Vol.2014-ARC-212 No.19
2014/10/7

大規模センサネットワークのアーキテクチャ探索環境の実装と評価

栗原康志[†1]　鈴木貴久[†1]　山下浩一郎[†1†2]

IoT の１つのテーマとして，環境センシングがあげられる．対象となるエリアを広域，網羅的にセンシングするためには，安価なセンサが大量に必要なだけではなく，膨大な数のセンサが通信や電力などの課題を互助動作しながら解決していかないといけない．そこで，本論文では，環境センシング向けのアーキテクチャ探索ツールを実装し，アーキテクチャの評価を行った．

Implementation and evaluation of the searching tool of the large scale sensor network architecture

KOJI KURIHARA[†1]　TAKAHISA SUZUKI[†1]
KOICHIRO YAMASHITA[†1†2]

Environmental monitoring system is one theme of IoT. A cheap sensor not only needs to be required in large quantities, but a large number of sensors have to operate in cooperation while taking communication with other nodes and power states into consideration to sense target field widely and completely. Then, in this paper, we implemented the search tool of the architecture for environmental monitoring system and evaluated the architecture.

1. はじめに

老朽化に伴う橋梁崩壊，壁面落下トンネル天井落下，あるいは，台風や局所豪雨などの自然災害による地すべり等の社会インフラの事故が大きな問題になりつつある．斜面崩壊や岩盤崩落のモニタリング技術としては，従来は光ファイバーをひずみセンサとして観測する方法[1]やマイクロ波の伝搬，反射特性を利用した岩盤の微小変位量検知[2]が行われていた．しかし，測定機器のコストや人手のメンテナンスが必要であるといった理由により，限られた箇所の測定にしか利用できない問題があった．

近年，より簡易なセンサ機器として MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサと無線通信を利用したワイヤレスセンサネットワーク(Wireless Sensor Network)システムが提案されている[3]．例えば，文献[4]においては，列車通過時の部材の振動による圧電素子の発電を利用して，橋梁の変状センシングを行うモニタリングシステムについて述べられている．しかし，小型バッテリやエナジーハーベストによる電力供給により，長期安定的な動作を保証しようとする場合，アーキテクチャの観点で多くの課題が存在する[5]．

WSN システムにおいて，通信やデバイス，計測技術などの個々の要素技術に関して研究は行われている一方で，センサの挙動とセンサ間の相互作用により発生する集合的な現象の評価を容易に行うためのシミュレーションツールの研究開発は不十分な状況にある．

本論文では，WSN を防災システムへの適用を想定し，冗長性を考慮したマルチノード構成の WSN アーキテクチャを探索するマルチエージェント型のシミュレータの提案を行う．このシミュレータにより，環境のモニタリングの際に存在する外乱，バッテリやハーベスティングのばらつき等をパラメータとして考慮することができ，適切な WSN システムの設計を行うことが可能になる．本論文では，ハーベスティングのばらつきとノード数における特性についての関係を調査する．

2. マルチエージェント型シミュレーション

マルチエージェント型シミュレーションでは，トップダウン的にシステム全体の挙動を記述するシステムダイナミクスなシミュレーションとは異なり，もっともミクロなエージェントと相互作用をモデルとして記述するシミュレーションである．各エージェントは内部に行動ルールを持ち，環境や他のエージェントから情報を獲得して，自身の行動を決定し，エージェントの行動結果が他のエージェントや環境にフィードバックされる．そのため，エージェントの行動と相互作用の影響の集積が大域的な現象がシミュレーション結果として現れる．

マルチエージェント型シミュレーションには大きくシミュレーションそのものを規定する設定パラメータと，毎ステップ変動する変動パラメータが存在する．設定パラメータは，シミュレーションに用いるモデルの性質そのものを決定するパラメータである．環境モニタリングで言えば，

†1 (株)富士通研究所
Fujitsu Laboratories Ltd.
†2 早稲田大学
Waseda University

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

ノードの個数，測定環境の範囲やノードの処理ステップ数等が設定パラメータに当たる.設定パラメータを変化させ，大域的な現象がどのように変化するのかを検証することにより，どのような原因でどのような結果が生まれるのかを把握することが可能である．設定パラメータ以外のシミュレーション中に変化しうるパラメータを変動パラメータと呼ぶ．環境モニタリングで言えば，ノードの電池残量や動作状態などが変動パラメータに当たる．変動パラメータは主にエージェントの行動を決定づけるために利用される．変動パラメータによって変化する各エージェントの行動が他のエージェントに影響を与えることにより相互作用が生まれる．

WSN システムでは，無数のノードがスリープ・センシング処理・データ送受信処理を独立に動作し，隣接するノードとのデータ送受信により局所的に相互作用する．そのため，トップダウン的にシステム全体の挙動を記述することは困難である．そこで，前述の特徴を持つマルチエージェント型シミュレーションが適切であると考え，個々のノードの挙動をエージェントして記述し，隣接ノードとのデータ送受信を相互作用として記述することにより WSN アーキテクチャを探索するシミュレータをマルチエージェント型シミュレーションで実現した．

3. 大規模 WSN システムアーキテクチャ

大規模 WSN システムは，センシング対象のフィールドに数百から数万個のノードが配置され，隣接ノードと無線通信を行う WSN システムとなっている．

図 1 は，WSN システムの中の 1 つのノードの内部構成を示している．ノードは 1 つ，あるいは複数のセンサを搭載し，プロセッサ，EH 素子を含む電源，無線 RF で構成され，センシング対象のフィールドに，同一のノードがランダムに配置され，対象の状態をモニタリングしているものとする．

ノード間の接続方式は，搭載される無線 RF モジュールの機能によって異なるが，個々のノードで取得されたデータはマルチホップによりノード間を伝播し，ゲートウェイ等を介してサーバに集約され，アプリケーション UI により参照されるほか，アプリケーション UI 側からの制御信号がゲートウェイ等を介しフィールドに対して発信され，同様にマルチホップすることにより個々のノードに通知される仕組みをもつ．

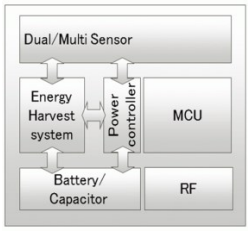


図 1.センサノードのハードウェア構成

3.1 ノードハードウェア／ソフトウェア

従来の WSN システム分野における技術的興味対象は，いかに低電力に，いかに高効率にデータ伝搬していくかが課題となっている．しかし，前節で述べた長期間にわたり広範囲をカバーし，高機能・高精度を担保するデバイスを開発することは現実的には困難である．従って本論文で対象とするセンサノードのハードウェアは，汎用品モジュールの組み合わせを想定する．

表 1 は，汎用的なハードウェアモジュールの仕様と消費電力をまとめたものである．実際には下記表のほか，各モジュールのスリープモードへの遷移，無線出力の調整，プロセッサの動作周波数などに伴い消費電力が変化するものとする．単純には，これらのモジュールを組み合わせることでシングルノードのセンサを構築することができる．

表 1. センサノードのハードウェアモジュール仕様

	仕様	消費電力
センサ	MEMS	0.2mW 程度
EH 素子	ソーラー型	200Lux, 5uW/cm^2
MPU/メモリ	8/16bit/~8Kbyte RAM 数 MHz~100MHz 程度	10mW（30MHz 時）
RF	IEEE802.15.4, 2.4GHz	Tx:90mW/Rx:70mW 4.5dBm
バッテリ	10cm^2程度で 800mAh	

また，ノード上の MPU では表 2 に示すような，通信や演算のためのソフトウェアが動作する．これにより 1 周期の動作における MPU 動作サイクルが算出されることになる．

表 2.センサノード上のソフトウェア

機能	処理内容	処理量
データ処理	波形解析 キャリブレーション	1Kstep~/sample 0.1Kstep~/sample
通信処理	パケット処理等	0.1Kstep~/octet
符号化	パリティ生成等	0.01Kstep~/octet
例外処理	ルーティング等	0.1Kstep~/trial
状態遷移	DVFS/PG 等	0.01Kstep/trial

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

本シミュレータにおいては，ノードはエージェントとして記述される．上記，消費電力やソフトウェア処理ステップ数は WSN システムアーキテクチャにおいて重要な指標になる．そのため，システムアーキテクチャの探索ツールとしての観点から，各モジュールの消費電力やノード上のソフトウェアの処理量は設定パラメータとして変更できるようにしておく必要がある．

3.2 ノード間通信

WSN システムでは，環境モニタリングにおいて，隣接他ノードと通信を行う場合，実験室や計算機室とは異なり，外界からの影響を多分に受ける．そのため，ノード間通信においては，距離に応じた自由空間損失のほか，反射波，輻輳などによる影響が考えられる．これらの影響により帯域や接続状態が刻々変化する．

この影響は，いかに高性能な RF を用いても改善方向へ進むがゼロになることはない．このため，自由空間損失等のノード間通信に影響を与える因子を設定パラメータや変動パラメータとしておくことが望ましい．

各ノードは隣接他ノードからのデータ受信が自身の動作を決定する一つの要素となる．そのため，ノード間通信は相互作用としてモデル化することが望ましい．

4. MAS 型 WSN シミュレーション

MAS 型 WSN シミュレーションに求められる要件を整理する．

1. 各ノードのビヘイビアは，独立した振る舞いを行う
2. 各ノードのバッテリ量，発電効率，無線強度などを設定パラメータとして持つ
3. 各ノードは処理状態と電池状態を内部状態として持つ
4. 各ノードは内部状態，フィールド情報や他ノードとの通信をビヘイビア決定の要素とする
5. 外乱を入力値としてもち，個々のノードのビヘイビアに影響をおよぼす仕組み
6. 初期パラメータなどは, 表 1 および表 2 から与えられる仕組み

これらの操作を繰り返すことにより，各モジュールの変動値，ノード配置といった環境モニタリング WSN システムのアーキテクチャ探索を行うシミュレータを提案する．

4.1 シミュレーション環境の基本構成

提案するシミュレータは表 3 に示す複数のレイヤで構成されている．

個々のレイヤは部品化され，通信やデバイスモデルなどは評価するモジュールによってプラグイン入れ替え可能な状態で実装されている．

シミュレーション精度は MCU のクロックを 1 単位として時刻をカウントし，全てのノードのステート，電力状態をプロファイリングしている．

また, 任意のノード数, ノード配置の WSN 環境に対応し，すべてのノードは独立で動作を行う．各ハードウェアモジュールが互いに非依存状態にある動作時では抽象度の高いビヘイビアモデル，ノード間で通信（同期）が行われる場合には，クロック精度で動作するように，抽象度を混載してインプリメントすることで高速化をはかっている[6].

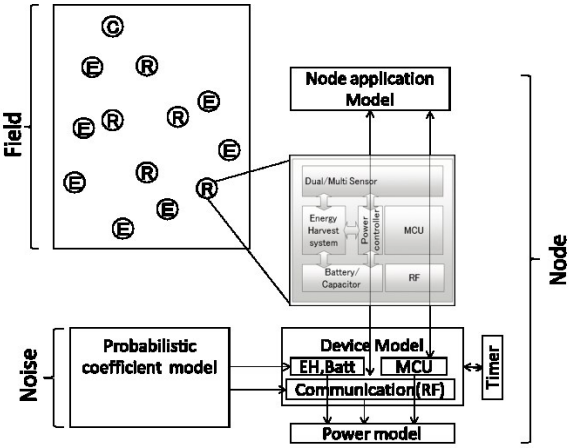


図 2.シミュレータ構成

表 3.シミュレータのレイヤ構成と機能

レイヤ	機能モデル	説明
Field	フィールドモデル (Field model)	多数の Node モデルを設置する測定対象環境を表現する
Node	ノードアプリ動作モデル (Node application model)	表 2 の機能が MCU 上での動作を表現する
	電力モデル (Power model)	表 1 のモジュールの電力遷移状態による電力消費を表現する
	デバイスモデル (Device model)	ノードを構成するハードモジュールのモデル
	通信モデル (Communication model)	利用する通信デバイスの動作を再現する
Noise	確率係数モデル (Probabilistic coefficient model)	ノイズ源を発生させ外乱として各モジュールに影響を及ぼす

4.2 Field モデル

多数のノードモデルを設置し，測定対象環境を表現する．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

ノードモデルの設置方法として，ランダム配置やグリッド配置，もしくは，ファイル入力によるユーザーからの指定が可能である．Field モデルは各ノードモデルから電波送信イベントをフィードバックされると，各ノードモデルのノードポジション，電波出力強度，電波受信強度を取得し，電波到達範囲に存在する各ノードモデルに電波受信イベントをフィードバックする．これにより，送信側ノードから信号が発信され，信号を受信可能なノードが受信状態となるノード間同期を実現している．図 3 は，シミュレーション中の通信遷移状態を段階的に示したものである．電波到達範囲は一律ではなく，ノードモデルのパラメータ，相互の電波干渉や通信距離に応じた損失などの通信の外乱も考慮している．通信の外乱は Noise モデルとしてプラグイン化しており，プラグインを変更することにより外乱モデルが変化した場合の検討も可能としている．

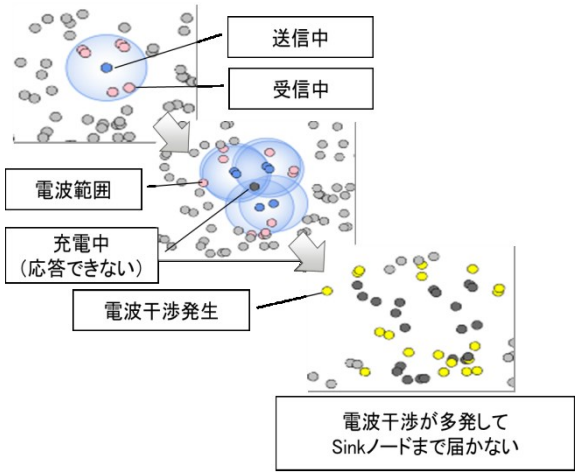


図 3.通信状態遷移

4.3 Node モデル

Node モデルはエージェントとして記述される．Node モデルを構成するノードアプリ動作モデル，電力モデル，デバイスモデル，通信モデルはプラグイン化しており，環境モニタリングアプリケーションに応じてモデルを変更することが可能である．

4.3.1 ノードアプリ動作モデル

各ノードはエージェントして，内部パラメータと Field モデルから情報を獲得し，ノードアプリ動作モデルに従って自身の行動を決定する．各ノードは内部状態と電力状態を内部パラメータとして持つ．内部状態は，待機(deep sleep 状態)，受信，電波競合，送信，MCU 処理，充電の 4 つである．それぞれの内部状態を表 4 に示す．

表 4. ノードの内部状態

内部状態	説明
待機状態	ノードのバッテリがフル充電されており，ノード動作を開始していない状態
受信状態	他ノードからの電波受信時の状態
電波競合状態	受信状態にある場合に，他のノードから電波を受信し，データ受信に失敗した状態
送信状態	電波送信時の状態
MCU 処理	ノードが表 2 のいずれかの動作を行っているときに遷移する状態
充電状態	ノードのバッテリ残量が不足している場合に遷移する状態

本シミュレータでは，上記内部状態と電力状態，Field モデルからの情報により，ノードアプリ動作モデルとしてノードの行動ルールとして以下のように定義している．

・待機状態時に Field モデルから他ノードの電波到達の情報を取得した場合，受信状態に遷移する
・待機状態時に Field モデルからセンシング情報取得した場合，MCU 処理状態に遷移する
・受信状態時に Field モデルから他ノードの電波到達の情報を取得した場合，電波競合状態に遷移する
・受信状態時にデータの受信処理が完了すると，MCU 処理状態に遷移する
・MCU 処理状態時に MCU 処理が完了すると，送信状態に遷移する
・送信状態時にデータの送信処理が完了した場合は，Field モデルへ電波送信の情報をフィードバックし，ノードは待機状態に遷移する
・充電状態時にバッテリ残量が一定値以上に達したら，待機状態に遷移する
・各状態において，電力状態が 0 になると，いかなる状態であっても充電状態に遷移する

この行動ルールに従い，各ノードは内部状態，電力状態の更新と Field モデルへのフィードバックを行う．

4.3.2 電力モデル

各ノードの電力状態は各内部状態に応じてシミュレーションステップのカウントアップ時にアップデートする．各状態における電力状態の増減量は外部からパラメータとして設定可能である．図 4 は典型的な 1 ターン（受信～送信まで）の電力状態遷移を可視化したものである．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

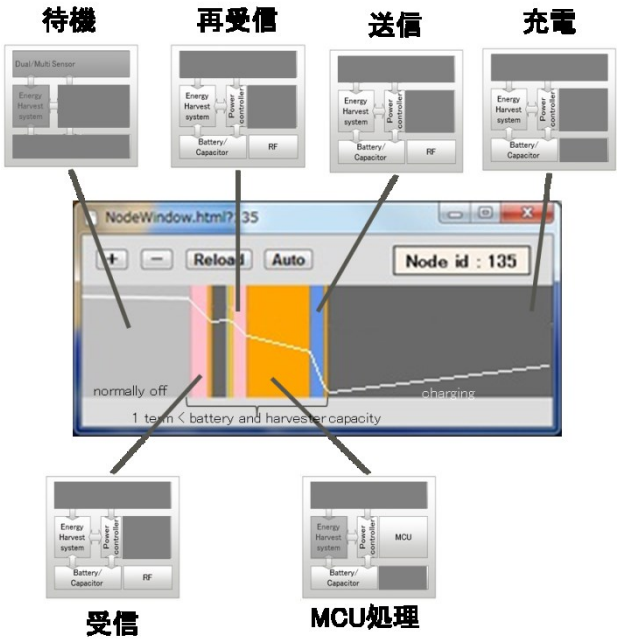


図 4.ノードの電力遷移

4.3.3 デバイスモデル

本シミュレータでは，デバイスモデルとして MCU 処理モデル, センサモデル, バッテリモデルが用意されている．

今回の MCU 処理モデルでは，表 2 の処理ステップ数をパラメータで指定できるようにしており，MCU の性能を変更したときの検討を可能にしている．

環境モニタリングを行う場合，個々のモニタリングシステムにおいて使用されるセンサが異なる．そこで，データ信頼性評価に対応できるようにセンサモデルにおいて，精度誤差をパラメータとして指定可能にしている．

バッテリモデルでは，個々のノードモデルの電力状態の上限値のばらつきのパラメータを用意し，このパラメータに応じてノード毎に電力状態の上限値が設定される形にしている．バッテリへの蓄電を行うエナジーハーベスト素子も存在し，ハーベストエネルギーの種類に応じてノード毎のバッテリの充電量も異なると考えられるので，バッテリへの充電量もバッテリの蓄電容量の上限値と同様にばらつきのパラメータに応じてノード毎に設定される形にしている．

4.3.4 通信モデル

本論文でプラグインされている RF モジュールは大きく以下の 3 つの状態が実装されている．

a) ノード内機能としての送信（再送信含む）状態
b) ノード内機能としての受信（待機含む）状態
c) ノード間同期機能として外乱により影響を受ける受送信状態

a)において，ノードパラメータの出力電波強度を基に送信ノードからの信号として Field モデルへフィードバックする．b)においては，ノードパラメータの受信電波強度を Field モデルへフィードバックすることにより, 他ノードからの電波受信処理を行う．電波受信処理中に同時に他ノードからの電波受信処理が発生すると，電波競合状態を検出して，c)となる．本シミュレータでは，前述のタイミングカウントから，同時刻に発信された信号がノード上で重なる場合，設定した確率でそのノードとの通信が不成立となる仕組みで電波競合状態の検出を実現している．

4.4 Noise モデル

環境モニタリングを実証実験として実施する際，多様な外乱が発生する．本シミュレータでは，通信距離に応じた自由空間伝搬損失とノイズとノードの故障の外乱を想定し，提案するシミュレータの Probabilistic coefficient model として実装している．

通信における理論的な外乱は，文献[7]で詳しく述べられているが，基本的な挙動は距離 d の 2 乗，波長 λ の-2 乗に比例するとされている．このとき，損失を$Li[dB]$としたとき式(1)のように表現される．

$$Li\,[dB] = 10\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \qquad (1)$$

さらに，地面や建造物による輻射波による反射・干渉のほか，降水，障害物などによって電波は減衰・阻害され，これら環境によって刻々変化するような不確定要因を定式化することは困難である．またアンテナについても指向性や地上高などの設置状態要因が考えられる．ただし，環境モニタリングとして構造物や地表の数 cm の表面を，数 m から十数 m ほどの短距離で利用することを想定し, 本シミュレーションでは，これらの要素による無線特性変化は，障害物などによる外乱をまとめてノイズ N として式(2)を与える．

$$N\,[dB] = LV_{noise} \times d \times P_{rand}(seed) \qquad (2)$$

このとき，$LVnoise$ は雑音係数となるノイズレベルで，式(1)(2)の代表的な伝搬損失特性($LVnoise$=0.1 の例)をグラフ化したものを図 5 に示す．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

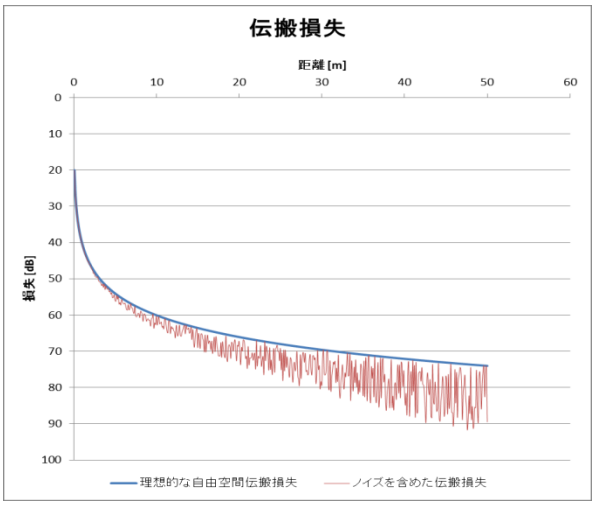


図 5.通信におけるノイズモデル

ノードの故障については，シミュレータの機能として，利用者がランダムに故障ノードを設定する機能を設ける．

5. 提案シミュレータによる環境モニタリングシステムに関する一検討

環境をモニタリングを行う場合，時空間の連続性を利用したデータ補間方法が有効であることが参考文献[8]で述べられている．そのため，環境モニタリングを行う場合，システムの要求精度に応じて必要となるデータ収集率が変化する．そこで，本論文では，データ収集率に影響を及ぼす要因として挙げられるハーベスト電力のばらつきとノード数の冗長性の関係について調査した．

5.1 評価方法

評価条件を表 5 に示す．

表 5. 評価条件

条件	説明
接続形態	フラッディング型
輻輳の考慮	あり
Field	アクティブノード数：100＋冗長数 配置範囲：400×400m
ハーベスト電力のばらつき	ノード間で 10~30%で変化
ノード数の冗長数	0, 30, 50 で配置数を変化

評価条件下において以下の手順で実験を行った．

1. ノードを Field 上に配置(ノード数：100, 130, 150)
2. ハーベスト給電量について，ノード毎に変動させる(設定変動幅：10%，20%, 30%)
3. フィールド上のノードより 100 個のデータを送信．ノード間で情報伝搬を開始する時刻は十分に離して(前データの通信と重ならない)設定
4. 100 個のデータの送信終了後，観測ノードに到達したデータ数からデータ収集率を評価

5.2 評価結果

測定結果を図 6 に示す．縦軸がデータ収集率を示しており，横軸が Field に配置されたノード数を示している．ハーベスト給電量のばらつきが 10%である場合は，ノード数の冗長度が大きくなるほどデータ収集率が上昇している．一方で，ハーベスト給電量のばらつきが 30%である場合，ノード数の冗長度が 30%を超えるとデータ収集率が減少している．

ノード数の冗長度が大きくなるほど，配置ノード間の距離は小さくなる．そのため，1 つのデータ送信において多くのノードが通信に参加する可能性が高くなる．1 つのデータ送信においては，多くのノードが通信に参加するほど，データが観測ノードに収集される確率は高くなる．しかし，一方で，ハーベスト給電量が小さい場合，次のデータ転送までにデータ転送可能なレベルのバッテリチャージが間に合わないため，次のデータ転送では通信に参加できなくなる．そのため，ノード数の冗長度が大きくなると，全てのノードが同じタイミングでデータ転送への参加・不参加を行うことになり，データの収集率が低下してしまうことが考えられる．したがって，ノード数の冗長度を大きくすれば，単純にデータ収集率が大きくなるということはなく，システム設計時には，ハーベスト給電量やノード数の冗長度に注意して配置する必要があるということが考えられる．

測定結果から考えると，例えば，文献[4]のような振動発電による鉄道橋梁のモニタリングシステムにおいては，ハーベスト給電のばらつきが少ないことが想定できるので，図 6 の実線グラフの特性を持っていると考えられるので，データ収集率を上昇させたい場合はノード数を増やしていけばよいということわかる．逆に，昼夜でハーベスト給電能力が大きく変化する太陽エネルギーをハーベスト給電として利用するようなシステムは図 6 の点線グラフの特性を持っていることが考えられるのでノード数を増加させてもデータ収集率が上昇しないと想定することができ，データ収集率を上昇させたい場合は，ハーベスト給電能力から見直す必要があるということがいえる．このように，提案シミュレータを利用することで環境モニタリングシステムの要求仕様を満たすアーキテクチャを探索することが可能であることが分かる．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

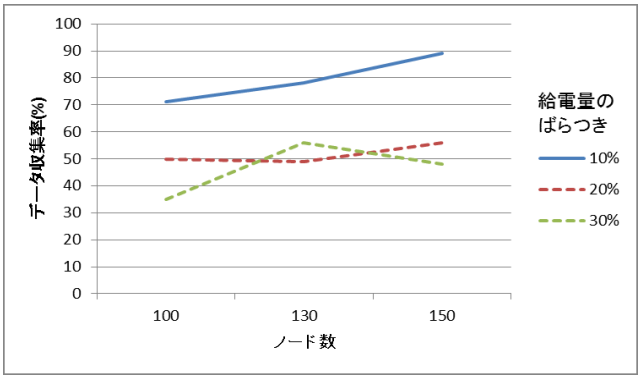


図 6.測定結果

6. まとめ

環境モニタリングシステムの特徴を鑑みて，マルチエージェント型シミュレータを提案実現しました．本シミュレータを利用した環境モニタリングシステムの一検討方法としてノード数の冗長性とハーベスト給電能力のばらつきに着目してアーキテクチャ探索を行った．今回の検討により，やみくもに冗長ノードを増加させれば，データ収集率が高くなるわけではないということが分かった．

今後は電波到達距離やデータ送信間隔とのトレードオフの関係やノードアプリ動作モデルを変更した場合の評価なども行っていきたい．

参考文献

1) 小島謙一，伊藤裕昌，村田修，秋山洋，山浦剛俊，棚村史郎: 土構造物の計測管理に用いる光ファイバーの基本特性，土木学会論文集, No.711/III-68, pp.187-197 (2004).
2) 三宅克行，田仲正弘，玉木茂，市川正二郎: マイクロ波を利用した岩盤斜面危険予知システムの検証，第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.193-197 (2000).
3) 長井望，三田彰，矢向高弘，佐藤忠信: 構造ヘルスモニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究，日本地震工学会論文集，第 3 巻，第 4 号 (2003).
4) 吉田善紀，小林裕介，内村太郎：鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学),Vol.70, No.2, pp.282-292, 2014 年 6 月.
5) 小泉圭吾，藤田行茂，平田研二，小田和広，上出定幸：土砂災害監視のための無線センサーネットワークの実用化にむけた実験的研究，土木学会論文集 C (地圏工学),Vol.69, No.1, pp.46-57, 2013 年 2 月.
6) Koichiro Yamashita,“-Possibility of ESL-: a software centric system design for multicore SoC in the upstream phase,” In Proc. IEEE ASP-DAC, pp.805-808, Jan. 2010.
7) 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論”, Microwave Workshops and Exhibition 2005, 2005 年 11 月.
8) 米田 嘉浩, 挾間 龍亮, 栗原 康志, 菅沼 隆史, 伊藤 浩之, 後藤 邦彦, 益 一哉, “環境モニタリング用無線センサネットワークのデータ信頼性評価指標に関する一検討”, 計測自動制御学会第 41 回知能システムシンポジウム, 2014 年 2 月.

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan