

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22700111

研究課題名(和文) 斜面防災用無線センサネットワークにおける運用コスト削減手法の開発

研究課題名(英文) Development of Reduction Method of Management Cost in Mud-slide Detection Sensor Network

研究代表者

原田 史子 (Harada, Fumiko)

立命館大学・情報理工学部・講師

研究者番号：30454515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：豪雨による斜面崩壊を事前検知するため、斜面上にセンサネットワークを設置し、各地点において降雨量と間隙水圧を観測し、斜面崩壊の危険性を計算する、斜面防災システムが提案されている。しかし本システムは、センサノードの現地メンテナンスや、センサデータの分析によるコストが高い問題がある。本研究では、(1) センサデータ品質と電池寿命に基づくセンシング間隔の最適化、(2) センサデータの類似性に基づく、センサ群のカテゴリ化による現地メンテナンス回数・分析対象センサデータの削減手法、(3) パラメータの適時的な自動抽出に基づく斜面崩壊予兆検知手法の提案を行い、実データを用いて有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Against mud-slide disasters of slope caused by rainfall, the sensor network system that measures the pore-water pressure and rainfall at each position of the slope has been studied. However, the system has a problem that the management cost is high. The cost is brought by (a) maintaining sensor nodes to exchanging battery and to repair, and (b) analyzing sensor data to manually determine the numeric parameters to predict mud-slides. To reduce these costs, we develop the following methods: (1) optimization method of the sampling rate by trading-off between sensor data quality and battery lifetime, (2) categorization method of sensor nodes based on similarity of sensor data to reduce maintenance times and target sensor nodes for analysis, and (3) mud-slide prediction method with automatic calculation of prediction parameters. We also conducted the experiment to verify the effectiveness of the developed methods with actual data.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：自然現象観測・予測 リモートセンシング コスト削減 情報基礎 情報システム

1. 研究開始当初の背景

我が国では豪雨による山の斜面崩壊が深刻な問題である。斜面崩壊は、雨水の浸透により地中の水分量が徐々に増加飽和することで、地表面の土塊が滑落し起こる。そこで我々は、地中の水分量に影響する間隙水圧を斜面上に構築した無線センサネットワークを用いて適時計測し、計測結果の分析により崩壊の予兆を検知するシステムの開発を行っており、図1に示すプロトタイプシステム(以降現行システムと呼ぶ)を運用した。

本システムでは、斜面上の各地点に間隙水圧を計測するセンサを数本ずつと無線センサノードを設置する。計測結果はセンサ間の無線ネットワークを介して基地局サーバに集約され、サーバ上で斜面崩壊の予兆を検知するのに用いられる。予兆が検知された場合や、反対になくなった場合は、システムは警報発令・解除を行う。

現行システム運用の結果、運用コストが非常に大きいことがわかった。コストの主要因は(a)センサノード非稼働時の現地メンテナンスに伴うコスト、(b)データ確認・分析に伴うコストである。(a)を詳述する。センサノードは乾電池駆動でかつ変化の激しい屋外に設置されているため、電池切れや故障により非稼働になることがある。また、センサノードに接続された特定のセンサが故障することもある。センサネットワークは崩壊の危険を伴う劣悪な場所に設置されるため、現地でのメンテナンスが頻繁になることは、人的負担面および金銭コスト面から望ましくない。(b)を詳述する。斜面崩壊予兆を検知するため、直近の各センサ値が危険または安全を示すかの判断基準を、予め各センサ毎に定めねばならない。斜面により著しく環境が異なるため、判断基準に用いるパラメータは、ある程度の期間実運用して得られた降雨時のセンサデータ履歴に基づき設定する。しかしながら膨大な履歴を閲覧してパラメータを検討する人的負担や時間的コストは大きい。

そこで本研究では、斜面崩壊予兆の検知精度を保証しながら運用コスト(a)(b)を削減する手法を開発する。

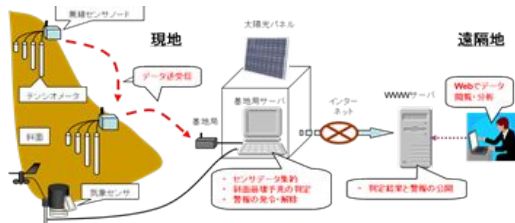


図1: 現行システムの概略図

2. 研究の目的

本研究の目的は、斜面崩壊予兆の検知精度を保証しながら運用コスト(a)(b)を削減する手法を開発することである。

現行システムのハードウェア面、ソフトウ

ェア面双方からの運用コスト削減手法を考える。この全体像を図2に示す。ハードウェア面からは、センシング間隔などの通信形態の調整手法により、運用コスト(a)を削減する。ソフトウェア面からは、コスト削減に関わる情報を抽出するためのセンサデータマイニング手法により、運用コスト(a)(b)双方を削減する。以下詳述する。

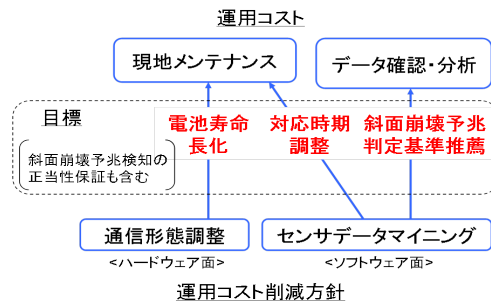


図2: 運用コスト削減手法の全体像

(1) ハードウェア面

運用コスト(a)におけるセンサノードの電池交換のコストを削減するために、無線センサノードの電池寿命を延ばすことが効果的である。電池寿命はセンサノード間の通信頻度に影響される。これらを決定する主要因として、間隙水圧を計測する周期(センシング間隔)などのハードウェア的な通信形態が挙げられる。そこで本項目においては、センシング間隔を調整することで電池寿命を長化する手法を開発することを目標1とする。

(2) ソフトウェア面

対応時期調整のための情報抽出

運用コスト(a)が増大する要因として、センサノード非稼働が確認された時に緊急的に即時対応する点が挙げられる。しかしながら非稼働になっても斜面崩壊予兆の検知結果に影響の小さいセンサであれば、必ずしも即時対応の必要はない。定期的なメンテナンス作業を行う時期などに合わせて、確認・対応作業を行う時期を調整できれば、現地メンテナンスのコストが削減できる。

そこで、センサノードの非稼働が検知された際に、当該ノードが斜面崩壊の予兆検知に影響が小さいか否かを判断するためのセンサデータマイニング手法を開発することを目標2とする。具体的には、センサ群を、斜面崩壊予兆検知への影響が類似するもの同士でグループ化する。あるセンサノードが非稼働になっても、同グループ内の別のセンサノードが稼働していれば、斜面崩壊の予兆検知が可能といえる。

斜面崩壊予兆判定基準の自動抽出と利用

運用コスト(b)の主要因は、センサ値が安全或いは危険な領域にあるかの判断基準設定時のデータ確認と分析を手動で行わねばならないことにある。判断基準の候補をセンサデータ履歴より自動的に抽出できれば、手動あるいは自動的に判断基準を調整でき、運用

コストの削減につながる。斜面崩壊は間隙水圧の飽和時に発生する。そこで、過去の各センサのセンサデータ履歴から、降雨時に間隙水圧が飽和している期間を抽出し、間隙水圧値の安全あるいは危険な領域を抽出する手法を開発することを目標3とする。

3. 研究の方法

(1) 目標 1: センシング間隔調整による電池寿命長化

自動的あるいは手動でセンシング間隔を適切に調整することで電池寿命を長化するためには、センシング間隔をある値に設定したときに、各センサノードの寿命がどの程度になるかを具体的に予測する手法が必要である。センサノードの寿命はネットワーク運用中の通信トポロジに大きく影響されるが、通信トポロジは設置環境によって大きく変化するため、オフラインで予め電池寿命を知ることが難しい。そこでまず、センサネットワークの通信トポロジの履歴などに基づいて、指定されたセンシング間隔に対応する各センサノードの寿命を予測するシミュレータを開発する。ここでは、現行システムに即した形での実装を可能とするため、現行システムで用いている Crossbow 社の MOTE を対象センサノード、通信形態調整の対象としたシミュレータを開発する。センシング間隔を主要なパラメータとし、膨大な計算を行うときの計算量をできるだけ抑制できるような消費電力モデルを検討する。次に、その消費電力モデルを用いて、センシング間隔に対応して予想されるセンサノードの寿命を半自動で計算する手法を提案する。

次に、前記シミュレータにより電池寿命が予測できるという想定下で、斜面崩壊予兆の検知精度を保ちつつ、データ品質と電池寿命をトレードオフする最適なセンシング間隔を半自動決定する手法を開発する。

(2) 目標 2: 対応時期調整のための情報抽出

現地メンテナンスの時期調整を目指し、各センサノードに接続された各センサのセンサデータ履歴を参照し、センサ群をクラスタリングする手法を提案する。具体的には、センサ群を、斜面崩壊予兆検知への影響が類似するもの同士でグループ化する。このため、まず斜面崩壊予兆検知への影響要因を検討する。影響要因として、降雨時の土壌雨量に対する間隙水圧値の変化や時間に対する変化などが考えられる。次に影響要因の変化に対する降雨時の間隙水圧値の変化を、各センサ毎にセンサデータ履歴から同定し、間隙水圧値の変化の特徴が類似しているもの同士を、相関係数などの統計的手法を用いて抽出する手法を提案する。提案手法を実装し、現行システムの実データを用いた有効性評価をはかる。

(3) 目標 3: 斜面崩壊予兆判定基準の自動抽出と利用

各センサのセンサデータ履歴から、降雨時に間隙水圧が飽和している期間を抽出し、間隙水圧値の安全あるいは危険性を判定する領域を抽出する手法を提案する。また、当該手法により抽出した領域を利用して、斜面崩壊の予兆検知を行う手法に拡張する。間隙水圧が飽和している期間を統計的手法やデータマイニング手法を用いて抽出する。抽出した飽和期間における降雨状況の変化について、そのときに斜面崩壊が発生しなければ、その間隙水圧値および降雨状況の変化は安全な領域に含まれると考えられる。以上の考えに基づき、安全あるいは危険と考えられる領域を提示してデータ確認・分析におけるコストを削減する手法を提案する。また、現行システムを用いた有効性評価をはかる。

4. 研究成果

(1) 目標 1: センシング間隔調整による電池寿命長化

電池寿命シミュレータの設計

指定されたセンシング間隔に対応する各センサノードの寿命を予測するシミュレータの開発において、図3に示すようなシミュレータを設計・実装した。実システムから得られるセンサデータ履歴、気象データ履歴、ネットワーク構成履歴を用いて、提示候補のセンシング間隔に対する各センサノードの寿命を計算する。ユーザは計算結果を参照し、運用コストや欲しいデータ頻度などの状況を勘案して検討できる。想定したシミュレータを実装するために、まず電池寿命を予測する電力消費モデルを導入し、現行システムで利用している MOTE センサノードを用いて動作実験を行い、モデル中の具体的なパラメータを回帰分析により決定した。

さらに、本消費モデルを用いてセンサノードの電池寿命をシミュレーションするシミュレータを図3のように設計・実装した。

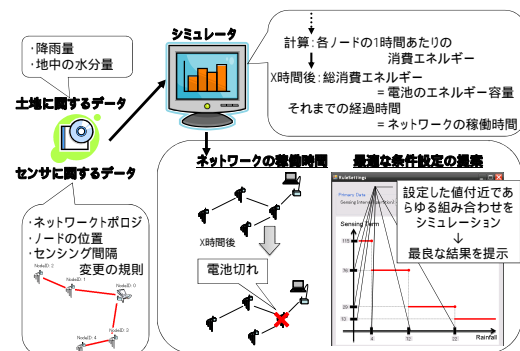


図3: シミュレータの概要

データ品質と電池寿命をトレードオフするセンシング間隔最適化

以下に提案手法の概要を述べる。

現行システムの仕様に従い基準センシング間隔 T_0 を 10 分と定めた。一定期間基準センシング間隔 T_0 でシステムを運用して基準センサデータ時系列 D_0 を得る。

センシング間隔 $T_n = (n+1)T_0$ ($n=0, 1, \dots, 11$) に対応するデータ品質 Q_n を図4のように算出する。時刻 $t=0$ から同一の状況でセンシングしたとき、センシング間隔 T_n のときのセンサデータ時系列 D_n は D_0 から時刻 $t=kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$) に得られたセンサ値群のみを取り出した時系列になるはずである。斜面崩壊の予兆検知はセンシング間隔 T_0 を前提としているため、時系列 D_n を適用する場合は、予め時刻 $t = kT$ のセンサ値を予測補完した時系列 D_n' を使用するであろう。 D_0' と D_0 が一致するほど斜面崩壊予兆の判定精度が良い。そこで、補完済みのセンサデータ時系列 D_n' と D_0 の間の二乗誤差の小ささをデータ品質 Q_n とする。一方、 T_n に対応する電池寿命 L_n は、前述した電力消費モデルを用いて計算する。これにより、各 $n=0, \dots, 11$ に対応する組 (Q_n, L_n) のリストが得られる。 n が大きいほど Q_n は劣化するが L_n は長い。

最適センシング間隔を次のように求める。上記リストをユーザに提示し、許容できる最低限のデータ品質 Q_N を指定させる。図5のように $[Q_N, Q_0]$ を $[0, 1]$ で正規化したデータ品質のプロットグラフと $[L_0, L_N]$ を $[0, 1]$ で正規化した電池寿命のプロットグラフを計算し、グラフの交点に対応するセンシング間隔を最適センシング間隔とする。

現行システムで得られた実データを用いて、本手法の評価実験を行った。データ品質を表す D_n' と D_0 の間の誤差の許容値を 100 としたとき、最適センシングは 46 分で、電池寿命は 36.00% 延びた。誤差の許容値が 3 としたとき、最適センシング間隔 23 分となり、電池寿命は 16.88% 延びる。これにより、ユーザの要求に合わせた最適なセンシング間隔が導出できることがわかった。

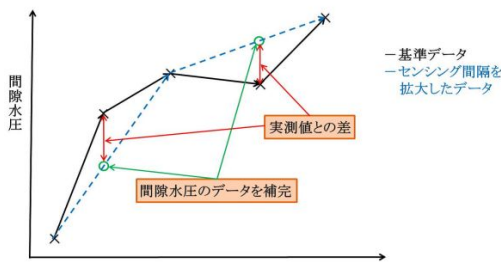


図4: データ品質の導出

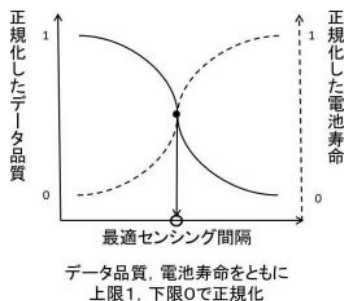


図5: 最適センシング間隔の導出

(2) 目標2: 対応時期調整のための情報抽出

センサネットワーク内のセンサ群を、斜面崩壊予兆判定への影響の同一性によってカテゴリ化することにより、運用コスト(a)の削減を目指す。本手法の概要を図6に示す。各センサに対応する地点の水分特性曲線を過去のセンサデータから抽出する。これは、降雨量の履歴からタンクモデルを用いて得られる土壌雨量と間隙水圧を2次元平面上にプロットして得られるヒステリシス曲線として得られる。水分特性曲線が類似した2つのセンサに対応する2地点は、地盤の性質が類似する、即ち降雨時の地盤の変化も類似すると推定できる。即ち一方のセンサだけを観測していればよく、他方のセンサに対する保守や故障対応をある程度省けると考えられる。水分特性曲線上の間隙水圧データ、土壌雨量データの相関の高さを指標として階層的クラスタリングすると、水分特性曲線の類似性に基づくセンサ群の階層的クラスタリング結果が得られる。カテゴリ数の少なさと斜面崩壊検知に対する信頼性をトレードオフするため、クラスタリング結果と類似度指標値を可視化することで、ユーザがカテゴリ構成を吟味することを可能にする。ユーザは許容できる最低限の類似度指標値を入力し、それを満たすもっともカテゴリ数の少ないクラスタリングを参照しながら、最終的なカテゴリ構成を決定する。

決定したカテゴリ構成により、斜面崩壊予兆の検知精度を保ちつつ運用コスト(a)を削減できる。さらに本手法は、分析対象のセンサを削減することにより、運用コスト(b)も低減できる。

実データを用いて本手法の有効性を検証した結果、ユーザが入力した閾値を相関係数 0.8 としたとき、運用コスト(a)を 40.24% に、運用コスト(b)を 60.56% に低減できた。さらにカテゴリ内の相関係数は 0.67 という高い値になった。提案手法の有効性が認められた。

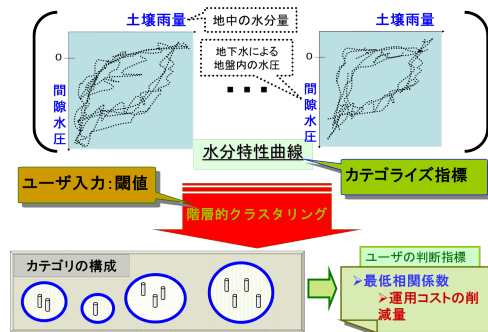


図6: センサのカテゴリ化法の概要

上記の手法は、カテゴリ構成の更新を考慮していない事と、最低相関係数でのみカテゴリ化の信頼性を表現し、斜面崩壊の検知結果への影響を評価していない。そこで第二の手法として、多数のセンサ群の中から、斜面

崩壊の検知精度を損なわない最低限のセンサ群を抽出する手法を考えた。

斜面崩壊予兆の検知システムでは、センサネットワーク内のセンサ値の時系列群に基づいて、斜面崩壊の危険度合いの経時変化を導出している。全センサ群 S を用いた場合の危険度合い D_s の経時変化を基準とし、一部のセンサ群 S' のみを用いた場合の危険度合い $D_{s'}$ の変化が基準 D_s の変化と十分類似していれば、一部センサ群 S' のみで斜面崩壊の予兆検知が可能であるといえる。そこで、降雨時に斜面崩壊の危険度合いが急激に高まった場合の、 D_s の変化と、 $D_{s'}$ の変化を比較し、類似性の高いセンサ群 S' を抽出するとよい。抽出された S' のみで観測すれば、センサ数の減少によるシステムの耐故障性劣化を保ちつつ、斜面崩壊予兆の検知も正確に行える。本手法は現行システムのみならず、

センサが複数存在する、センサ値により数値的指標の時系列を導出する、の数値的指標の平常時からの増減により、特定の状況を検知する、の条件を満たすセンサシステムに適用可能である。一般的なセンサシステムに対する、指標値の比較手法を図7に示す。

本手法の評価については、本来現行システムで取得できたデータを使用予定であった。しかし、現行システムの運用期間に斜面崩壊に至るような状況が発生せず、斜面崩壊予兆の危険性が高い場合のデータを取得できなかった。そのため、上記の条件 ~ を持つ、身体装着センサ群による疲労検知システムから取得された評価用データを用いた。その結果、全ての被験者から検知精度を損なわないセンサ群を適切に抽出できることが分かった。従ってこれを斜面崩壊の予兆検知に適用した場合、有効なセンサ群を適切に抽出できうることがわかった。

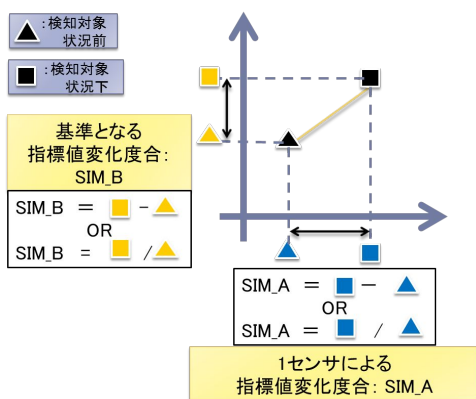


図7：有効センサ群抽出のための指標値の比較

(3) 目標 3: 斜面崩壊予兆判定基準の自動抽出と利用

斜面崩壊検知アルゴリズムのパラメータ候補の自動抽出に関して専門家へのヒアリングを実施した結果、地盤の経年変化により

適切なパラメータが変動することが分かった。そこで、判定基準パラメータを自動導出するとともに、当該パラメータを用いて斜面崩壊予兆を判定する手法を提案した。

降雨時に、間隙水圧は正の方向に上昇し、ある一定の値で上昇が止まり、飽和する。このとき斜面崩壊が発生する危険性が高い。さらに、過去飽和していたときの降雨量より多量の降雨は、斜面崩壊が発生する危険がより高いことを意味する。そのため本手法では図8のように斜面崩壊予兆の警報を発令か否かの判定を行う。まず過去のセンサデータと降雨量のデータから間隙水圧の飽和期間とその期間における降雨量を抽出する。次に

の結果に基づき、崩壊が予想される降雨量の領域を示す警報発令判定グラフを作成する。警報発令判定グラフにおける降雨量の危険領域は、累積降雨量と単位時間降雨量の2次元で表す。降雨時、警報発令判定グラフを参照し、降雨量が警報発令の領域に入るか否かを判定する。

本研究では特ににおけるセンサデータの飽和期間抽出に着目した。過去のセンサデータからの飽和期間の抽出手法の概要図を図9に示す。本手法では、まず地盤乾燥時のセンサデータにローパスフィルタを適用してゆらぎを除去し、センサデータ値の平均値(基準値)と値域を求める。過去の地盤乾燥時のセンサデータから求めた基準値と現在の基準値を比較し、閾値以上の差があれば、地盤の経年変化等が起こったとみなす。経年変化等が起こった場合、降雨時に間隙水圧が飽和した時のセンサ値は変化している。一方、基準値と値域が同一であれば、飽和時のセンサ値は同一と考えられる。そこで降雨時、現在の基準値・地域と同一であった時の降雨状況で得られた飽和時のセンサ値を、現在予想される飽和時センサ値とみなす。この飽和時センサ値より間隙水圧が高くなった場合に、斜面崩壊の危険がある飽和期間であると判断できる。

本手法の評価については、本来現行システムで取得したセンサデータを使用予定であった。しかし、現行システムの運用期間に斜面崩壊の予兆が発生することがなく、また地盤の経年変化により飽和領域が変わったと考えられる現象も見られなかった。そのため代替の評価用データを用い評価を行った。本評価では、京都市清水寺における2箇所の計測地点から得られた2004年8月から2004年10月、2005年4月から2005年5月の間隙水圧情報・降雨情報を用いた。提案システムが抽出した飽和期間と、2名の専門家がセンサデータを閲覧して飽和していると判断した期間が一致するかを評価した。その結果、再現率100%、適合率75%で正しく飽和領域が抽出でき、経年変化による基準値の変化にも対応できることが分かった。

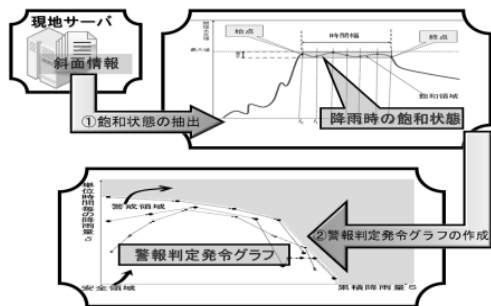


図 8：斜面崩壊予兆の検知アルゴリズムの概要

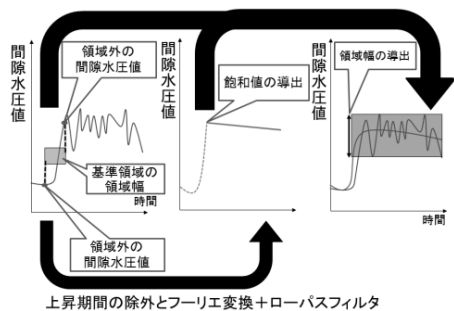


図 9：降雨時飽和期間の抽出の概要

(4) 得られた成果の位置づけ、今後の展望

(1) ~ (3) で得た成果を、International Journal of Advanced Computer Science 誌、ICCEE、情報科学技術フォーラムにて発表した。特にセンシング間隔の最適化手法と、センサのカテゴリライズ法については、間隙水圧や降雨データを別の指標に置き換えることで、現行システムのみならず一般のセンサシステムに拡張可能な手法である。このことから、防災分野及びセンサネットワーク分野において貢献すると考えられる。

本研究では目標 1~3 で想定した手法を提案することは達成したが、目標 2,3 において現行システムの実データによる評価が達成されていないことから、今後実データを用いた評価方法の工夫が求められる。また、今後提案手法群の国内外における発表を行う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

著者名：Kazuya Kato, Yusuke Yokota, Fumiko Harada, Hiromitsu Shimakawa, 論文標題：Reducing Maintenance Cost of Mud Slide Prediction System with Categorization of Sensor Data in Sensor Network, 雑誌名：International Journal of Advanced Computer Science, 査読の有無：有, 巻：Vol.1, No.4, 発行年：2011, 最初と最後の頁：pp.127-133

〔学会発表〕(計 4 件)

発表者名：加藤和弥, 原田史子, 島川博光, 発表標題：疲労検知に有効な加速度センサの組み合わせ評価, 学会等名：情報科学技術フォーラム, 発表年月日：2011年9月9日, 発表場所：函館大学(北海道)

発表者名：Kazuya Kato, Yusuke Yokota, Fumiko Harada, Hiromitsu Shimakawa, 発表標題：Maintenance Cost of Mud Slide Prediction System with Categorization of Sensor Data in Sensor Network, 学会等名：2010 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering, 発表年月日：2010年11月16-18日, 発表場所：電子科技大学(成都・中国)

発表者名：中小路公通・島川博光・原田史子, 発表標題：斜面防災のための基準値変動を考慮したセンサ値の飽和領域抽出, 学会等名：第9回情報科学技術フォーラム, 発表年月日：2010年9月9日, 発表場所：九州大学伊都キャンパス(福岡県)

発表者名：藤井宣久・埜口良太・原田史子・島川博光, 発表標題：斜面防災ネットワークにおけるデータ品質に基づくセンシング間隔最適化, 学会等名：第9回情報科学技術フォーラム, 発表年月日：2010年9月7日, 発表場所：九州大学伊都キャンパス(福岡県)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 史子 (Harada Fumiko)

立命館大学 情報理工学部 講師

研究者番号：30454515