

平成 22 年 6 月 14 日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19200003
 研究課題名（和文）オープン無線センサーネットワークのためのミドルウェアに関する研究
 研究課題名（英文）A middleware for open wireless sensor networks

研究代表者
 本位田 真一（HONIDEN SHINICHI）
 国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授
 研究者番号：70332153

研究成果の概要（和文）：次世代のソフトウェアであるユビキタスサービスの基盤インフラとなる、オープン無線センサーネットワーク構築のためのミドルウェアを研究開発し、公開した。本ミドルウェアを利用することで、長期にわたって安定運用が可能な無線センサーネットワークを構築することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a middleware for open wireless sensor networks, which will be a key infrastructure for context-aware software, and released it. Our middleware can maintain wireless sensor network for long periods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2008年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2009年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
年度			
年度			
総計	32,700,000	9,810,000	42,510,000

研究分野：ソフトウェア

科研費の分科・細目：ソフトウェア工学

キーワード：無線センサーネットワーク

1. 研究開始当初の背景

無線通信可能な多数の小型センサーノードを環境内に設置して構築した無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) が、実世界の環境情報を収集する基盤として期待されるようになった。ネットワークの管理コストや、アプリケーション開発コストを低減するために様々な WSN ミドルウェアが提案、開発されてきた。

しかし、既存の WSN ミドルウェアは、1つの WSN に対して同時に1つのアプリケーションしか実行しない、クローズな WSN を

対象としており、WSN を複数のアプリケーションが共有するオープンインフラとして活用することができなかった。

2. 研究の目的

本研究では、次世代の実環境と密に連携する状況依存型ソフトウェア普及のために、WSN のオープンインフラ化を実現するミドルウェアを開発することを目的とする。WSN を、多数のアプリケーションが運用時に追加投入されるオープンインフラ化するためには、次の様な(1)～(4)の要求を満たす WSN ミ

ドルウェアが求められる。

(1) ネットワーク詳細を隠蔽したアプリケーション開発

オープンインフラ化された WSN では、ネットワーク内部の詳細を意識せず、期待する性能を満たすアプリケーションを開発できることが求められる。

しかし、WSN アプリケーションは、無線アドホックネットワークを構成する個々のノードを制御するプログラムとして最終的には記述されなければならない。従って、アプリケーション開発者がセンサーノードの配置状況、バッテリー残量、ネットワークトポロジーなど、WSN の詳細を考慮して、アプリケーションの詳細な動作を分析、設計することが求められてきた。このため、開発者はデータの計測処理だけでなく、WSN の状態を考慮して、ネットワーク内の詳細動作を分析・設計しなければならない。WSN アプリケーションの開発コストを増大させる要因となっていた。

従って、オープン WSN のためのミドルウェアは、ネットワーク内部の詳細を隠蔽することで、個々の WSN に依存せず、アプリケーションの本質的な関心事であるデータ計測処理に集中できるアプリケーション開発を可能にすることが求められる。

(2) 運用時のプログラム配備

WSN をオープンインフラ化するためには、アプリケーション実行に必要なプログラムを各ノードに対し運用時に配備可能でなければならない。また、複数のアプリケーションによって WSN が共有されるため、稼働可能なアプリケーション数を最大化することが求められる。

従来のミドルウェアでは、アプリケーション用のタスクを配備する場合、WSN の運用を一時停止する必要があったり、アプリケーションに不必要なノードにまで配備されてし、などの問題があった。

オープン WSN のためのミドルウェアでは、実行可能なアプリケーション数を最大化するために、各タスクは必要な最小限のノードにのみ運用時に配備する能力が求められる。

(3) 分解能にあわせた消費資源量の削減

WSN を構成するセンサーノードはバッテリー駆動しているため、稼働可能な期間に限りがある。また、通信、CPU 等の資源も乏しい。アプリケーション側の品質要求を満たしつつ、長期にわたって WSN を維持するためには、品質要求を満たしつつネットワーク内の消費資源量を抑えることが求められる。

特に、計測値の変化に対する感度を表す分解能は、WSN アプリケーションの特徴的な

品質である。アプリケーションの要求に対して過敏すぎる分解能が設定された場合、不必要な通信が多発し、消費資源量が增大してしまう。ミドルウェアは WSN や物理環境の状態にあわせて、要求された分解能を保ちつつ消費資源量を抑える能力が求められる。

(4) 攻撃者の発見

オープン WSN では、悪意のある攻撃者の存在を考慮し、攻撃への耐性を備えることが求められる。特に、環境内に設置されたノードは奪取が容易であり、奪取されたセンサーノードが乗っ取られ、攻撃の起点として利用されることが考えられる。

センサーノードが悪意のある攻撃者に乗っ取られた場合、センサーノードで使用されている暗号鍵についても奪取されてしまう。従って、暗号鍵を用いた単純な署名の確認だけでは、異常を検知することはできない。このような乗っ取られたノードは、DoS 攻撃や転送メッセージの改ざん等の攻撃に利用される。メッセージの改ざんを行った場合は、送信元の署名確認を行うことで改ざんの実事を検知できるが、誰が改ざんしたのかを判定することはできない。攻撃者を特定するためには、転送ノード全てに署名を付けさせることで攻撃ノードの特定が可能となるが、一方でメッセージのオーバーヘッドが増大し、WSN に多大な負荷をかけてしまう。WSN を保護するためには、ミドルウェアは、攻撃の起点となる乗っ取られたノードを、少ない消費資源量で発見し、排除する能力が求められる。

本研究では(1)~(4)で挙げた要求を満たす WSN ミドルウェアを開発するための各研究課題を解決し、ミドルウェアの開発し、その成果を公開する。

3. 研究の方法

(1) ネットワーク詳細を隠蔽したアプリケーション開発

ネットワーク詳細を隠蔽したアプリケーション開発を実現するために、モデル駆動開発手法の技術を応用して、ネットワーク詳細を隠蔽したモデルから、各ノード上で動作するプログラムを、段階的な自動変換を経て生成するモデル変換手法を提案した。

まず、WSN 内部での典型的な動作パターンを、ソフトウェアパターンとして抽出し、各パターンの効果やパターン間の関係をまとめた。

次に、WSN アプリケーション事例や既存ミドルウェアの提供する記述言語を分析することで、観測データやその解析方法を記述するデータレベルモデル、ネットワークトポロジーやネットワークが実行するマクロ動作

を記述するネットワークレベルモデル、各センサーノードの動作を記述するノードレベルモデルという、抽象度の異なる3つのモデリング言語を分析、設計した。

さらに、抽出したソフトウェアパターンを基に、各モデル間の変換ルールを整理した。抽象的なモデルから具体的なモデルに変換する場合、変換方法によって得られる品質や消費資源量が異なる複数通りの変換方法が存在する。モデル変換時は適切なアプリケーションへの品質要求と消費資源量を考慮して適切な変換パターンを選択することで、開発者に対してはネットワークの詳細を隠蔽しつつ、高品質なアプリケーションを開発することが可能となる。

(2) 運用時のプログラム配備

運用時にWSN内の適切なノードへのプログラム配備を実現するために、配備ノード選択手法と、効率の良いプログラム配備手法を提案した。

①WSNアプリケーションは、WSNの複数のノードを連携することで動作する。また、配備ノードの適切さは、使用するノードの組み合わせによって変化する。従って、アプリケーション実行に最適な配備ノードを選択するためには、全てのノードの組み合わせを評価する必要がある。しかし、評価のためには、各ノードの情報を収集しなければならないため、そのために生じる通信がWSNに負荷をかけてしまう。また、評価数がセンサーノード数に対して組み合わせ爆発を起こす。従って、配備ノード選択のために多量の通信や評価時間が必要となってしまう。そこで、本研究では、観測対象の地理情報に基づいて評価候補となるノード数を制限する手法を提案し、準最適解を高速、省通信で求める手法を提案した。本手法では、評価対象ノードを絞り込む範囲の広さによって消費資源量と発見できる解の質のトレードオフを調整することができる。さらに、対象の移動速度に応じて範囲の広さを動的に調整する手法を提案し、トレードオフを高い品質で調整することを可能とした。

②アプリケーションに必要なプログラムを選択したノード群に対して配備する場合、多くの場合各プログラムは地理的に近いノード群に配備されるため、局所的なトラフィックが増大してしまう。局所的なトラフィックが高まると、近隣ノード間で通信の衝突が多発し、遅延の増大やパケットの喪失による再送など、通信の品質が悪化してしまう。

そこで、本研究では、マスター・スレーブ方式のプログラム配備手法を提案する。アプリケーションを構成するプログラム群を1つ

のタスクグループとして捉え、グループ内を管理するマスターと、実際に計測処理を実施するスレーブとに分ける。マスターはスレーブ用のプログラムを全て保持する。プログラム群を配備する場合にはマスターのみを配置し、マスターが配備先のノードからスレーブを該当ノードに配備し、実行を開始する。プログラム群を再配備するときも、マスターが各スレーブの実行を終了し、再度マスターのみで配備処理を行う(図1)。マスター配備時には同時に1つのプログラムしか配備されないため、複数ノードによる通信の衝突が生じにくく、安定して高品質な通信で配備することが可能となる。

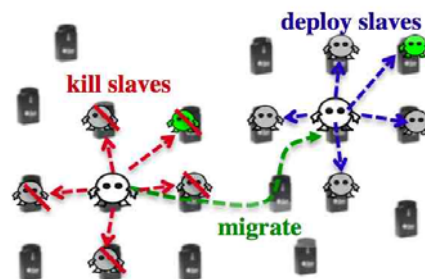


図1. マスター・スレーブ型プログラム配備

(3) 分解能にあわせた消費資源量の削減

アプリケーションが要求する分解能に基づいて個々のセンサーノードの感度を決定するセンサーモデルを提案する。提案するセンサーモデルでは、観測値の値域をN個の閾値によって分割し、N種類の出力値にマップされる。各センサーノードは、センサーモデルによって得られた出力値に変化があった場合、その出力値を報告する。従って、閾値をまたがないような観測値の微小な変化は、無視される。この分割数Nによって、各ノードの分解能と通信コストのトレードオフをとることが可能となる。Nが大きくなると分解能は大きくなるが通信頻度は低下し、Nが小さくなると分解能は小さくなるが通信頻度が増加する(図2)。

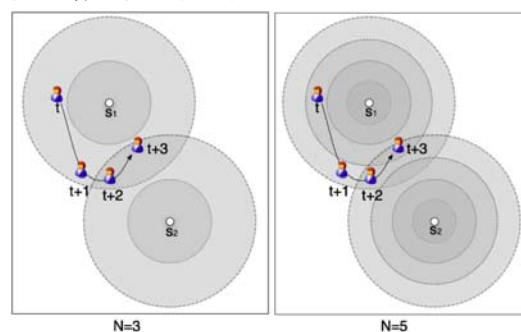


図2. N分割センサーモデル

さらに、アプリケーション全体の分解能を満たすような分割数Nを決定するために、各

ノード間の観測領域の重なりを考慮して、各センサーノードに設定する分割数を決定するためのアルゴリズムを提案した。

(4) 攻撃者の発見

攻撃者となる乗っ取られたノードを、少ないオーバーヘッドで、確率的に推定する手法を提案した。攻撃検知のオーバーヘッドを少なくするために、メッセージに付ける署名のサイズを制限した。署名のサイズを制限した場合、攻撃者の特定を確率的にしか行えなくなる。そこで、メッセージ改ざん等の攻撃毎に、攻撃時の行動パターンをモデル化し、モデル化した行動パターンに基づいて、攻撃が検知された場合の、各ノードの攻撃者としての尤度を算出する手法を提案した。攻撃者は繰り返し攻撃を仕掛けてくるため、繰り返し算出された尤度を加算することで、攻撃者となる乗っ取られたノードを検知することができる。

(1)~(4)の研究成果に加えて、それらの成果を反映したWSNミドルウェアを開発した。WSNミドルウェアは、Sun Microsystems社のセンサーノードSunSPOT上で動作するように開発され、ネットワーク詳細を隠蔽したアプリケーション記述、消費資源量の少ないマスター・スレーブ型プログラム配備など、様々な研究成果を実装した。さらに、開発したWSNミドルウェアを、Webを通じて公開した。

4. 研究成果

(1) ネットワーク詳細を隠蔽したアプリケーション開発

データレベルモデル、ネットワークレベルモデル、ノードレベルモデルという3つの抽象度が異なるモデルを記述するモデリング言語を提案し、WSNの典型的事例から抽出した変換パターンを基にしたモデル変換ツールを開発した。

従来の中ドウェアでも、アプリケーションを、ネットワーク詳細を抽象化したモデリング言語で記述可能であったが、ネットワーク内の詳細動作への変換が固定的であり、環境に合わせて品質を向上させるような変換を行うことができなかった。

本手法では、環境に合わせて適切な変換ルールを選択することで、高品質なアプリケーションを自動生成することが可能となる。

(2) 運用時のプログラム配備

①全てのセンサーノードの組み合わせを評価する場合、組み合わせ爆発を起こすため、使用するセンサーノードを3つのみに制限し、同時に1つのセンサーノードのみを再選択することで、評価によって生じる負担を低減する手法が提案されている。しかし、このような手法では、再選択されない2つのノードは固

定なため、品質の高いノードの組み合わせを選択することができない。

提案手法では、同時に3つのセンサーノードを選択し直すのが、評価対象となるセンサーノード群を、地理情報を基に制限することで、再評価によって生じる通信量や計算負荷を軽減している。

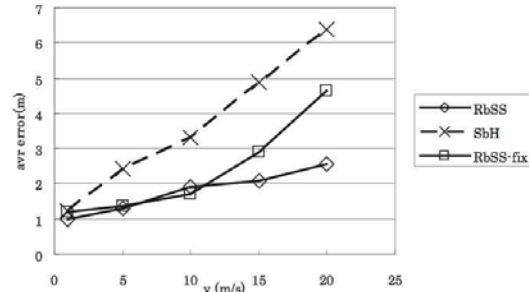


図3. センサーノード選択手法の効果

人の移動追跡アプリケーションに基づいた評価実験において、センサーノードを1つのみ再選択する手法(SbH)と比較し、提案手法(RbSS, RbSS-fix)は消費電力量を40%程度に抑えつつ、測定誤差の少ない観測を可能とすることを確認した(図3)。

②MateやDelugeなどの既存ミドルウェアでは、運用時に配備プログラムの更新が可能だが、プログラムは全てのノードに配備されてしまう。従って、観測に不必要ノードにまでプログラムが配備されてしまい、1つのWSNあたりに稼働可能なアプリケーション数が少なくなってしまう。AgillaやActorNetなどのミドルウェアでは、アプリケーションを構成する個々のタスクレベルで配備するノードを指定可能だが、対象の移動などに応じてアプリケーションを再配置する場合に、局所的な通信が多発することで送信遅延の増大や再送による送信パケット数増加を引き起こす。

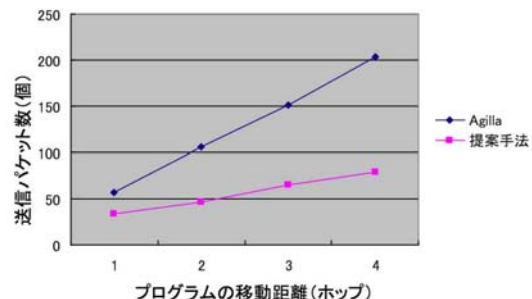


図4. マスター・スレーブ型プログラム配備の効果

提案したマスター・スレーブ型のプログラム配備とAgillaによるプログラム配備の送信パケット数を比較したところ、ある実験で

は、提案手法の送信パケット数は Agilla の場合の 50%以下まで押さえることができた (図 4)。このように、提案手法を用いることで、局所的な通信衝突を抑制し、遅延の少なく、通信コストも小さいプログラム配備が可能となる。

(3) 分解能にあわせた消費資源量の削減

これまでのセンサーモデルは、センサー観測値に変化がある度に計測値を報告するモデルや、センサーによる対象検知の有無のみを報告するモデルが提案されていた。しかし、これらのセンサーモデルはそれぞれ分解能の大小に違いはあるが、分解能の調整を行うことはできなかった。併せて過不足ない通信を行えるようにはなっていない。

提案したセンサーモデルでは、分割数 N を調整することで、分解能と通信コストのトレードオフを調整することが可能である (図 5)。

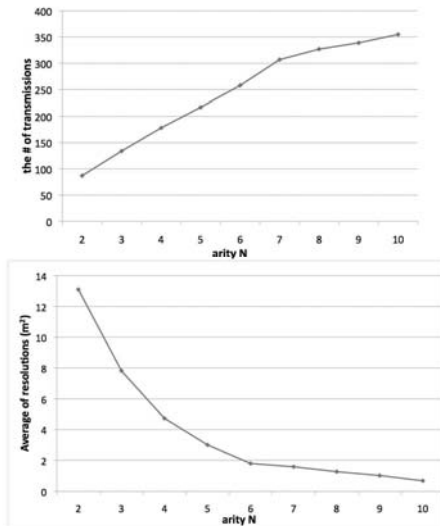


図 5. N 分割センサーモデルによるトレードオフ調整

また、各ノードの配置状況から観測範囲の重なりを判定し、アプリケーション全体の分解能要求を満たし、通信コストを最小化する分割数割り当て手法を提案した。全てのノードに同じ分割数を割り当てる単純な手法と比較し、分解能を満たしつつ通信コストを平均で 20%削減することができた。

(4) 攻撃者の発見

全ての転送ノードが十分な長さの署名を付ける従来手法 (PNM) では、通信のオーバーヘッドが増大し、WSN 自体に多大な負荷をかけてしまう。提案手法では、付ける署名の長さを制限することで通信オーバーヘッドを押さ

え、且つ確率的に攻撃者を検知する手法を提案している。図 6 に示す実験結果では、6 割以上の精度で攻撃者を検知するのに必要な通信データ量を大幅に削減することが確認できた。

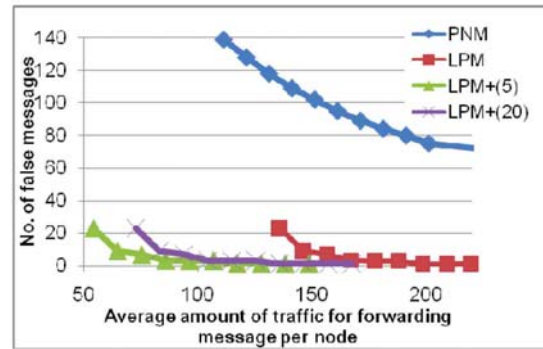


図 6. 攻撃者推定手法の効果

(1)~(4)の成果を反映したミドルウェアは、本研究プロジェクトの Web ページ (<http://xac-project.jp>) にて公開された。また、パリ第 6 大学 LIP6 研究所において、AmbientIntelligence アプリケーションを開発するための WSN 観測システムを構築するにあたり、本ミドルウェアが採用され、運用された実績を持つ。

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 25 件)

(1) 清 雄一, 本位田 真一, “多数のノード取得攻撃に対応した無線センサーネットワークにおける不正イベントの検知”, 査読有り, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 92-B, No. 4, pp. 678-688, 2009 年 4 月。

(2) 清 雄一, 本位田 真一, “多数のノード取得攻撃に対応した無線センサーネットワークにおける複製ノードの分散検知 ” 電子情報通信学会論文誌, 査読有り, Vol. 92-B, No. 4, pp. 689-699, 2009 年 4 月。

(3) 清雄一, 本位田真一: “無線センサーネットワークにおける不正メッセージ作成元ノードの検知” 情報処理学会論文誌, 査読有り, Vol. 50, No. 2, pp. 787-797, 2009 年 2 月。

(4) 末永俊一郎, 吉岡信和, 本位田真一, “無線センサネットワークにおける複数プログラムの動的配備 ”, 情報処理学会論文誌, 査読有り, Vol. 50, No. 1, pp. 14-30, 2009 年 1 月。

(5) 鄭 顕志, 深澤 良彰, 本位田 真一, “効率の良いネットワーク内処理のためのノー

ド選択指標の提案”, 情報処理学会論文誌, 査読有り, Vol. 49, No. 6, pp. 1872-1884, 2008年6月.

(6)清雄一, 本位田真一: “無線センサーネットワークにおけるFalse Eventの検知” 情報処理学会論文誌, 査読有り, Vol. 49, No. 2, pp. 628-638, 2008年2月

[学会発表] (計 97 件)

(1)Kenji Tei, Hikotoshi Nakazato, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden, “N-ary Sensor Model for Target Tracking in Wireless Sensor Networks”, the First International Workshop on Energy Aware Design and Analysis of Cyber Physical Systems (WEA-CPS ’ 10), in conjunction with CPSWEEK in Stockholm, pp.34-41, Sweden. April 12, 2010, 査読有り.

(2)Yuichi Sei, Shinichi Honiden, “Distributed Detection of Node Replication Attacks Resilient to Many Compromised Nodes in Wireless Sensor Networks”, The Fourth International Wireless Internet Conference (WICON 2008), Maui, Hawaii, USA, November 17-19, 2008, 査読有り.

(3)Susumu Toriumi, Yuichi Sei, Shinichi Honiden “Energy-Efficient Event Detection in 3D Wireless Sensor Networks” the 1st. IFIP Wireless Days Conference 2008, United Arab Emirates, November 24 - 27, 2008, 査読有り.

(4)Eric Platon, Shunichiro Suenaga, Nobukazu Yoshioka, Shinichi Honiden “Transparent Application Lifetime Management in Wireless Sensor Networks”, Demo Track of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2008), Seoul, South Korea, September 21 - 24, 2008.

(5)Yoshiyuki Nakamura, Kenji Tei, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden, “Region-based Sensor Selection for Wireless Sensor Networks”, the 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (sutc 2008), pp. 326-331, 2008, 査読有り.

(6)Shunichiro Suenaga, Shinichi Honiden: “Name-based Location Service for Mobile

Agents in Wireless Sensor Networks” First International Conference on MOBILE Wireless MiddleWARE, Operating Systems, and Applications (MOBILWARE 2008), Innsbruck, Austria, February 12-15, 2008, 査読有り.

[図書] (計 1 件)

(1)Kenji Tei, Shunichiro Suenaga, Yoshiyuki Nakamura, Yuichi Sei, Hikotoshi Nakazato, Yoichi Kaneki, Nobukazu Yoshioka, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden, “XAC Project: Towards a Middleware for Open Wireless Sensor Networks, chapter in book “Designing Solutions-Based Ubiquitous and Pervasive Computing: New Issues and Trends”, pp.214-231, 2010年3月, 査読有り.

[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

<http://xac-project.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本位田 真一 (HONIDEN SHINICHI)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学
研究系・教授

研究者番号: 70332153

(2) 研究分担者

深澤 良彰 (FUKAZAWA YOSHIAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 20165252

吉岡 信和 (YOSHIOKA NOBUKAZU)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学
研究系・准教授

研究者番号: 20390601

石川 冬樹 (ISHIKAWA FUYUKI)

国立情報学研究所・コンテンツ科学
研究系・助教

研究者番号: 50455193

鄭 顕志 (TEI KENJI)

早稲田大学・メディアネットワーク
センター・助教

研究者番号: 40434295

(3) 連携研究者

特になし