

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：14603
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22300024
 研究課題名（和文） 3D屋内空間へのセンサ最適設置を支援するセンサネットワークシミュレータ
 研究課題名（英文） Sensor Network Simulator for Supporting Optimal Sensor Deployment in 3D Indoor Spaces
 研究代表者
 安本 慶一（KEIICHI YASUMOTO）
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
 研究者番号：40273396

研究成果の概要（和文）：

本研究では、屋内環境において障害物（静止物、移動物の両方）が存在する対象監視空間をセンサの検知範囲でカバーするためのコスト最適なセンサ設置位置を決定する方法の考案と、対象屋内空間の形状、センサの検知範囲・形状、センサ設置可能エリアおよび設置コストを自由に設定し、3D 仮想空間上に最適センサ設置位置およびカバー範囲を可視化するツールの開発を行った。また、本ツールで算出した実空間上のセンサ位置に実際にセンサを設置しカバレッジを計測することにより、提案手法の有効性を確かめた。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we devised a cost-efficient method for determining semi-optimal sensor deployment positions which cover the specified monitoring area by sensing ranges of deployed sensors in indoor spaces with stationary and moving obstacles. Based on the method, we developed a tool which visually shows the calculated positions of deployed sensors with their sensing ranges on the 3D virtual space. On the real testbed, we actually deployed sensors in the positions calculated by the tool and confirmed that the deployed sensors achieves the specified degree of coverage.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	11,600,000	3,480,000	15,080,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：計算基盤・情報ネットワーク

キーワード：ユビキタスコンピューティング、センサネットワークシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

センサ技術、デバイス技術、およびネットワーク技術の発展に伴い、様々なセンサやデバイスが組み込まれた環境（スマート環境）の構築に関する研究が盛んに行われている。スマート環境においてキーとなるのはセン

サネットワークであるが、敷設コストや設置位置の制約から、配線を必要としない小型無線センサノード群による無線センサネットワーク（WSN）がスマート環境に適していると考えられる。WSN を用いて対象空間内の環境の変化を必要かつ十分な精度で認識す

るためには、以下を考慮した上で、センサノード群を空間内の適切な位置に設置する必要がある：(1) 設置したセンサ群（センシング範囲は一般に一定半径の球で近似される）が監視対象領域を被覆している、(2) センサ群の設置位置は設置が容易な場所（壁、天井、床など）である、(3) 各センサノードはシンク（サーバ）にセンシングした情報を送信できる、すなわち、どの2ノードもマルチホップ無線通信により交信可能である。すなわち、上記(1)-(3)を満たす最小個数のセンサノードの設置位置を決める問題（以降、3D-WSN被覆問題と呼ぶ）を解く必要がある。

当時、対象領域のセンサによる被覆問題が多数研究されていたが、2Dの領域を対象としているものが大多数であった。2009頃になって、3D-WSN被覆問題を対象とした研究が幾つか行われ始め、障害物の無い3D空間を全被覆し、かつ、最低 k 個の異なる通信パスの存在を保証するセンサ設置問題を定義し、最適解を求める多項式時間アルゴリズム(Infocom09, Mobihoc09)や、指向性を持つ映像センサで構成されるセンサネットワークによる3D空間の被覆問題を解く、SA法に基づくアルゴリズムが提案された(Infocom09)。しかし、これら既存研究は、現実の3D空間で問題となる壁・床・天井や障害物（家具やデバイス、人体など）による各センサのセンシング範囲の変化や、センサノード間の無線接続性の影響を考慮していなかった。一方、屋内における無線電波伝搬特性を解析するツールが幾つか開発・販売されていたが、これらはレイトレーシングを用いているため計算に時間がかかり、ノードや障害物の位置が移動する環境や家具やデバイス・人体の影響を受けやすいWSN向けの近距離無線通信を対象としていなかった。

2. 研究の目的

ビルや家屋などの建物内にスマート環境を構築するためには、空間内の環境情報のセンシング・収集のため、無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) の敷設が必須である。しかし、建物内は複雑な構造を持つ3D空間であり、監視が必要な領域を十分な精度でセンシングするWSNを敷設することは、障害物による無線通信範囲・センシング範囲への影響、センサ設置位置・コストの制約を考慮すると、非常に難しい問題である。本研究では、要求性能を満たす屋内WSNを効率良く設計するため、障害物のある3D空間への最適なセンサノード設置位置決定推定機能を持つ屋内WSNシミュレータを開発することを目的とする研究開発を行った。

3. 研究の方法

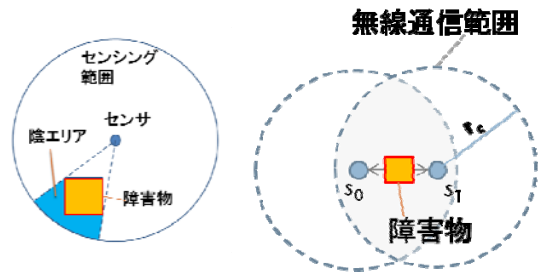


図 1：障害物の影響のモデル化

上記目的を達成するため、平成22～24年度の3年間に渡り研究開発を行った。

平成22年度には、(22a)障害物を考慮したセンサ間無線通信機能の検討、(22b)障害物を考慮した有効センシング範囲の計算機能の検討、(22c)予備実験のためのテストベッドの構築を行った。

(22a)に関して、Line-of-sightに基づく電波伝搬と、既存電波伝搬シミュレータとスマートスペースシミュレータ UbiREAL を連携させる方法について検討を行った。(22b)(22c)に関して、障害物の影響を考慮した各センサのセンシング範囲の計算方法について検討を行った。センシングする空間物理量として、照度、電波（受信信号強度：RSSI）を対象とし、各センサのセンシング範囲を一定半径の球または円錐でモデル化を行うとともに、障害物によるセンシングへの影響をモデル化した(図1)。さらに、障害物のある対象空間をできるだけ少ないコストでカバーするセンサ配置を計算する方法について検討を始めた。また、Arduinoにセンサを搭載したセンサノードからなるテストベッドを構築し、球および円錐によるセンシング範囲モデルと実際のセンシング範囲との誤差について調査した。

平成23年度は、(23a)3D-WSN被覆問題の定義とアルゴリズム（準最適なセンサ設置位置決定機能）の設計、(23b)アルゴリズムおよび専用GUIの実装を行った。

(23a)に関して、全年度に開発したセンシング範囲のモデルに基づき、障害物のある

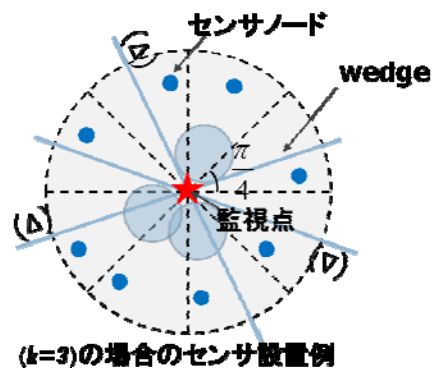


図 2：移動障害物に対する k 重被覆

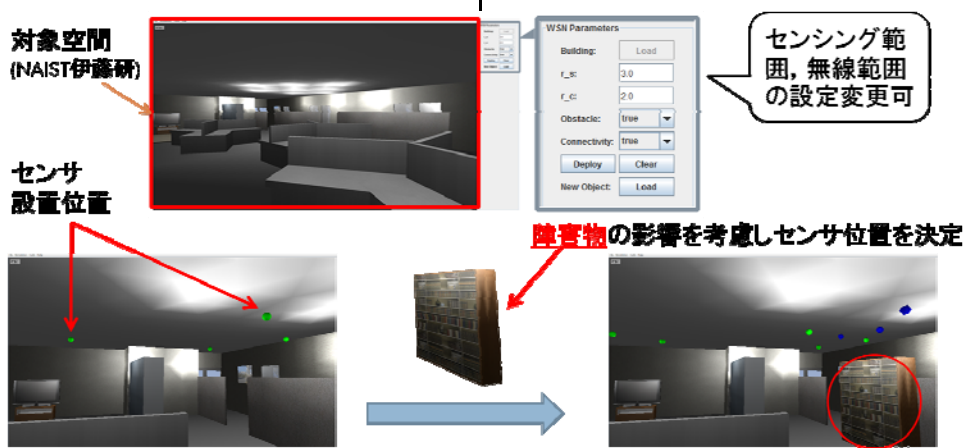


図 4：障害物の影響を考慮した屋内向け WSN シミュレータ

3D-WSN 被覆問題 (監視対象領域を、設置するセンサ群のセンシング範囲で被覆し、かつ、任意の 2 センサノード間で無線通信が可能であるセンサノード群の設置位置決定問題) を定義した。定義した問題は典型的な組合せ最適化問題であり、NP 困難問題であるため、実用的な時間で準最適解を算出可能なヒューリスティックアルゴリズムを考案した。本アルゴリズムは、各センサ設置位置候補について、単位コストあたりの監視領域被覆率への貢献度合いを算出し、この度合いの大きな順にセンサ設置位置を確定していく。

さらに、静止物以外に、人などの移動する障害物の影響も考慮した 3D-WSN 被覆問題を定義し、アルゴリズムを考案した。本アルゴリズムの考案にあたり、監視対象領域の各監視点に対し、移動障害物がどの位置にいても、 k 重被覆 (k 個以上のセンサのセンシング範囲でカバー) されていることを保証するための十分条件:「監視点を中心とする半径 r (センシング半径) の球を $2(k+1)$ 個の領域に等分割したみかんの房状の各部分領域内に一つ以上のセンサを設置する」を考案した (図 2)。

(23b) に関して、考案したアルゴリズムを実装し既存のシミュレータである UbiREAL に組み込んだ。UbiREAL により構築した 3D 仮想空間に監視対象領域 (センサにより被覆されるべき領域) およびセンサを設置可能な場所の範囲を直観的かつ容易に設定できるようにするため、専用 GUI を設計・実装した。また、本アルゴリズムの計算結果をもとに、UbiREAL 上でアプリケーションを実行できるようにするため、算出したセンサノードの位置に基づいて、センサノード群を仮想空間に自動的に設置する機能を設計・実装した (図 3)。

平成 24 年度は、前年度に開発した屋内 WSN シミュレータを使って、実在の空間・障害物を設定し、計算時間やセンサ設置位置の有効性に関する評価を行った。そのため、(24a) 無線センサネットワークのテストベッドの

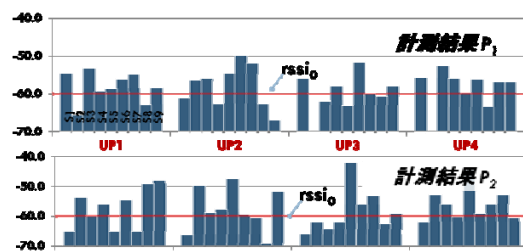


図 3：移動障害物に対する k 重被覆の計測結果 ($k=3$)

構築、(24b) 無線センサネットワークのアプリケーションの開発を行った。

(24a) に関して、屋内 WSN シミュレータを用いて、対象空間 (研究室内の部屋を使用) に設定した監視対象領域を被覆するセンサノード群の位置を決定し、実際に無線センサノードを複数設置することで、テストベッドを構築した。(24b) に関して、テストベッド上に、ZigBee に基づく位置推定システムを開発した。

4. 研究成果

開発したシミュレータが算出したセンサ設置位置に、実際にセンサを設置することで、実際に監視領域がどれだけ正確にセンシング範囲で被覆されるかを評価した。実験は、奈良先端科学技術大学院大学の A608 室にて行った。位置推定を目的に、ユーザが所持する ZigBee 発信機 (任意の位置に移動) と天井に設置された ZigBee 受信機群のうち 3 つ以上との間に LoS (line-of-sight) が確保されるようセンサ設置位置を算出し、実際にセンサを取り付けた。実験の結果、対象監視領域中の 2 つの監視点 P1, P2 に対して、人などの位置でどの方向を向いて立っていても、3 つ以上の受信機において、LoS が確保されていることを示す -60dB 以上の受信強度が観測され、3 重被覆できていることが確かめられた (図 4)。

以上の研究成果のうち、静止障害物を扱っ

たものおよびセンサネットワークシミュレータに関するものは、情報処理学会 DICO2010 シンポジウムで発表し、優秀論文賞を受賞した。また、国際会議 UbiComp2010 でデモ発表を行った。移動障害物を扱うよう拡張したものは、第 57 回 MBL 研究会で発表し、優秀発表賞を受賞した。さらに、国際会議 IEEE WoWMoM 2012 で発表を行った。

その他、関連する研究成果を、情報処理学会論文誌や、IEEE SECON2011, IEEE PerCom 2013 (WiP セッション), PerCom Workshop 2011 などの国際会議、情報処理学会 DICO シンポジウムや DPS ワークショップ、その他研究会で発表を行った。

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 4 件)

[1] 高松 悠, 孫 為華, 安本慶一, 山内由紀子, 伊藤 実: すれ違い通信を活用した複数携帯電話端末による省電力協調動画ダウンロード手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 783-794, 2012. 査読有
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008767185>)

[2] 布川雄大, 孫 為華, 安本慶一, 伊藤 実: MANET によるワンセグ難視聴端末救済手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 829-838, 2011. 査読有
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008507922>)

[3] 清川皓太, 山本真也, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤 実: 3D 仮想空間を用いた家電のためのリモコンフレームワーク, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 596-609, 2011. 査読有
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008507899>)

[4] Ahmed, A., Yasumoto, K., Yamauchi, Y., Ito, M.: Probabilistic Coverage Methods in People-Centric Sensing, Journal of Information Processing, Vol. 52, No. 10, pp. 2902-2919, 2011. 査読有
(DOI: 10.2197/ipsjip.19.473)

[学会発表] (計 14 件)

[1] Kashimoto, Y.: Saving Energy in Smart Homes with Minimal Comfort Level Reduction, IEEE PerCom 2013 (WiP session), 2013 年 3 月 19 日, San Diego, USA

[2] 大木浩武: 快適さと省エネのトレードオフの発見を支援する家電制御ユーザインタフェース, 第 20 回 DPS ワークショップ, 2012 年 10 月 18 日, 愛媛県松山市

[3] 江藤 大: 作物の生育による日陰領域の変化を考慮したソーラーパネル付センサーの移動スケジューリング法, 第 20 回 DPS ワークショップ, 2012 年 10 月 17 日,

愛媛県松山市

[4] 柏本幸俊: スマートなエネルギーの利用に向けた生活の知恵センシングシステム, 第 20 回 DPS ワークショップ, 2012 年 10 月 17 日, 愛媛県松山市

[5] 吉田昌剛: スマート環境シミュレータへの協調作業支援機能の拡張, DICO2012 シンポジウム, 2012 年 7 月 6 日, 石川県加賀市

[6] Yasumoto, K.: Cost-Efficient Sensor Deployment in Indoor Space with Obstacles, IEEE WoWMoM2012, 2012 年 6 月 26 日, San Francisco, USA

[7] 大野淳司: SNS を利用した情報家電の遠隔制御・監視システムの提案, 第 151 回 DPS 研究会, 2012 年 5 月 21 日, 沖縄県那覇市

[8] 坂本一樹: 照明点灯パターンの切り替えによる高精度な屋内位置推定法とその評価, 第 33 回 UBI 研究会, 2012 年 3 月 13 日, 東京都小金井市

[9] 藤本恭平: オブジェクトの監視・追跡を行う無線マルチメディアセンサネットワークの稼働時間延長および QoS 確保のためのルーティング手法, DICO2011 シンポジウム, 2011 年 7 月 7 日, 京都府宮津市

[10] Yasumoto, K.: Distance and Time Based Node Selection for Probabilistic Coverage in People-Centric Sensing, IEEE SECON 2011, 2011 年 6 月 28 日, Salt Lake City, USA

[11] Yamamoto, S.: Maximizing Users Comfort Levels through User Preference Estimation in Public Smartspaces, 7th IEEE Int'l. Workshop on Pervasive Learning, Life, and Leisure (PerEL 2011), 2011 年 3 月 25 日, Seattle, USA

[12] Kouakou, M.T.: Cost-Efficient Sensor Placement for Full Coverage of 3D Indoor Space with Moving Obstacles, 第 57 回 MBL 研究会, 2011 年 3 月 7 日, 千葉県船橋市

[13] Kouakou, M.T.: Deployment planning tool for indoor 3D-WSNs, UbiComp 2010 (Demo), 2010 年 9 月 27 日, Copenhagen, Denmark

[14] Kouakou, M.T.: Cost-Efficient Deployment for Full-Coverage and Connectivity in Indoor 3D WSNs, DICO2010 シンポジウム, 2010 年 7 月 9 日, 岐阜県下呂市

[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

http://ubi-lab.naist.jp/?page_id=198

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安本 慶一 (YASUMOTO KEIICHI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40273396

(2) 研究分担者

伊藤 実 (ITO MINORU)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90127184

(3) 連携研究者

柴田 直樹 (SHIBATA NAOKI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40335477

玉井 森彦 (TAMAI MORIHIKO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90523077

孫 為華 (SUN WEIHUA)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：40517520

山本 眞也 (YAMAMOTO SHINYA)

山口東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：10552375