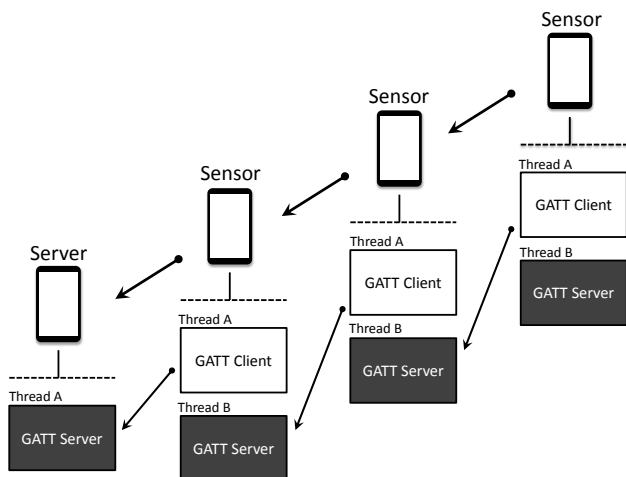


図2 Downhillにおける接続の構成

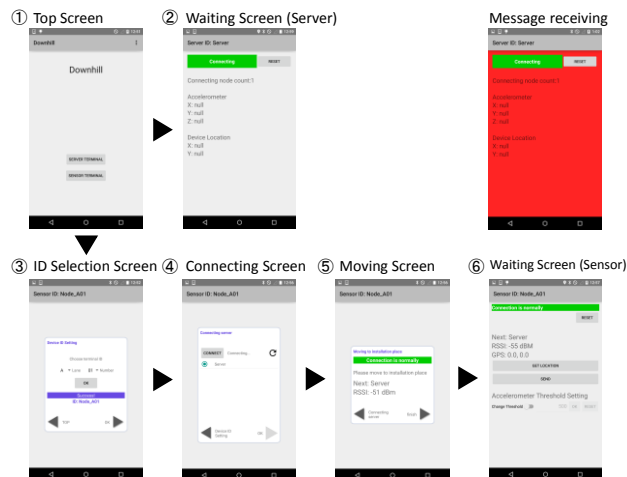


図3 Downhillの画面構成図

簡易な方法での端末敷設が求められている。このような簡易な端末設置を行う場合、端末間の伝送性能を考慮した精密な設置位置調整を望むことはできない。

上記のように、従来システムは、平常時を含めた長期的な監視を目的とする際には有効であるものの、土砂災害が高まったエリアにすばやく対応するシステムとしては、コストおよびシステム敷設に課題がある。そこで、我々はこれらの課題を解決する新たな斜面崩壊予兆検知システムを提案する。

3. Downhill: BLE マルチホップ通信を用いた斜面崩壊予兆検知システム

本章では、上記の問題点を解決するため、Downhillと呼ばれるBLEマルチホップ通信を用いた斜面崩壊予兆検知システムについて述べる。3.1節では、提案システムの概要を述べる。3.2節では、利用の流れと通信方式について述べる。3.3節では、Downhillの画面構成について述べる。3.4節では、Downhillの利点を述べる。

3.1 概要

本節では、提案システムであるDownhill、BLEマルチホップ通信を用いた斜面崩壊予兆検知システムについて述べる。

Downhillは、斜面崩壊の検知と警報を目的としたセンサネットワークシステムである。山岳部における環境センサとしてセンサ杭[2]などが提案されているが、これらは複数本配置することが前提である上に、それぞれ高価であることから導入のハードルになっている。そこで、中古で販売されているスマートフォンの内蔵センサによって斜面崩壊を検知することで、従来システムに比べてコストを抑える。この時、スマートフォンはそれぞれ警戒区域から麓の中央端末(サーバ)までセンシングデータを届けるアドホックネットワークによって接続されており、高所から麓まで線形的に配置することを想定している。

Downhillにおいてセンサ端末が斜面の崩壊、すなわち地滑り、を検知した時、BLEネットワークを介して加速度データやGPSデータをサーバまでマルチホップ通信を用いて送信することでデータを収集し、監視・警告を行う。

3.2 Downhillの利用手順と通信方式

Downhillによる通信を行うために各端末はデジチェーの様に線形な接続を行う。Downhillを利用する際は、はじめに以下の手順を追って端末の配置を行う。

1. 配置を決め、静的なネットワーク構成を決定
2. サーバに相当する端末のDownhillをサーバモードで起動
3. センサ端末のDownhillをセンサモードで起動し、Next-Hopとなる端末をスキャンして接続
4. 通信が正常に行えていることを確認しながら、配置場所に移動
5. 移動を完了し、受信待機画面に遷移

上記の手順3~5の行程を繰り返しながら、センサ端末を配置していく。

BLEを利用する各端末は、GATT (Generic Attribute Profile) というデータ転送の定義に則り、データ送信側をGATT Client、受信側をGATT Serverとして振る舞うように設定する必要がある。GATTの役割はデータ送信の方向により決まり、Central端末やPeripheral端末というマスター・スレーブの関係に依存しないものとして扱われている。

図2は、Downhillにおける接続の構成を示している。サーバモードのDownhillは常にGATT Serverとして接続構築用のアドバタイズメントパケットを送出し、Clientとして接続を行ったセンサ端末からの接続とメッセージを待ち受ける。また、上記手順5において、受信待機画面に遷移したセンサモードのDownhillもまた、GATT Serverとしてアドバタイズメントパケットを送出する。これにより次のセンサ端末からスキャンすることや、メッセージを受信してNext-Hopに転送する処理が可能となる。

3.3 Downhillの画面構成

図3にDownhillの画面構成を示す。以下に、それぞれの画面について説明する。

① モード選択画面

Downhillを起動すると、まず初めに、その端末をセンサ端末とサーバ端末のうちどちらにするかを決定するモード選択画面が開く。基本的には、初めの1台目をサーバモードで利用し、その後の端末はセンサモードを利用する。

② サーバ待機画面

①モード選択画面にてサーバ端末を選択すると、サーバ待機画面に遷移する。この画面では、GATT Serverとしてアドバタイズメントパケットを送出し、センサ端末からの接続を待ち受ける。画面上部には接続の状態を示すステータス表示があり、接続を受け付けると緑色、接続待ちの状態だと赤色に変化する。また、メッセージを受け取ると、3秒間、画面が赤く変化し、正しく受信したことを知らせる。

③ ID選択画面

画面③~⑥はモード選択画面にてセンサ端末を選択した場合に遷移する画面である。ID選択画面は、センサ端末の端末IDを決定する。この端末IDはBluetoothのデバイス名を示す。Downhillでは、標高の高い所から麓までのルート(列)を示すアルファベットと、通し番号を示す数字の組み合わせを、一意なIDを設定する。例として、A列の1番目を選択すると、その端末のデバイス名は『Node A01』となる。IDを設定し終わると、④接続画面へと遷移する。

④ ID選択画面

この画面では、Next-Hop(自分より一つ標高の低い端末)と自身の接続を構築する。この画面を開くと自動でアドバタイズメントパケットのスキャンが開始され、発見されたGATT Serverが画面中央のリストに表示される。ここから一つを選び、Connectボタンを押すことで接続が構築される。他の端末の状態が変わった時などにはScanボタンを押下することで、再度スキャンを行うことが可能になっている。接続の構築が完了すると、⑤移動画面へと遷移する。

⑤ 移動画面

この画面は、接続が正しく張れていることを確認しながら、端末を設置場所まで移動することを目的としている。画面上部には接続のステータス表示が行われ、正しく接続されている時には緑色、接続が途絶えた場合には赤色で示される。画面中央にはRSSI(電波強度)が表示されており、距離を取る際の参考にすることができる。接続が途絶えると、再接続待ちの表示が行われ、Next-Hopの場所へと少しずつ戻るように利用者を促す。再度、接続が復活すると、表示は元に戻る。利用者は、これを利用して接続が途絶えない距離を保って設置する。設置完了すると、⑥センサ待機画面へと遷移する。



図4 配置と通信の向き

⑥ センサ待機画面

この画面に遷移すると、センサ端末の設置は完了する。この画面では、送信ボタンを押下することによってNext-Hopへとメッセージを送信することが可能である。また、この画面に到達すると、GATT Serverとしてアドバタイズメントパケットを送出する。これにより、他のセンサ端末からの接続を受けることが可能になる。他のセンサ端末からメッセージを受け取った場合、サーバと同じく3秒間画面が赤く変化しながら、Next-Hopへとそのメッセージを転送する。これにより、最終的にメッセージはサーバへと届けられる。

3.4 Downhillの利点

Downhillはスマートフォンさえあればそれ以外のコストは必要ない。そのため、従来システムに比べて安価である。システム敷設に関しては、ある一定距離にスマートフォンを置くだけであるため、危険な山中における敷設のリスクを低減できる。また、Downhillをダウンロードすることでセンサ端末としての複製ができるため、必要に応じてセンサ端末数を簡単に増やすことが可能である。さらに、DownhillはBLEアドホックネットワークを用いているため、低消費電力なシステムであるという利点を持つ。

4. Downhill マルチホップ通信実験

本章では、Downhillを用いたマルチホップ通信実験について述べる。4.1節では、奈良先端大構内によるDownhill予備実験について述べる。4.2節では、滋賀県湖南市の土砂災害が危惧される場所でのDownhill実地実験について述べる。

4.1 奈良先端大構内における予備実験

4.1.1 予備実験の概要

屋外環境において10ホップ通信が行えることを確認するため、奈良先端大構内の直線状に開けた路上においてDownhillの予備実験を行った。配置と通信の向きを図4に示す。使用端末はNexus 6を11台用い、それらを線形的に配置した。各端末は三脚により地上40cmほどの高さに固定した。配置場所として、南端にサーバ端末を設置し、そこから北

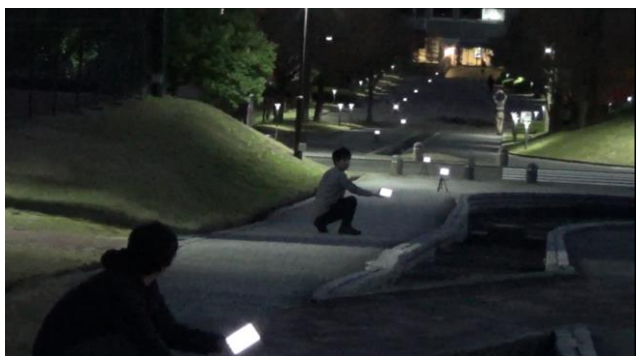


図5 Downhill予備実験の様子

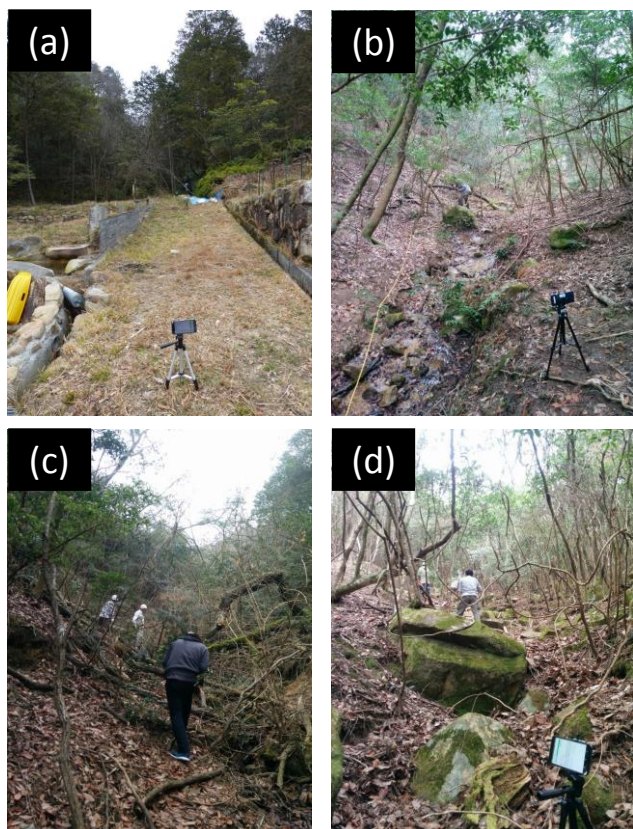


図6 現場の見通しと環境

に向かってセンサ端末を配置していくように設定した。メッセージの送信は、ボタンの押下により可能であるが、端末を揺らすことによってもメッセージを送信することが可能である。この挙動は斜面崩壊の検知を想定している。

4.1.2 予備実験の結果

本実験では、サーバ端末から順に接続を構築し、センサ端末を追加するごとにメッセージの送信が行えていることを確認した。その際、各端末の間の距離は安定して通信できる最も遠い距離を測るため、通信が安定する距離を探りながら設置した。図5にDownhill予備実験の様子を示す。

結果として、北端の端末からのメッセージは順に転送され、10ホップを介して正常にサーバ端末まで届くことを確認した。安定して通信が可能な各端末の間隔は約20m程度であった。距離がそれよりも開いていると、接続が不安定

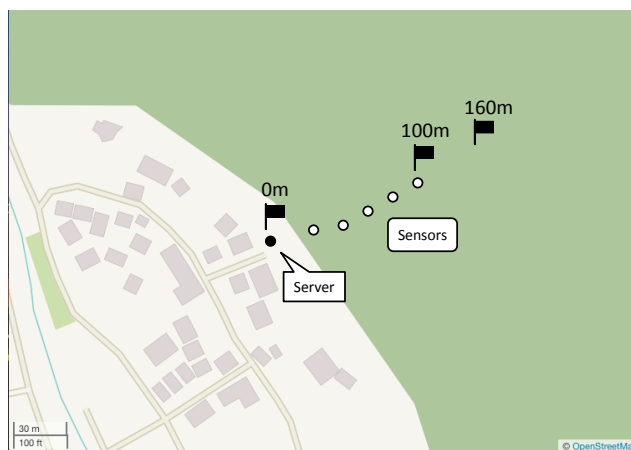


図7 各端末の配置（鳥瞰）

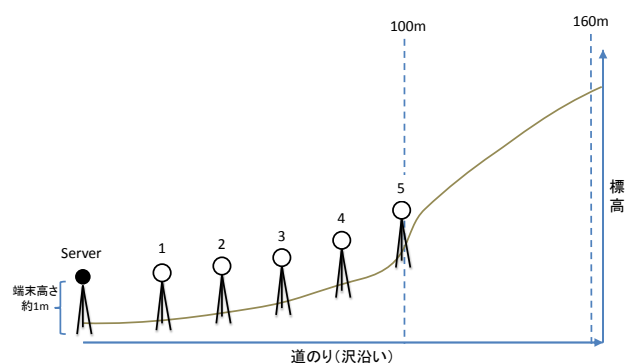


図8 各端末の配置（道のりと高さ）

となり、複数人の歩行者が端末間を横切る際などに接続が切断されることがあった。

また、遠方で接続が切断されると、その位置で再びアダプタイズメントパッケージを見つけることはできず、10mほどの距離まで近づく必要があることがわかった。

4.2 滋賀県湖南市における Downhill 実地実験

4.2.1 実験の概要

上記の予備実験を踏まえ、実際の環境でマルチホップ通信が行えることを確認するため、斜面崩壊の警戒地域である滋賀県湖南市の山中において実地実験を行った。図6に現場の見通しと環境を示す。実験対象の環境は、斜面崩壊の危険性が高い沢沿いを、上流に向けて160mまでとした。100mまでは木々に覆われて足場も悪いものの、比較的なだらかな傾斜であったが、100mから先は支えなしに歩行するのが極めて困難な急傾斜であった。

また、実地実験の初期段階において、地表面の倒木や起伏によって端末の設置の高さは通信距離に影響する事がわかった。そこで本実験では、端末の設置高さの調整に三脚を用いて、ある程度見通しを確保できる高さ（1m）と、地表近くに端末を配置した場合（約30cmもしくは地面に直置き）を設定した。メッセージの送信方法は、端末を揺らすことによって行った。これは斜面崩壊の検知を想定しているためである。

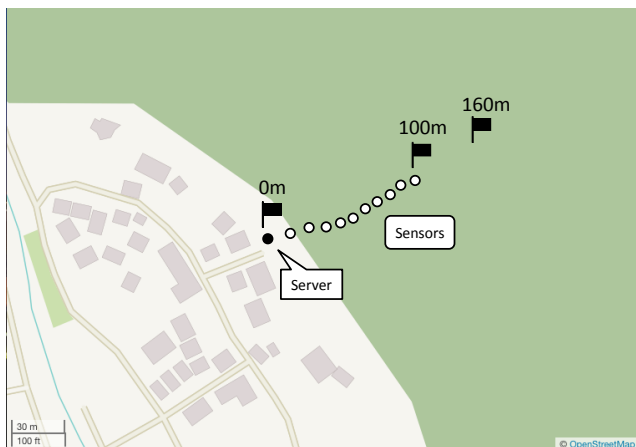


図9 各端末の配置（鳥瞰）

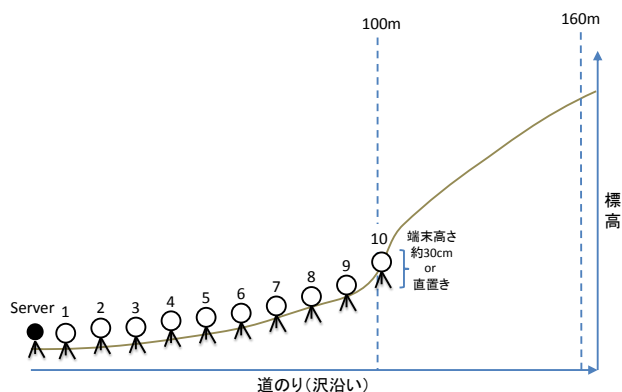


図10 各端末の配置（道のりと高さ）

本実験において、我々は上記の端末の高さの調査に加えて、以下の3つの実験、(1)沢沿い100mの距離優先マルチホップ実験、(2)沢沿い100mのセンシング環境マルチホップ実験、(3)急傾斜地のセンシング環境マルチホップ実験、を行った。実験端末には予備実験と同様のものを用いたが、電波の出力パラメータを高める調整を行っており、見通しの良い平地での通信可能距離は約60m程度まで増加している。

4.2.2 沢沿い100mの距離優先マルチホップ実験

沢沿い100mの距離優先マルチホップ実験について説明する。まず、各端末の地表からの高さを約1mに設定して見通しを確保した状態で麓に設置したサーバ端末から沢沿いに100m先までメッセージを送信可能な最小ホップ数を調査した。設置方法は予備実験と同様で、通信が切れる距離まで遠ざかりながら、安定して通信できる限界の距離を探る方針をとった。沢沿いに5m間隔で目印の付いたロープを張り、5m刻みで設置場所を決定することによって、だいたいの距離の計測を行った。配置場所を図7及び図8に示す。

結果として、サーバ端末を含めた6台による5ホップで通信が行えた。それぞれの距離はサーバ端末から1番目のセンサ端末までの距離がおおよそ約30mで残りの端末は20m弱であった。今回の実験中、最も接続が不安定になった箇所は、ちょうど山に入り込む辺りに設置された1番目のセンサ端末と2番目のセンサ端末の間であった。また、最大距離での



図11 各端末の配置（鳥瞰）

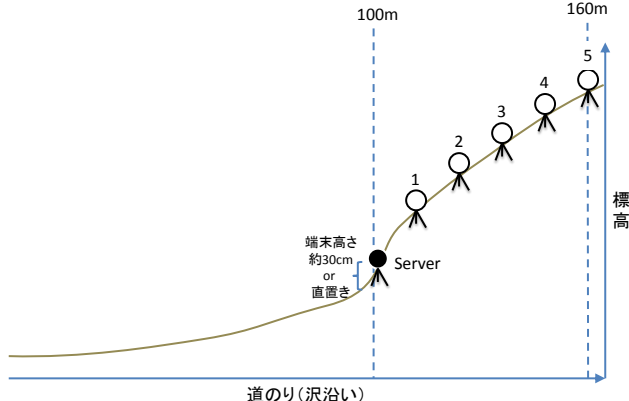


図12 各端末の配置（道のりと高さ）

接続により、端末間の配送に1秒ほどの遅延が見られる箇所があった。

4.2.3 沢沿い100mのセンシング環境マルチホップ実験

次に、沢沿い100mのセンシング環境マルチホップ実験について説明する。災害発生時の設置の容易さとセンシング精度の向上を見込み、地表に近い高さに端末を設置して、沢沿い100mの距離までのマルチホップ通信を行った。端末の高さは三脚を最も低い約30cmにする場合と、三脚を使わず地面に直に置く場合の2種類を設定した。本実験では、最長距離を求める距離優先の実験とは異なり、10台のセンサ端末を約10m間隔で配置し、通信が行えることを確認した。配置場所を図9及び図10に示す。

結果として、サーバ端末を含めた11台で10ホップ通信を行うことができた。設置した箇所により2ホップ前の端末がスキャンできる端末もあり、余裕を持って通信を行うことができた。また、距離優先の配置と比較すると、遅延もほとんど見られなかった。

4.2.4 急傾斜地のセンシング環境マルチホップ実験

最後に、急傾斜地のセンシング環境マルチホップ実験について説明する。沢沿いに100m進んだ箇所から先は、すぐに通常の歩行が困難なほどの急傾斜になる。ここから先に向かって約60mにわたり、急な傾斜に端末を配置してマルチホップ通信が行えるかを調査した。端末の配置は、セン

シング環境を優先して、約10m間隔で行った。端末の高さは最も低くした三脚、及び地表への直置きにより設置した。急傾斜であることから、1mの高さを確保することは困難であった。配置場所を図11及び図12に示す。

結果として、100m地点に設置したサーバ端末から先5台のセンサ端末を用いて、5ホップ通信が行えることを確認した。通信環境は良好で、ほぼ遅延なく送信を行うことができた。

4.2.5 考察

沢沿いのマルチホップ通信実験の結果から、急傾斜地を含む約160mの距離まで10ホップで到達することが確認できた。センシングの精度や設置の容易さを考慮し、見通し良い高さ1mの端末を通信用として設置し、そこにぶら下がる形でセンシング用端末を設置することによって、より効率の良い通信の実現が期待できることがわかった。

また、距離優先のマルチホップ実験において、1番目と2番目のセンサ端末間で接続が不安定になった原因として、片側にシダに覆われた高い丘があり、電波の回折に影響した事が考えられる。他の箇所でも、地表の起伏が激しい箇所では、通信が途切れる傾向があり、見通しを確保できる箇所を探して設置を行った。このことから、丘をまたぐような通信を行う際には、そこを迂回するような通信用端末を設置すると、より安定する設置が行えると思われる。

5. おわりに

本稿では、我々は斜面崩壊の早期検知と警報を目的としたセンサネットワークシステムである、Downhillを新たに提案した。Downhillは、センサ端末が斜面の崩壊、すなわち地滑り、を検知した時、BLEネットワークを介して加速度データやGPSデータをサーバまでマルチホップ通信を用いて送信することでデータを収集し、監視・警告を行うシステムである。我々は、Downhillを実際に実装し、滋賀県湖南市の土砂災害が危惧される場所において実地実験を行った。その結果、急傾斜地を含む約160mの距離まで10ホップで到達することが確認でき、Downhillが斜面崩壊の検知に利用できる可能性を見出した。

現状の実験用アプリとしてのDownhillは各端末の接続処理を手動で行っており、そのルーティング手法には、Next-Hopを指定するだけのスタティックルーティングを採用している。この接続処理は非常時には大きく手間取る要因になることが考えられる。そこで、今後の課題として、これを自動化し、周囲の端末を見つけ次第接続を行い、計算して得たルーティング設定をもとに接続を再構築するような仕組みが求められると考えられる。

謝辞

本研究は総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)課題番号150201004により実施している。

参考文献

- [1] 大規模降雨災害対策検討会土砂災害分科会, 「総合的な土砂災害対策の強化について」~土砂災害の減災を目指して~, Oct. 2005.
- [2] 岩井将行他, iPicket:無線センサ杭を用いた地滑り計測, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, IPSJ-MBL 52, 2010.
- [3] 四宮隆司, 深層崩壊に備えた大規模土砂移動検知センサーの設置, 四国技報, vol. 26, 2014.
- [4] K. Townsend 他, Bluetooth Low Energy をはじめよう, オライリー・ジャパン, 2015.
- [5] M. Fujimoto, S. Matsumoto, J. N. Victorino, H. Suwa, Y. Arakawa, Y. Hou, J. Webber, K. Yano, S. Tsukamoto, and M. Hatayama, Downhill: BLE-based Multi-Hop Communication Using Smartphones for Detecting Slope Failures, The 17th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (ACM HotMobile 2016), 2016. (Demo)
- [6] 諏訪博彦他, 中古スマホによる斜面崩壊検出センサネットワーク構築, 第22回社会情報システム学シンポジウム, 電気通信大学, 東京都, 2016.