

モバイルセンサノードと スマートスペースの協調分担処理機構の実現

青木 崇行¹ 中澤 仁^{2 3} 高汐 一紀^{1 2 3} 徳田 英幸^{1 2 3}

¹ 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 ² 慶應義塾大学 環境情報学部

³ 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

本論文では、モバイルセンサノードとスタティックセンサノードの2種類のセンサノードを用いて、モバイルセンサノードとスマートスペースの協調分担処理機構の設計、実装、評価について述べる。従来のセンサシステムの多くは、モバイルもしくは環境埋め込み型スタティックのどちらかのセンサだけを用いており、センシング範囲や計算処理能力の観点から非効率になっていた。本研究ではまず両者のセンシングモデルを構築し、モバイルとスタティックの両者によるセンシング範囲の違いを明らかにする。これらのモデルを協調分担処理機構内部に保持することにより、センシング範囲の協調分担処理が実現される。また、協調分担計算機構を実装することにより、両者に計算性能の差があることを評価し、本協調分担処理機構の有用性について実証する。本機構により、モバイルセンサノードとスマートスペースが役割分担を行うことになり、センサシステムのセンシング範囲を格段に拡大できるだけでなく、その処理速度も向上する。

Role-sharing Model between Mobile Sensor Nodes and Smart Space

Soko Aoki¹ Jin Nakazawa^{2 3} Kazunori Takashio^{1 2 3} Hideyuki Tokuda^{1 2 3}

¹ Graduate School of Media and Governance, Keio University

² Faculty of Environmental Information, Keio University

³ CREST, JST

This paper proposes a role-sharing model between mobile sensor nodes and smart space. In the smart space, the sensors are embedded in the wall and ceiling. Although the sensors in the smart space are static, since they are connected to the computer, their computational resource is big. On the other hand, the mobile sensor nodes have mobility and can change the sensing coverage although they have weak computation capability because of a weak board computer attached. We designed and implemented the role-sharing model of these two kinds of sensors to increase the sensor coverage and computation power. In this paper, we discuss the coverage model and computation model of mobile and static sensor node and presents their evaluation to clarify the effectiveness of this role-sharing model between mobile sensor and smart space.

1. はじめに

実世界の環境情報を検知し、その実世界環境情報をコンピュータで処理して利用するセンサネットワークシステムが普及し始めている。センサネットワークシステムを構築するにあたり、どのようなセンサノードをどのように設置するかが重要な検討要素になる。たとえば、単価の安いセンサの場合には多量のセンサを静的（スタティック）に配置するのが効率的であるし、単価が高いセンサの場合はその一つのセンサを移動可能（モバイル）にして運用するのが効率的になる。ここで静的なセンサと動的なセンサのどちらを利用するか判断する基準として、センサノードの単価、計算処理能力、ネットワーク接続速度、蓄積可能なデータ容量、電力容量等が挙げられる。本研究の目的は、移動可能なセンサであるモバイルセンサノードと環境に静的なセンサを埋め込んだスマートスペースを設計・実装し、モバイルセンサノードとスマートスペースのイ

ンタラクションを実現することにより、効率的なセンサ情報処理システムを実現することである。

センサネットワークやセンサノードに関する研究は、空間内を移動可能なロボットにセンサを搭載して実世界センシングを実現したモバイルセンサノードの開発研究や、部屋や空間内に大量の静的なセンサをばら撒いて実世界センシングを行うセンサネットワークシステムの開発研究など、いくつか行われている。しかし、既存の技術ではモバイルセンサノードとスタティックセンサネットワークシステムの開発は別々に行われていることが多く、その組み合わせにより実現される機能や性能についての議論がなされていない。ロボティクセンサとスタティックセンサが協調し両者での機能分担を実現するためには、それぞれの特性について評価を行い、その評価に基づいて協調分担処理機構を設計・実装する必要がある。本論文では、これらの問題をモバイル・スタティック協調処理実現問題として提示する。

本論文では、モバイル・スタティック協調処理実現問題を解決する為に、まずモバイル・スタティックそれぞれの特性について評価・議論を行う。そして、その評価を基にモバイルセンサノードとスマートスペースの協調処理機構を提案し、実際のモバイルセンサノードとスマートスペースを用いて、性能評価を行う。協調処理機構は、モバイルセンサノードとスマートスペースに共通のデータ収集機能、データ計算機能、データ通信機能、データ保存機能と、モバイルセンサノードにだけ存在するロボット制御機能、またスマートスペース側に実現される協調分担比較機能から構成される。

本論文では、まず第2章において、モバイルセンサノードとスマートスペースの概要を説明し協調処理モデルについて述べ、第3章において協調処理機構の設計と実装について説明する。第4章では、本協調処理機構の評価を行う。そして第5章で関連研究との比較を行い、第6章で今後の課題を示し、最後に第7章で本論文をまとめる。

2. モバイルセンサノードとスマートスペースの協調処理モデル

本論文では移動可能なセンサノードをモバイルセンサノードと呼び、また部屋の壁・天井・床等に移動不能なセンサを埋め込んだ環境をスマートスペースと呼び、そのスマートスペース内でセンサ情報を取り扱うマシンをスタティックセンサノードと呼ぶことにする。本章では、モバイルセンサノードとスマートスペースの協調処理実現機構を実現するにあたっての既存の技術の問題点を説明する。

2.1 モバイルセンサノードとスマートスペース

センサネットワークを構成するセンサノードには大きく分けて、空間内を移動可能なロボット型のモバイルセンサノードと、空間内にセンサがばら撒かれたスマートスペース型のスタティックセンサノードの2種類がある。モバイルセンサノードにおいては、空間内を移動可能なことによりダイナミックにセンシング領域を変えられる反面、ロボット上で情報収集をしているコンピュータが非力であることが多い。一方で、スマートスペースにおいては、コンピュータを移動させる必要が無いため、モバイルセンサノードと比較してより性能が高いデスクトップやノートブック型のコンピュータを使うことが多い。図1にモバイルセンサノードとスマートスペースのイメージ図を示した。

モバイルセンサノードとスマートスペース型センサネットワークの長所について表1に示す。モバイルセンサノードにおいては、移動可能なことにより動いて



図1 モバイルセンサノードとスマートスペースのイメージ図

いるオブジェクトの追従やある地点の重点的センシングが長所となり、またスマートスペースにおいては部屋内に均等にセンサを設置することにより均質的・全体的なセンシングが長所となる。モバイルセンサノードとスマートスペースを協調的に利用することにより、相補的な機能実現が可能となり、全体の均質センシングとある地点の重点センシングを両立できる。

2.2 協調分担検知問題と協調分担計算問題

本論文では、センサネットワークを用いた環境モニタリングアプリケーションの例として、以下に示すシナリオ「オフィス内生活環境調査」を扱う。

あるデザイン制作会社のオフィスにおいて、良質な職場環境の維持の為にセンサネットワークを活用したオフィス内環境モニタリングシステムを導入することにした。まずオフィス内で働く労働者のために、オフィスのすべての地点における温度・照度・空調からの風の強さを調べる必要が出てきた。また、デザイン関連の制作物への影響からオフィスが外部から受ける振動の影響や音の影響を調査する必要がある。このような状況下で、オフィスの壁や天井といった労働者の邪魔にならない場所に静的なセンサを導入した。また、通路や机の周辺といった通常は労働者が居る場所については、モバイルセンサノードによる巡回監視を実現した。

このシナリオを実現するには、オフィスの壁や天井に設置したスタティックなセンサノードからの情報収集機構が必要になる。またオフィス内を移動可能なモバイルセンサノードを実現する必要がある。さらに、状況に応じてはモバイルセンサノードとスマートスペースの役割分担・協調処理を実現することにより、より効率的なセンサシステムの運用が可能になる。

表 1 協調動作分類表

Application	Mobile Sensor	Static Sensor	Mobile and Static Sensor
Environment Monitoring	センシングにムラあり	センシングにムラあり	相補的にムラを防げる
Object Tracking	全域をカバーできない	追従センシングできない	全域・追従センシングできる
Location Dependent Service	ロボットが追従して実現	環境側センサが検知して実現	場所ごとに役割分担

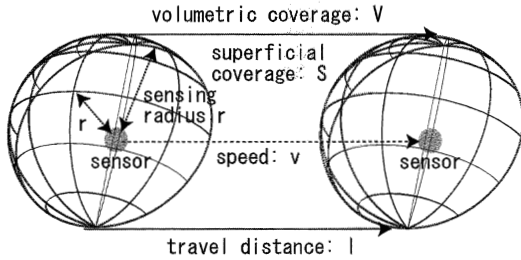


図 2 モバイルセンサノードの 3 次元空間モデル

環境や家屋内に多数のセンサノードを配置して、居住者の行動や家屋内の状況を監視する研究はいくつか行われている¹⁾²⁾。また、環境内を移動可能なノードにセンサを装着することにより、モバイルセンサノードを実現する研究も数多く存在する³⁾⁴⁾⁵⁾。これらの先行研究では、それぞれスタティックノードだけ、モバイルノードだけでセンサシステムを構築しており、スタティックノードとモバイルノードの協調処理に関する検討がされていない。特にセンサシステムにおいて重要なセンシング範囲とセンサノードの計算処理能力について、各ノード単独での検討は行われているものの、協調モデルでの検討がない。本研究では、モバイルノードとスタティックノードの協調分担により実現されるセンシング範囲把握を協調分担検知問題とし、それらの 3 次元空間検知モデルを構築することにより解決する。また、モバイルノードとスタティックノードによるセンサ情報処理の分担処理をすることを協調分担計算問題とし、協調分担計算処理機構を構築し性能評価を行うことにより、協調分担の意義について考察する。

2.3 協調分担モデル

本章では、スタティックセンサノードとモバイルセンサノードによる協調分担検知問題と協調分担計算問題に対するアプローチとして、それぞれの解決モデルを提示する。協調分担検知モデルにおいては、スタティックとモバイルの双方におけるセンシング容積を求め、またそれらの干渉について検討する。また、協調分担計算モデルにおいては、スタティックとモバイル双方の計算処理能力を考慮し、計算処理の最適な分配方法について検討する。

2.3.1 協調分担検知モデル

本章ではスタティックセンサノードとモバイルセン

サノードの検知容積について、3次元空間モデルの構築を行う。本モデルでは、センサはある一定のセンシング範囲半径 r を持つと想定し、そのセンサが動かない場合と動かない場合について計算式を求めた。これらのモデルを用いることにより、センサシステム開発者は開発しているセンサノードのセンシング領域を把握できるだけでなく、本モデルをソフトウェア内で保持することにより、スタティックセンサノードとモバイルセンサノードの検知領域の分担機能を実現できる。本モデルで用いる変数について、図 2 に示した。ここでは指向性を持たないセンサを用いているが、センサの多くが移動可能不能どちらにおいても天井、壁、床といった 2 次元平面に置かれることが予想されるため、センシング範囲の形状を球体ではなく半球とした。

まず、スタティックセンサノードのセンシングモデルについて、式 1 に示した。ここで V : センサの検知空間容積、 r : センサのセンシング半径とする。

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \div 2 \quad (1)$$

次にモバイルセンサノードについて、式 2 に示した。ここで V : センサの検知空間容積、 r : センサのセンシング半径、 l : モバイルセンサノードの移動距離とする。スタティックセンサノードに比べて移動できる分だけセンシング領域が拡大されていることがわかる。

$$V = \left(\frac{4\pi r^3}{3} \div 2\right) + \frac{\pi r^2 l}{2} \quad (2)$$

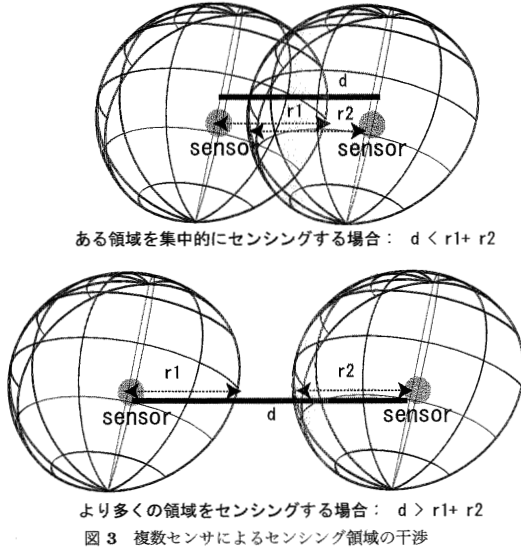
スタティックセンサノードとモバイルセンサノードの協調分担センシングを実現するにあたり、それぞれのノードが相手ノードが担当している領域を把握するために、二つのセンサ間の直線距離が重要になる。例えば、スタティックセンサのセンシング範囲を r_1 、モバイルセンサノードのセンシング範囲を r_2 、2 者間の直線距離を d とすると式 3 が算出される。

$$d \leq r_1 + r_2 \quad (3)$$

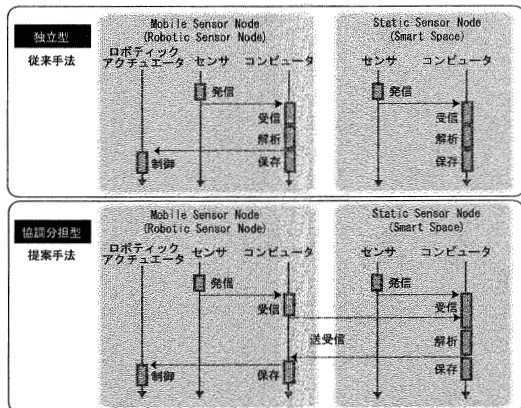
式 3 が成り立つ時は、二つのセンサノードによるセンシング領域が重なっており、また成り立たない場合はセンシング範囲が重なることなく、両者が十分に離れていることを示している。一つのオブジェクトに対して二つのセンサでセンシングを行いたい場合は前者を、二つのセンサでより広い領域をセンシングしたい場合は後者の距離関係になると良い。それらの関係について図 3 に示した。

表 2 協調分担分類表

番号	センサデータ収集	センサデータ解析	センサデータ保存	使用頻度	説明
1	モバイル	モバイル	モバイル	検討外	単独利用モデル
2		モバイル	モバイル	頻度中	データ収集と解析をモバイルノード上で行う
3			スペース	頻度中	データ収集と保存をモバイルノード上で行う
4			スペース	頻度高	データ収集のみモバイルノード上で行う
5	スペース	モバイル	モバイル	頻度少	データ解析と保存をモバイルノード上で行う
6			スペース	頻度少	データ解析のみモバイルノード上で行う
7			スペース	頻度少	データ保存のみモバイルノード上で行う
8			スペース	検討外	単独利用モデル



センサノードとスマートスペース間のタスクの機能分担について図 4 に例を示す。この例では、センサデータの解析（計算）処理のみをより計算能力の高いスタティックセンサノードで実施し、その結果をモバイルセンサノードが受信している。センサネットワークアプリケーションに必要なデータ処理をデータ収集、データ解析、データ保存の 3 段階と仮定すると、すべての段階においてモバイルノードかスタティックノードかという 2 通りが存在するので $2 * 2 * 2 = 8$ の 8 通り存在する。すべての場合を表 2 に示した。ここで使用頻度とは、協調分担の組み合わせとして使用される可能性が高そうなものを頻度高として、使用される可能性が低そうなもの（組み合わせとして非効率なもの）を頻度少とした。例えば番号 4 はデータ収集のみ環境内を移動可能なモバイルノードで実現し、その他の処理をより計算能力の高いスタティックノードで実現する例である。



各処理の実行ノードを決定するために使用する基準値は、処理速度、データ容量、消費電力等が挙げられる。上述の組み合わせにおいては処理速度を基準として使用頻度を記入した。処理速度を基準とすると、ある処理を完了するのに必要な時間が最も短くなる協調モデルを選定する。データ容量を基準とすると、そのアプリケーションが取得すべきデータ量と、保存先ストレージのデータ容量の関係から協調モデルを選定する。そして消費電力を基準とすると、特にバッテリー駆動で動作しているモバイルセンサノードにおける消費電力を最小にするような協調モデルを選定することになる。本論文では、特に明記のない限り、計算処理速度を基準としたノード選定を採用しており、データ容量や消費電力については今後の課題とした。

3. 協調分担処理機構

2.3.2 協調分担計算モデル

モバイルセンサノードとスタティックセンサノードの協調分担に関して、センサネットワークアプリケーションにおいて必要なセンサデータの受信、解析、保存等の各タスクをどのノード上で実行するのが、もっとも効率的なのかを求めるのが課題になる。モバイル

本章では、モバイルセンサノードとスマートスペースの協調分担処理機構の設計と実装について説明する。設計においては、本協調分担処理機構で実現するデータ収集機能、データ計算機能、データ通信機能、データ保存機能、ロボット制御機能、協調分担比較機能の 6 機能について説明する。実装においては、今回実装

に用いたハードウェアを紹介するとともに、実装方法について紹介する。

3.1 設 計

モバイルセンサノードとスマートスペースの双方の共通機能にはデータ収集機能、データ計算機能、データ通信機能、データ保存機能の4機能があり、またそれぞれの独自機能としてモバイルセンサノードにはロボット制御機能、そしてスマートスペースには協調分担比較機能がある。さらに協調分担検知問題を解決するために、各ノードにおいて現在センシングしている領域についてソフトウェア内部で空間モデルを保持する必要がある。それぞれの機能について以下で説明する。本協調分担処理機構の全体像について、実装で用いたハードウェアの写真とともに図5に示した。

データ収集機能は、センサデバイスからモバイルセンサノードもしくはスマートスペースがデータを受信する機能である。センサデバイスがモバイルセンサノードやスマートスペースに有線で接続されている場合は、まずはその接続先に対してデータを送ることになるが、無線で接続されている場合は接続先のデータ容量やネットワーク帯域等を考慮して送信先を決める。データ計算機能は、データ収集機能によって集められたデータに対して、特徴量の検出や圧縮処理等の各種解析を実現する機能である。本機能については、モバイルセンサノードとスマートスペースのそれぞれの計算処理性能やデータ容量等を考慮し、どちらのノードにおいて解析を行うかを決定する。データ通信機能は、データ計算機能で解析を終えたデータを保存先に送信する機能である。データ計算機能とデータ通信機能が同一ノード上で動作している場合にはネットワークを用いる必要はないが、別ノード上で動いている場合については、本データ通信機能により解析結果を送る必要が出てくる。データ保存機能は、解析結果後のデータをストレージデバイスに保存する機能である。モバイルセンサノード上で頻繁に参照されるようなデータの場合は、モバイルセンサノード上で保存した方が効率よくなり、逆にあまり参照されないようなデータについては、スマートスペース側で保存をした方がデータ容量が相対的に少ないモバイルセンサノードのストレージへの負担が軽くなる。

ロボット制御機能はスマートスペース空間内を移動可能なロボットの制御を行う機能である。モバイルセンサノードにネットワーク接続機能が搭載されている場合には、技術的には本機能をスマートスペースにおいて実現可能であるが、ロボットの制御というリアルタイム性を求められる機能のため、ネットワーク遅延

表3 シンクノードの性能比較

Type	Personal Computer	Embedded Computer
Name	Lenovo Thinkpad T43p	Gumstix Netstix 400xm
CPU	Intel PentiumM 1.70GHz	Intel XScale PXA255 400MHz
Memory	2.00GB RAM	16MB RAM
Storage	60GB HDD	1GB MMC
OS	Linux (Fedora)	Linux
Power	AC supply	Battery

等によってスマートスペースからモバイルセンサノードへの制御命令の到達が遅れてはならない。したがって、本協調処理実現機構においては移動制御機能はモバイルセンサノード上で動作させる。

協調分担比較機能においては、上記の4種類の共通機能に関して、どの機能をモバイルセンサノードで動作させ、どの機能をスマートスペース側で動作させるかを、それぞれのタスク処理に関するパフォーマンス比較を行ったり、過去の動作履歴等を参照しながら決定する機能である。

センシングモデルについては、モバイルノード、スタティックノード双方の実装時にパラメータとして保持し、2.2章で述べた協調モデルを使用することにより、センシング容積の計算が行える。また、モバイルノードとスタティックノード双方の位置情報を取得できれば、それぞれ干渉・役割分担計算を行え、より精度の高いセンシングを実現可能になる。特にスタティックノードが検知できる範囲は固定であるので、スタティックノードの検知できない領域をモバイルノードが検知するなどの工夫もセンシングモデルの実装により実現できる。

3.2 実 装

モバイルセンサノードとスマートスペースの協調分担処理機構について、以下のようなハードウェア構成で実装を行った。センサデバイスはワイヤレスセンサノードである Teco uPart⁶⁾ を使用し、スマートスペースでは uPart を壁、天井、机上に設置して、そのセンサデータをネットワークに接続された IBM Thinkpad で受信するようにした。また、uPart を移動可能なロボットである iRobot Create⁷⁾ 上に配置した。iRobot Create の制御については、組込 Linux コンピュータである Gumstix⁸⁾ を iRobot Create 上でシリアル接続することにより実現した。システム構成図を図5に、モバイルセンサノードとスマートスペースのそれぞれでセンサデータシンクノードとして動作するコンピュータの性能比較を表3に示す。

協調分担処理機構のソフトウェアについては、C言語によりセンサデータの受信、計算、送信、保存の各処理をスマートスペースとモバイルセンサノードのそれぞれで協調分担的に利用可能な機構をを構築した。スマートスペース (Thinkpad) とモバイルセンサノード

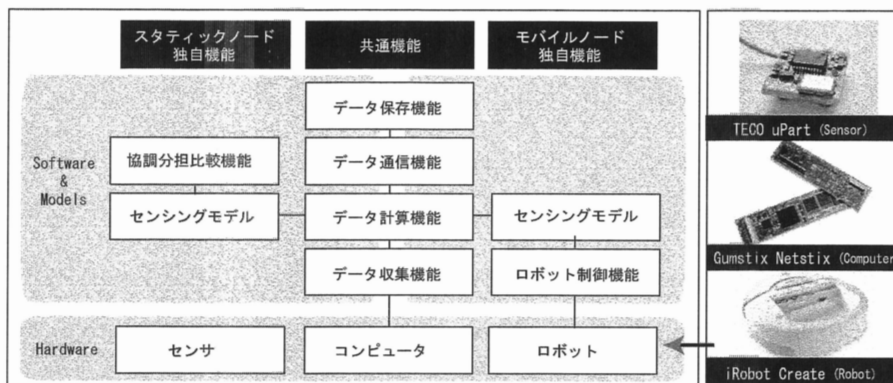


図 5 システム構成図

ド (Gumstix) 上で動くプログラムのソースコードは共通であり、それぞれの動作環境に応じてコンパイル、クロスコンパイルしてから動作させている。センサデータの受信では uPart からブロードキャストされるデータを取得し、計算においては保存されている過去の多量のセンサデータの平均値と現在取得されたセンサデータの比較処理を行う。データ送信においては受信したデータを必要に応じて別ホストへ送信し、保存においてはセンサデータをファイルとして永続化する仕組みを構築した。

4. 評価

モバイルセンサノードとスマートスペースの協調分担処理機構の評価として、定量的評価と定性的評価を行った。定量的評価では実装で用いたハードウェアを用いて性能評価を行う。定性的評価では、協調分担検知問題と協調分担計算問題の二つの問題がどのように解決されたかを説明する。

4.1 定量的評価

モバイルセンサノードに搭載されるコンピュータとしては Gumstix Netstix 400xm を、またスマートスペースに組み込まれるコンピュータとしては Lenovo Thinkpad T41p を想定し、性能比較を行った。なお Gumstix と Thinkpad の仕様比較表を表 3 に示す。

計算時間測定においては、多量のセンサ情報について、その情報量のカウント (Count)、センサ情報のうちの温度データの平均値の計算 (Average)、そして同じく温度データの分散値の計算 (Variance) の 3 種類の解析処理を Gumstix と Thinkpad の両方にて実行させ、その処理時間を計測した。なお、センサ情報は総数では 488246 データ、約 30MB あったが、平均値の計算と分散値の計算においては Gumstix にお

ける変数型の制限から、取り扱ったデータ数を 45000 に制限して計測を行った。結果は図 6 に示すとおりで、Thinkpad のほうが Gumstix に比べて 16 倍から 48 倍の処理速度を示した。例えば、分散値の計算においては Thinkpad では約 12 秒であったところが、Gumstix では約 3 分 40 秒要している。次に計算処理をモバイルセンサノード (Gumstix) からスマートスペース側 (Thinkpad) に移行する際に発生するデータ送信にかかる送信時間の測定を行った。ここでは、45000 のセンサデータが格納されている約 1.9MB のファイルを Gumstix の無線 LAN 経由にて Thinkpad に送信したところ、約 25 秒要した。計算時間において、Thinkpad と Gumstix の計算時間の差が 3 分 28 秒であったので、この 25 秒の送信時間とそれ以降の Thinkpad での計算時間を考慮に入れても、Gumstix からデータを Thinkpad に送信した方が処理時間が短くなる。

これらの結果により、多量のセンサデータ解析においてはスマートスペース側の方が圧倒的に高速に処理可能であり、特に多量のデータを扱う場合はモバイルセンサノードで取得したデータもスマートスペース側に送り処理をする意義があることがわかった。

4.2 定性的評価

定性的評価では、本論文で提示した協調分担検知問題と協調分担計算問題について、協調分担処理機構の実現によりどのように解決されたかについて考察する。

まず協調分担検知問題について、ロボットを用いたモバイルセンサノードを実現したことにより、壁や床といったセンサを取り付けやすい箇所だけでなく、通常時は人間の生活の邪魔になりうる箇所 (床面) もモバイルセンサノードが動き回ることにより、センシング可能な範囲になった。協調分担検知モデルを 2 章で

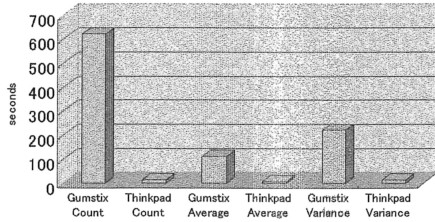


図 6 モバイルセンサノードとスマートスペースの計算時間測定

示したように、モバイルノードとスマートスペースの検知範囲を把握し、それぞれの役割分担を行うことにより、どちらか一種類のセンサノードを使用したセンサシステムに比較して、格段にセンシング範囲の拡大が実現された。

また、協調分担計算問題においては、実際に Gumstix と Thinkpad という実機を用いて測定実験を行うことにより、協調分担計算が理論的のみならず実際の運用上においても効果的であることがわかった。センサデータの受信についてはモバイル・スタティックどちらのノードで実現しても性能は変わらないものの、データ処理においては特に多量のセンサデータを処理する場合においては顕著な差が見られた。また、データの保存先については、Thinkpad のハードディスクが 60GB あるのに対して、Gumstix のほうは 1GB しかないので、順次データを Thinkpad に送信し、Thinkpad 側でデータを保存をした方が、センサシステムの長期的な運用が可能になる。

5. 関連研究

センサネットワークシステムの検知範囲に関する関連研究を紹介する。参考文献⁵⁾では、センサを 2次元空間上を自由に移動可能なロボットに装着することにより、検知範囲の拡大を計っている。参考文献³⁾では、センサを自動車に搭載して、遠隔地から複数センサのデータを閲覧できるシステムを構築している。参考文献⁴⁾では、センサを人間に寄生させる手法でセンサを動かしている。また、2次元空間上を自由に移動可能なこれらの研究とは正反対に、参考文献¹⁾や²⁾ではユビキタスコンピューティング実験環境に移動不能なセンサを配置して環境監視を行っている。上記の研究がモバイルノードもしくはスタティックノードのどちらかだけを利用していただけに対して、本研究ではモバイルノードとスタティックノードの両方を活用することによって、センシング範囲の拡大と計算時間の短縮を実現しているところに優位性がある。

検知範囲の評価方法についても各種研究がなされている。参考文献⁹⁾¹⁰⁾では、ワイヤレスアドホックセンサネットワークシステムにおける露出量 (Exposure) という概念を提唱した。本文献では、動く対象オブジェクトに対して、システムがそのオブジェクトを最も検知できない状況を最低露出量パスと定義し、その算出方法やシミュレーションを提示している。これらの研究ではセンサ自身の移動は考慮に入れていないのと、またモバイルセンサノードとスタティックセンサノードの協調分担センシングについても考慮されていないため、本研究はその両者を統合的に利用した検知範囲の研究としても優位性がある。

6. 今後の課題

今後の課題として、消費電力の検討とモデリングのビジュアライゼーションについて説明する。

6.1 消費電力の検討

本論文では、モバイルセンサノードとスタティックセンサノードの性能比較対象として、検知性能と計算性能を取り扱った。しかし、特にワイヤレスセンサノードなどのバッテリー駆動型システムを用いる場合については、処理が必要とする電力に関する考慮も重要になってくる。例えば、バッテリー容量に制限のあるモバイルセンサノードではなるべく電力消費を増やさないために、電力を必要とする処理についてはスタティックセンサノードで実行するというモデルが考えられる。これらの消費電力の検討は今後の課題とする。

6.2 モデリングのビジュアライゼーション

モバイルセンサノードとスタティックセンサノードの双方の検知モデルについて、本研究ではセンサシステムの実装の際にパラメータとして指定することにより、ソフトウェア内部でその検知モデルを計算する仕組みになっている。しかし、この仕組みではセンサシステム管理者が、どのセンサが現在どの領域をセンシングしているかを把握するのが困難である。従って、検知モデルの可視化を実現し、システム管理者にとって検知領域のわかりやすい協調分担処理機構を構築することを今後の課題とする。

7. まとめ

家庭内にホームユビキタスセンサネットワーク環境を構築するにあたり、センサのハードウェアの選定やその配置方法の決定はそのセンサノードの性能、ノードの組み合わせ、設置・運用コスト等を考慮に入れて決定する。センサの配置においては大きく分けて、センサを天井や壁等に静的に配置するスタティックな場

合と、空間内を移動可能なロボットに配置してダイナミックに運用する場合の2種類が存在するが、本論文ではそのどちらにすべきか判断するためにモバイルセンサノードとスマートスペースによる協調分担処理機構の評価を行った。協調分担処理機構においては、協調分担検知モデルと協調分担計算モデルの2種類のモデルを構築した。協調分担検知モデルではモバイル・スタティックの双方において検知可能な範囲をモデル化して、双方による干渉領域の検討を行った。また協調分担計算モデルにおいては、双方のノードにおける計算性能を測定し、処理によってはスタティックセンサノードでの実行に有用性があることを示した。本論文ではセンサノードの検知モデルと計算モデルという2軸によってモバイルセンサノードとスマートスペースの協調分担処理機構の提案を行ったが、今後の課題として双方の消費電力に関する検討やモデリングのビジュアライゼーションの構築等がある。これらの研究により、屋内ユビキタスコンピューティング環境でのより性能の高いセンサシステムの構築が可能となる。

参 考 文 献

- 1) J.M. Kahn, R.H. Katz, and K.S.J. Pister, "Next century challenges: Mobile networking for "smart dust"", in *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM)*, 1999.
- 2) S. Intille, K. Larson, E. Tapia, J. Beaudin, P.Kaushik, J.Nawyn, and R.Rockinson, "Using a Live-In Laboratory for Ubiquitous Computing Research", in *Proceedings of 4th International Conference of Pervasive Computing*, May 2006.
- 3) B.Hull, V.Bychkovsky, K.Chen, M.Goraczko, A. Miu, E. Shih, Y. Zhang, H. Balakrishnan, and S. Madden, "Cartel: A distributed mobile sensor computing system", in *The Forth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, 2006.
- 4) M.Laibowitz and J.Paradiso, "Parasitic Mobility for Pervasive Sensor Networks", in *Proceedings of 3rd International Conference of Pervasive Computing*, May 2005.
- 5) A. LaMarca, W. Brunette, D. Koizumi, M. Lease, S. Sigurdsson, K. Sikorski, D. Fox, and G. Borriello, "Making Sensor Network Practical with Robotics", in *Proceedings of 1st International Conference of Pervasive Computing*, Aug. 2002.
- 6) M. Beigl, C. Decker, A. Krohn, T. Riedel, and T. Zimmer, "uParts: Low Cost Sensor Networks

at Scale", in *Demonstration Proceedings of 7th International Conference of Ubiquitous Computing*, Sept. 2005.

- 7) iRobot Corporation, "iRobot Create", 2006, <http://www.irobot.com/create/explore/>.
- 8) Gumstix Inc., "Gumstix Netstix Computer", 2007, <http://gumstix.com/>.
- 9) S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G. Qu, and M. Potkonjak, "Exposure in wireless ad-hoc sensor networks", in *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM)*, 2001.
- 10) G. Veltri, Q. Huang, G. Qu, and M. Potkonjak, "Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks", in *The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, 2003.