

推薦論文

現実的な都市環境モデリングに基づく 行動センシングシステムシミュレータの設計開発

金谷 拓実^{1,a)} 廣森 聡仁^{1,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)}

受付日 2013年2月12日, 採録日 2013年9月13日

概要: 人の位置情報は、様々なサービスへの応用が期待されており、屋内外に配置されたセンサを利用して、人の移動情報を計測する行動センシングシステムが注目を集めている。行動センシングにおいては、センサの種類や配置、対象環境が行動センシング精度に大きな影響を与えるため、利用目的に応じて適切な設計を施すことが重要である。本論文では、都市環境と歩行者モビリティ、および与えられたセンサ配置に対する各センサの振舞いを包括的に再現することによって、多数のセンサから構成される行動センシングシステムの設計開発と性能評価を支援するシミュレーション環境を構築した。また、行動センシングシステムの応用事例として、地下街における歩行者流分析システムとオフィスビルにおける空調・照明の省エネ制御システムを対象とし、シミュレーション実験を行った。その結果、提案するシミュレーション環境で、センサの配置や特性、人の行動パターンについて、様々な組合せを再現し、かつ、組合せごとのシステム性能を評価することで、人の位置情報を利用するアプリケーションの開発を効率的に行えることを示した。

キーワード: 行動モデリング, センサモデリング, GIS, システム評価, シミュレーション

Design and Development of Sensing System Simulator with Realistic City Modeling

TAKUMI KANAYA^{1,a)} AKIHITO HIROMORI^{1,b)} HIROZUMI YAMAGUCHI^{1,c)} TERUO HIGASHINO^{1,d)}

Received: February 12, 2013, Accepted: September 13, 2013

Abstract: Location sensing systems have become popular because location information of people can be utilized for various services. When we deploy such services, we should carefully consider how to design those systems. Especially, sensor types, sensor placement and environment have a large impact on performance of location sensing systems. In this paper, we design and develop a sensing system simulator. It represents realistic environment, movement of pedestrians and behavior of sensors that provide the location information. Finally, we have validated the capability of the proposed simulator by two scenarios. One is a pedestrian flow analysis with different settings of sensors in underground. Another is a task-ambient control system that precisely controls air and light based on the location information. As a result, we have shown that the proposed simulator enables us to develop and operate location based systems efficiently.

Keywords: mobility modeling, sensor modeling, GIS, system evaluation, simulation

1. はじめに

近年、人の位置や移動を検出して利用する行動センシ

本論文の内容は 2012 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム 2012 にて報告され、モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) t-kanaya@ist.osaka-u.ac.jp

b) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

グシステムが注目されるようになってきている。行動センシングシステムでは、広域に配置された多数のセンサをネットワークで接続し、人の位置情報をリアルタイムに収集する。このようにして取得した人の位置情報は、状況の分析や機器の制御に利用して社会の効率化に役立てることが可能であり、たとえば、電気機器の省エネ制御システムやナビゲーションシステムなど、様々な用途への応用が考えられる。

しかし、一般的にそのような複数のセンサを含む行動センシングシステムの設計は非常に複雑である。人の位置情報を計測可能なセンサとしてはカメラやレーザレンジスキャナ (LRS)、赤外線センサなど行動把握精度や範囲が異なる様々な種類が存在する上、その配置や周辺環境に関しても無数の組合せが考えられるため、利用目的に応じて効率的な行動センシングシステムを設計することは簡単ではない。たとえば、センサとしてカメラを使用すれば歩行者の正確な位置を知ることが可能だが、少数のカメラで広域を監視することは難しい。これに対して、Wi-Fi による位置推定であれば少ない数のアクセスポイントで広域の歩行者の位置情報を比較的容易に集められるが、カメラほど正確に位置を特定することはできない。また、同じセンサを利用する場合であっても、センサの位置によって計測できる情報はまったく異なるため、システムの用途や地理環境を考慮し、なるべく少ないセンサで必要な情報を得られるように配置を工夫することは重要である。さらに、歩行者の数や行動パターンによっては、集中的に多数のセンサを設置しなければならない通路や、それとは反対にセンサがほとんど必要のない通路などの違いが生じる場合もある。このような特性を理解するためには現地での実験を行うことが効果的であるが、街の中に多数のセンサを配置して実験を繰り返すためには膨大な費用と時間が必要になる。

本研究では、行動センシングシステムの開発支援を目指して、Human Mobility Sensing Simulator (HumanS) の設計開発を行っている。HumanS はマルチエージェント・シミュレータであり、都市環境と歩行者モビリティ、センサの振舞いのすべてを包括的に再現し、シミュレーションを実行する点が最大の特徴である。これにより、センサの基本性能や配置だけでなく、周辺環境の影響も含めて実環境に近い条件で行動センシングシステムの特性を評価し、効率的な開発や運用に貢献できる。システムの特性を正確に理解するためには、シミュレーション対象となる (i) 都市環境、(ii) 歩行者行動、および (iii) センサのそれぞれについて必要十分な忠実度でモデル化を進める必要がある。(i) の都市環境に関しては、地理情報システム (GIS) との連携によって、デジタル地図データから屋内外の地理情報を読み込んでシミュレーションに利用することを可能にしている。また、(ii) の歩行者行動については、この地図データを分析することで潜在的な経路を自動的に導出し、狭い通路



図 1 HumanS シミュレータのスクリーンショット

Fig. 1 Screenshot of HumanS simulator.

や任意形状の空間など複雑な構造のマップであっても壁からの距離を保ちながら、効率的に行動する現実的な歩行者エージェントを実現している。具体的には、OD 行列で指定された流量に基づく歩行者流の生成や、各空間ごとに指定された人口密度の時間変化を満たす歩行者モビリティの生成方法を提案している。(iii) については、誤差や計測範囲に関する異なる基本性能を持ったセンサを、センシング範囲・シャドウイング・位置尤度の 3 つのパラメータを用いた統一的なモデルを用いて再現する方法を提案することで、様々なセンサを地図上に配置して行動センシングの性能を評価可能な環境を構築している。シミュレーション結果はリアルタイムに可視化されて確認できるほか (図 1)、センシングデータをはじめとするすべてのシミュレーション結果がデータベースに格納されるため、SQL を利用して効率的に分析を進めることができる。

また、提案するシミュレータの有効性を評価するため、人の位置情報を利用する 2 つの評価事例を示す。1 つは歩行流分析システムを対象とし、システムで利用するセンサの種類や配置を様々な変更しながらシステム性能の評価実験を行い、それらの設定が歩行流の推定精度に与える影響を評価している。その結果、HumanS の利用によって、センサがシステム全体に与える影響を評価するだけでなく、少ない数のセンサで高い性能を実現する配置を導出するための知見を得るなど、設計支援環境としての有効性を確認できた。また、もう 1 つの評価事例では、オフィスビルにおける空調および照明の省エネ制御システムを対象としており、空調および照明機器の消費電力モデルを提案シミュレータ内に導入することにより、センシングデータの分析だけでなく、分析結果に基づいたアプリケーションシステムの効果についても評価できることを示した。

2. 関連研究

2.1 WSN シミュレーション

実世界の事象を計測する手段の1つとして Wireless Sensor Network (WSN) が注目されている。実環境に WSN を導入して実験を行うためには多数のセンサノードを用意して配置するなど、膨大な時間と費用を必要とするため、現在までに様々なシミュレーション環境が開発されている。たとえば、NetTopo [1], ATEMU [2] などが代表的な WSN シミュレータとして知られている。しかし、これらのシミュレータは計測されたデータの収集に着目し、オペレーティングシステムやメモリ、バッテリー、無線伝送、プロトコルなど、センサノードのアーキテクチャを評価することを目的としており、計測によって生成されるデータの内容を再現することは行わないため、センシングの振舞いを評価することはできない。

これに対して、文献 [3] のようにセンサの振舞いをモデリングし、計測の精度や誤差などの性能を評価するシミュレーションを行った事例が報告されている。しかし、これらの研究ではセンサの静的な特性に関しては詳細にモデリングされているが、センシングの対象となる地理や人に関しては動的に変化する現実的なモデルを想定しておらず、周辺環境がシステム全体に与える影響を十分に調査することはできない。

2.2 都市環境シミュレーション

本研究と同じように、都市における地理環境や歩行者モビリティのモデリングやシミュレーションを行った事例に関して、代表的なものをいくつか紹介する。都市環境シミュレータとしては UrbanSim [4] が広く知られている。UrbanSim は、歩行者や自動車が動き回る街全体を再現可能なシミュレータである。文献 [5] においては、Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) に適用するためのマクロ・モビリティモデルを提案している。このモデルでは、シミュレーション領域を住宅地やビジネス街など、その特徴に応じていくつかの領域に分割し、領域単位で目標の密度を実現することができる。また、Land Use Evolution and Impact Assessment Model (LEAM) [6] のように土地利用計画のために提案されたモデルも存在する。都市環境シミュレータの多くはマルチエージェント・シミュレータであり、都市計画や輸送計画に利用するために大規模なシナリオで動作することを目指している。このような目的の違いから、歩行者の細かな行動まで含めて再現しないため、センシングの振舞いをシミュレーションするためには不十分である。これに対して、センシングまで考慮した都市環境シミュレーションのフレームワーク [7] が近年になって開発されている。しかし、このフレームワークは限定された目的に対してのみ適用できるものであって、様々な都市

環境やセンサに適應して評価を行うことはできない。

また、デジタル地図データを読み込んで地理情報の表示や分析を支援するシステムとして GIS がよく知られているが、現実世界の地理情報を取り込むことができるという特性を活かして、GIS をシミュレーション環境の構築に活用した事例がある。たとえば、文献 [8] では、GIS で取り込んだ建物や道路の位置情報から災害時の各所の被害の大きさを予想し、事前に避難計画を立案するためのシミュレーション環境を構築している。本論文においても現実的な地理環境を再現するための手段として GIS と連携したシミュレーション環境の構築を行うが、読み込んだデジタル地図データを分析し、歩行者エージェントのモビリティやセンサエージェントによるセンシングの振舞いにまで地理環境の影響を反映させている点が異なる。

3. HumanS の設計

我々の提案する HumanS シミュレータでは、都市環境の屋内外において人の位置情報を計測可能なセンサが多数設置されているような状況を想定し、これらの状況を実現するパラメータとして、(i) デジタル地図データ、(ii) 歩行者エージェントの行動パターン、(iii) 歩行者検出センサの基本性能、数、配置の3つを考える。

シミュレーション領域を生成するために必要なデジタル地図データに関しては、現時点で広く普及しており、多くの GIS 環境において読み込むことができる ESRI シェープファイル [9] を使用する。

歩行者エージェントの行動パターンを決定するための統計データとして、OD 行列 (Origin-Destination Matrix) あるいは人口密度の時間推移データを入力として与えることができる。OD 行列とは地図上の出発点と到着点を表すある2点間の交通量を表すデータであり、HumanS では OD 行列で指定した流量を満たす歩行者流をシミュレーション中で再現することができる。また、行動パターンを生成する別の手段として、シミュレーション領域をオフィスや会議室など特徴に応じた複数の領域に分割し、各領域の人口密度の時間推移を入力することによって、その人口密度を再現するような歩行者モビリティを自動生成することもできる。このように、行動パターンを決定する統計データについて複数の形式に対応することによって、様々な状況において実データに基づいた現実的な歩行者エージェントを生成できるように工夫している。

歩行者エージェントの行動情報を計測するセンサについては、センサの基本性能と数、配置の3つを入力として与える。センサの基本性能とは計測範囲や誤差を表すものであり、配置は各センサの地図上における位置や向きを指定するものである。シミュレータの利用者はセンシング範囲・シャドウイング・位置尤度の3つのパラメータからなる統一的なモデルを用いて様々な歩行者検出センサの基本

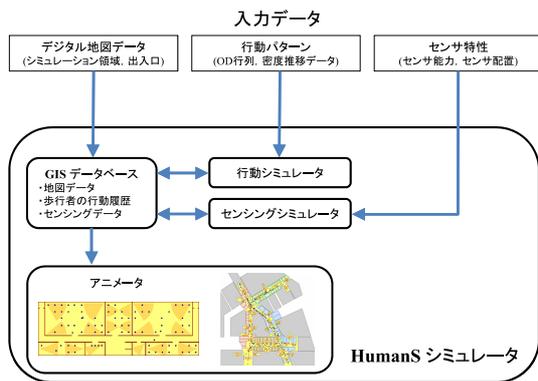


図 2 HumanS シミュレータのアーキテクチャ
 Fig. 2 Architecture of HumanS simulator.

性能を再現し、自由に配置することによって、行動センシングの振舞いを評価することができる。

図 2 に HumanS シミュレータのアーキテクチャを示す。HumanS シミュレータは、GIS データベース、行動シミュレータ、センシングシミュレータとアニメータの 4 つの要素から構成される。ここで、GIS データベースとは、位置や領域などの地理情報を扱いやすいようにリレーショナルデータベースに拡張を加えたものであり、デジタル地図データをデータベース上に読み込む機能に加えて、歩行者の位置情報やセンサの計測範囲に対する幾何学計算を簡単に実行することができる。提案シミュレータにおいては、オープンソースのリレーショナルデータベース管理システムとして開発された PostgreSQL [10] の拡張である PostGIS [11] を GIS データベースとして利用している。この GIS データベースには、デジタル地図データから読み込んだシミュレーション領域のほか、行動シミュレータによって随時更新される歩行者の行動履歴、センシングシミュレータによって生成されるセンシングデータなどすべてのシミュレーション結果が格納されるため、システム開発者は SQL を利用して効率的に分析可能である。また、GIS、HumanS シミュレータの可視化ツール (アニメータ) によってリアルタイムに可視化することが可能であり、センサのカバレッジや歩行者の交通状況に関する直感的な理解を支援する。

3.1 地理環境のモデル化

HumanS シミュレータにおいては、直線の道路や矩形の部屋だけではなく任意形状の 2 次元地理環境を想定することによって、地下街やオフィスビルなどの現実的な都市空間を再現する。その上で、障害物を避けつつ効率的な移動経路を選択する歩行者モビリティの生成を目指す。これを実現するために、歩行者が通行可能な通路や広場などの形状を閉多角形として定義している。

ここで、図 3(a) に示すように、シミュレーション領域は歩行者エージェントが通行可能な閉多角形領域である

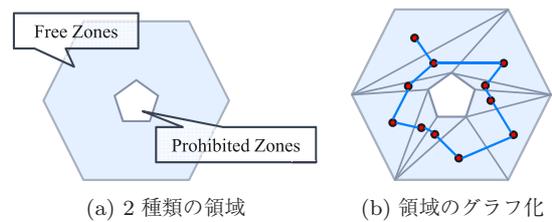


図 3 地理環境のモデル化
 Fig. 3 Geographic environment model.

Free Zone と、歩行者エージェントが通行不能な領域である Prohibited Zone の 2 つから構成される。すなわち、歩行者エージェントは Prohibited Zone に侵入することなく Free Zone の上だけを移動する。任意形状のマップに対して、そのような経路を自動的に導出するため、まず、Free Zone の三角形分割を行う。この三角形分割には、文献 [12] で提案されているアルゴリズムを使用しており、凹多角形や穴の開いた多角形なども含めて任意形状に対して、三角形分割を実行できる。三角形分割に要する処理負荷は、入力されたシミュレーション領域の複雑度に依存し、 n 頂点からなるシミュレーション領域に対する計算量は、 $O(n \log n)$ となる。提案シミュレータにおいては、シミュレーションの実行中にシミュレーション領域自体が変化することは想定しておらず、シミュレーション開始時に 1 度だけ三角形分割が実行される。

生成されるすべての三角形領域は凸多角形になっており、また、凸多角形上の任意の 2 点を結ぶ直線はその凸多角形の内部にあることが保障されるため、ある三角形領域の内部にいる歩行者エージェントは、その三角形領域の内部であればどの点を目的地として選択したとしても、直線的に移動する間にその三角形領域の外に出ることはない。すなわち、Prohibited Zone に侵入することなく移動できる。さらに、生成された三角形領域の隣接関係を利用して図 3(b) のようなグラフを構成することができる。このグラフは、すべての三角形領域の内部に頂点を置いて、境界線を共有する三角形領域の頂点を辺で結んだものである。境界線上も三角形領域に含まれると考えると、1 つの境界線が 2 つの三角形領域に同時に含まれる場合にグラフの辺が存在することになる。この場合、ある三角形領域の内部にいる歩行者エージェントは、その三角形領域の境界線まで直線的に移動すれば、Prohibited Zone に侵入することなく隣接する別の三角形領域に移動できることになる。すなわち、ある時点で歩行者エージェントが存在する三角形領域の頂点を始点として、目的地の含まれる三角形領域の頂点を終点として経路探索アルゴリズムを適用すれば、壁や障害物を避けながら Free Zone の内部だけを通過して任意地点まで移動することができる。このとき、グラフの頂点を三角形領域の重心に置いて、隣接する三角形領域の重心間の距離をコストとして、歩行者エージェントの効率的

	X	Y
Ent1	10	0
Ent2	30	5
Ent3	15	30

(a) 出入口の座標指定

From/To	Ent1	Ent2	Ent3
Ent1	0	10	15
Ent2	15	0	5
Ent3	20	10	0

(b) 歩行者流を指定する OD 行列

図 4 OD 行列による歩行者行動の設定例

Fig. 4 An example of pedestrian behavior specification.

な移動経路の導出に利用している。

3.2 行動シミュレーション

シミュレーション中の歩行者エージェントの行動パターンを指定する方法の1つとして、OD 行列に基づく歩行者流の生成を考える。このときの入力としては、図 4 に示すように、歩行者エージェントが生成あるいは消滅する基準点となる出入口の座標と、各出入口間の単位時間あたりの交通量を指定する OD 行列を与える。この OD 行列に基づいて生成された歩行者エージェントに対し、Free Region の三角形分割によって導出された図 3(b) のグラフを用いて、経路探索アルゴリズムを適用することにより、出発地から目的地までの移動経路を決定することができる。対象となる地理環境をグラフ化しているため、任意の経路探索アルゴリズムを適用可能で、現状では距離をコストとするダイクストラの最短経路アルゴリズムを採用している。提案シミュレータでは、このアルゴリズムを利用し、各三角形に対し、行き先に到達するために隣接するいずれの三角形に移動すべきかを示したルーティングテーブルを作成する。歩行者エージェントはこのルーティングテーブルに従い移動し、目的地に到着した時点で消滅する。ある三角形に対するルーティングテーブルの作成するダイクストラのアルゴリズムの計算量は $O(n \log n)$ となっている。すべての三角形に対し、ルーティングテーブルが必要となることから、ルーティングテーブル作成のための計算時間は $O(n^2 \log n)$ となる。前述したように、提案シミュレータにおいては、シミュレーションの実行中にシミュレーション領域自体が変化することは想定していないため、三角形分割と同様に、シミュレーション開始時に、ルーティングテーブルを作成する。

これに対して、複雑な歩行者エージェントの行動パターンを実現する別の方法として、人口密度の時間推移データを用いるモデルを構成した。この手法では、対象となるシミュレーション領域を執務室や休憩室のような論理領域に分割し、歩行者エージェントの行動を、各論理領域を1つの状態とするような状態遷移モデルによって表現する。たとえば、図 5 は5つの状態 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 を持つ場

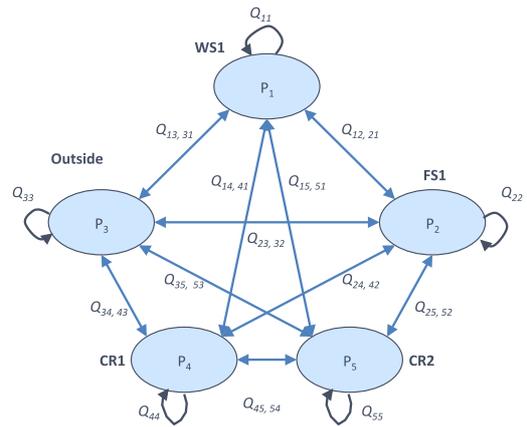


図 5 歩行者行動を表す状態遷移図

Fig. 5 Behavior state transition diagram.

合の状態遷移図を表している。ここで、ある時刻 t において、単位時間の間に歩行者エージェントが状態 P_i から P_j に遷移する確率 $Q_{ij}(t)$ を適切に定めることで、各状態に対応する領域において、目的の人口密度を実現することを考える。モビリティを生成するためのシミュレータへの入力としては、一部あるいはすべての状態 P_i に対して目標人口密度の時間推移データを与える。以下では、時刻 t における目標人口密度を $D_i(t)$ で表す。

対象とする領域の数を m とすると、シミュレーション中の時刻 t における各状態 P_i の人口密度 $d_i(t)$ が既知である場合、次の時刻の人口密度 $d_i(t+1)$ が次の式で与えられる。

$$d_i(t+1) = \sum_{j=1}^m d_j(t) Q_{ij} \quad (1)$$

さらに、次の時刻 $t+1$ において目標とする人口密度を実現するために、目標人口密度 $D_i(t+1)$ と、現在の人口密度 $d_i(t)$ および状態遷移確率 $Q_{ij}(t)$ から計算される次の時刻の人口密度 $d_i(t+1)$ の差を最小化することを考える。すなわち、以下の条件を満たすような最適化問題を解けばよい。

$$\min \sum_{i=1}^n |D_i(t+1) - d_i(t+1)| \quad \text{s.t.} \quad \forall i \sum_{j=1}^n Q_{ij} = 1 \quad (2)$$

提案シミュレータにおいては、個々の時間における遷移確率 $Q_{ij}(t)$ を導出するために、シンプレックス法を利用している。目標人口密度がシミュレーション期間全体で s 回分与えられるとすれば、この最適化問題を用いて状態遷移確率を s 回求めることになる。4.2 節に示す評価実験では、10 分間隔で 24 時間分の人口密度変化が記述されている時間推移データを使用しており、この場合には、この線形計画問題を 144 回解くことになる。図 5 で示したような領域数であれば、単一の問題は数秒程度で解くことが可能である。Intel Xeon W3565 3.20 GHz とメモリ 12 GB の PC を利用した際、シミュレーション全体のデータに対する遷移確率を約 30 分で導出することができた。

なお、歩行者エージェントの領域間の移動に関しては、OD 行列に基づく歩行者流生成の場合と同様に、図 3(b) のようなグラフに経路探索アルゴリズムを適用することで実現される。また、混雑による影響を再現するために、歩行者同士が接近したときの回避行動および速度変化に関してもモデル化を行っている。回避行動に関しては、ロボットの移動計画の分野で利用されることの多いポテンシャル場に基づく手法を利用している [13]。この手法では、歩行者と次の目的地の間に引力が、歩行者と歩行者の間に斥力が働くことと仮定し、その合力の方向に歩行者を移動させることで衝突回避を実現している。引力は目的地との間の距離に比例するが、斥力は歩行者間の距離の二乗に反比例させているため、歩行者同士が接近すると引力を上回る大きな斥力が発生して衝突が回避される。また、移動速度に関しては周辺の人口密度に比例して低下するモデルを採用している [14]。

3.3 センシングシミュレーション

本研究では、多様な歩行者検出センサを統一的なモデルで表現することで、様々な行動センシングシステムに適用できるようにシミュレータを実現している。具体的には、計測範囲や誤差に関する異なる特性を持った位置センサをモデル化するために、センシング範囲・シャドウイング・位置尤度の 3 つのパラメータを用いる。シミュレータの利用者はこの統一的なモデルを用いることによって、パラメータを変更するだけで種々の歩行者検出センサを再現し、センサの特性がシステムに与える影響を評価することができる。また、センサの種類にかかわらず、センシングデータの表現形式も共通化されて GIS データベースに登録される。GIS データベースには、歩行者位置の計測結果に加えて計測を行ったセンサ、計測位置、計測時刻が紐づけられて登録されるため、センサの配置や特性が与える影響を効率的に分析することが可能である。

歩行者の検出を目的とするセンサであっても、その機構や性能によって情報を取得できる範囲は異なる。ここでは、各センサはシミュレーション領域上の位置を表す座標のほかに、図 6(a) に示すようにあらかじめ指定された距離と検出領域角によって決まるセンシング範囲を持っており、そのセンシング範囲と重なる歩行者の位置情報のみを計測可能であるものとしてモデル化する。ただし、カメラやレーザレンジスキャナをはじめとする一部のセンサでは、たとえセンシング範囲の内部であったとしても、障害物が視界を遮るため、障害物の背後をセンシングできないことがある。障害物がセンシングを妨げる現象を、図 6(b) に示すようにシャドウイングとしてモデル化する。このシャドウイングは、センサの特性に基づき、センサから見通せる歩行者エージェントのみを検出することで実現される。たとえば、カメラのように、距離と検出領域角によって定

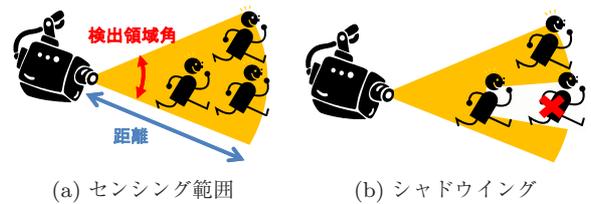


図 6 歩行者検出センサのモデル化

Fig. 6 Sensor modeling.

	センシング範囲	シャドウイング	位置尤度
赤外線レーザー	直線状 (検出領域角0度)	シャドウイング有	直線に沿った正規分布
カメラ	扇形 (検出領域角45度)	シャドウイング有	任意方向への正規分布
Wi-Fi 位置推定 (レンジフリー)	円形 (検出領域角360度)	シャドウイング無	円状の一様分布

図 7 歩行者検出センサの例

Fig. 7 Location sensor examples.

まる扇形のセンシング範囲を持つセンサの場合、角度分解能を指定した上で放射状の直線群に分解し、このすべての直線について、センサから最も近い歩行者エージェントのみを検出することで実現される。さらに、多くのセンサでは計測誤差が発生し、結果として出力される歩行者位置も誤差を持つ。提案手法ではこの位置誤差を含む歩行者位置を、指定領域（線分や円などの領域）上に分布する位置の確からしさとして与え、これを位置尤度とよぶ。

このモデル化手法によって、多様な歩行者検出センサを再現できることを示すために、実際に提案モデルによってセンサの基本性能を定義した例を図 7 に示す。ここでは、検出領域角と距離からなるセンシング範囲、ブロッキングの発生する確率を表すシャドウイング、分布の種類とそのパラメータを表す位置尤度によって、以下に示すようにしてセンサの特性を再現している。

- たとえば赤外線による簡易な人流カウンタでは、赤外線を直線上に照射し、その反射波で人の通過を検知する。したがって、複数の人が並んで通過する場合、手前の人だけがカウントされることも多い。これを再現するために、検出領域角を 0 [deg] として直線状の領域を設定し、シャドウイングが発生するモデルとする。また、位置尤度（その位置に存在することの確からしさ）として、その検出直線上で検知された人物の計測位置を中心とし、直線上に分布する一次元の正規分布を与える。
- カメラでは一般に扇形の領域内の人物を検出・監視することが可能だが、一部の歩行者が他の歩行者の影に隠れて検出されない場合がある。これに対し、検出領域角が 0 より大きく、シャドウイングも発生するモデ

ルを用いる。また、位置尤度として、カメラが検出した歩行者位置を中心とし、その地点から等距離の地点は同じ尤度を持つような二次元の正規分布を用いる。

- 電波強度などを用いない、一定の領域内の歩行者の存在のみを検出する簡易な Wi-Fi 位置推定もセンサとして表現することが可能である。これに対しては、検出領域角として 360 [deg] を与え (すなわち領域として円を仮定し)、シャドウイングは発生しないものとする。また、位置尤度としては Wi-Fi アクセスポイントの設置された位置を中心とする円形 (センシング範囲と一致) の一様分布などが考えられる。

4. シミュレーション実験

4.1 地下街における歩行者流分析システム

利用するセンサの種類と人の移動が、人の位置情報を利用するアプリケーションに与える影響を、HumanS シミュレータにより評価できることを示すために、地下街における歩行者流分析システムを対象としたシミュレーション実験を行った。本節では、センサの種類や配置が文献 [15] で提案されている歩行者流分析システム UPF に与える影響を調査する。このシステムは、複数地点に設置されたセンサによって歩行者の通過人数をカウントした上で、最適化手法に基づく地下街全体の歩行者流推定を行う。地理環境としては、図 1 に示すように、大阪市の地下街であるディアモール大阪 [16] の 300m × 300m の領域を対象とした。歩行者エージェントに関しては、現実的なモビリティを生成するために総務省統計局の国勢調査 [17] を基に OD 行列を作成し、常時 1,200 人程度がシミュレーション領域中に滞在するような設定とした。また、センサの特性による推定精度の変化を調べるために、図 8 に示すような 2 種類のセンサを用意した。ベンチマークのために用意した理想センサ (検出領域角 60 度でシャドウイングがなく、位置尤度は検出位置のみが 1 であるようなセンサ) では計測範囲内の歩行者数を誤差なく計測することが可能だが、レーザレンジスキャナ (LRS) においては、前の歩行者の影に隠れた別の歩行者を見逃してしまう可能性がある。この 2 種類のセンサの選択と配置に変更を加えながら、以下に示す 5 種類のシミュレーションシナリオを実行した。ただし、シナリオ (e) はシナリオ (a)~(d) のシミュレーションを実行した後、その結果をふまえたうえで効率的な配置になるように検討したものである。シナリオ (a), (b) および (e) におけるセンサの配置を図 9 に示す。

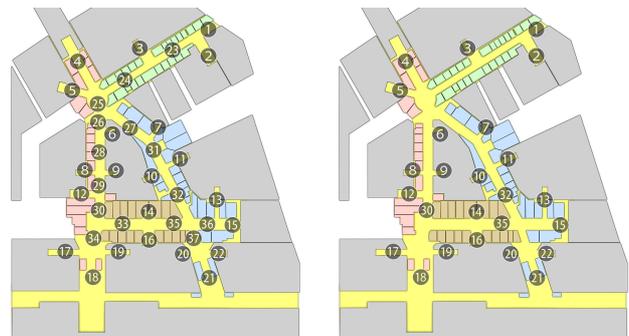
- (a) 37 個の主要通路すべてに 1 つずつ理想センサを設置
- (b) 37 個の主要通路すべてに 1 つずつ LRS を設置
- (c) 出入口に隣接する 22 個の通路にのみ LRS を設置
- (d) 出入口以外の 15 個の通路にのみ LRS を設置
- (e) 手動で選択した 25 個の通路に LRS を設置

HumanS シミュレータによって生成された歩行者の実際の

	センシング範囲	シャドウイング	位置尤度
理想センサ (ベンチマーク)	扇形 (検出領域角60度)	シャドウイング無	誤差無し
LRS (Laser Range Scanner)	扇形 (検出領域角60度)	シャドウイング有	任意方向への正規分布

図 8 実験に用いた 2 種類のセンサ

Fig. 8 2 types of sensor settings.



(1) シナリオ a, b

(2) シナリオ e

図 9 ディアモール大阪におけるセンサの配置

Fig. 9 Sensor placement in Diamor Osaka.

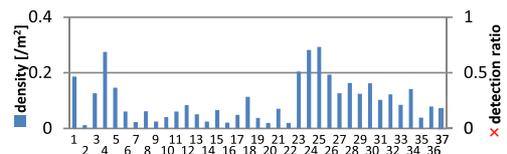


図 10 各通路における歩行者密度

Fig. 10 True density on pathways.

人口密度を図 10 に、UPF による推定結果と各シナリオにおける歩行者の検出率を図 11 に、UPF による歩行者流の推定誤差を表 1 に示す。

図 11 の左側の縦軸は UPF で推定された歩行者流によって再現される各通路の人口密度を表しており、図 10 と比較することで実際の密度との差が分かる。右側の縦軸は LRS の計測範囲内を通過した歩行者のうち、センサによって計測できた歩行者の割合を表しており、この値が高いほど歩行者の数を正確にカウントできたことになる。歩行者数の計測に関してまったく誤差のない理想センサを利用し、センサ数も最大であるシナリオ (a) に関しては、表 1 に示すように UPF の推定誤差が 10% と最高の精度が実現された。これに対して、センサの位置はまったく変更しないまま誤差を持った LRS に切り替えたシナリオ (b) では推定誤差が 17% まで上昇した。図 11 からシナリオ (b) では検出率が低下していることが分かるが、これは LRS の持つシャドウイングの特性によるものである。シミュレーション中におけるシャドウイングによる影響の大きさを調べるために歩行者の生成数を変更しながら実験を行い、人口密度と検出率の関係进行调查した結果を図 12 に示す。

図 12 の結果から、シャドウイングの特性を持つ LRS の

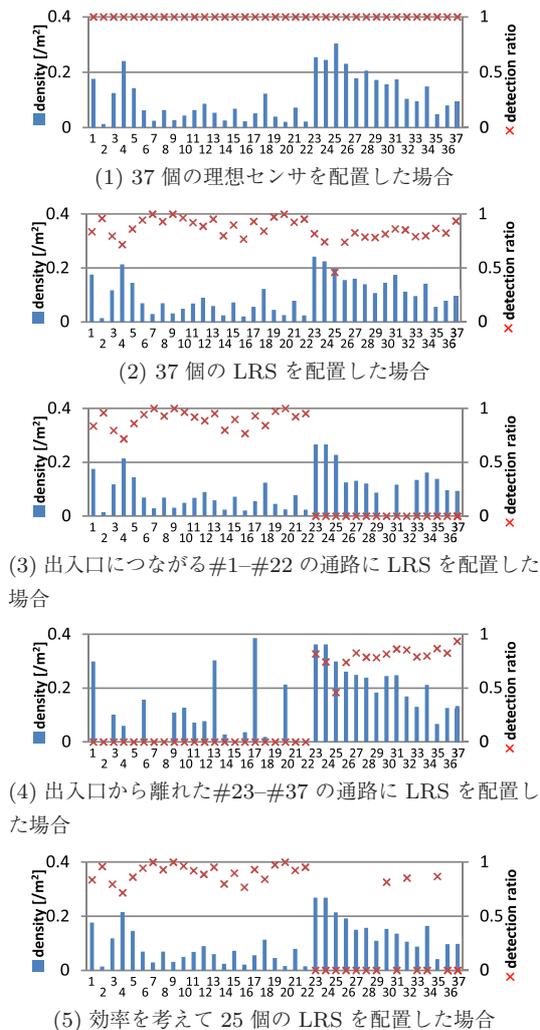


図 11 各通路における歩行者の検出率と推定結果
 Fig. 11 Estimated density and detection ratio of people.

表 1 歩行者流の推定誤差
 Table 1 Flow estimation error.

シナリオ	センサ種類	センサ数	歩行者流の推定誤差
(a)	理想センサ	37	10%
(b)	LRS	37	17%
(c)	LRS	22	28%
(d)	LRS	15	132%
(e)	LRS	25	14%

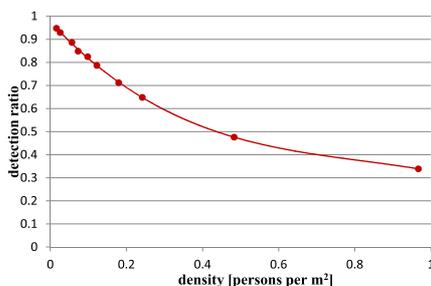


図 12 LRS を用いた場合の人口密度と検出率の関係
 Fig. 12 Density vs. detection ration in LRS model.

計測精度は、人口密度が高くなればなるほど悪化する傾向があることが分かった。シミュレーション中の人口密度は平均で 0.12 人/m² 程度の設定となっており、シナリオ (b) の LRS では約 80% 程度の歩行者しか検出できず、このことが推定精度の低下につながったと考えられる。

また、シナリオ (c) および (d) ではシナリオ (b) に比べてセンサの数を減らしており、それぞれ UPF の推定誤差が 28%、132% と大幅に増加している。この結果から、UPF においては対象領域中央付近に集中的にセンサを配置するよりも、出入口を含み、かつ地理分散的な配置の方が高い精度が得られることが分かった。最後にシナリオ (e) に関しては、精度を保ったままセンサの設置数を削減することを目指して、シナリオ (b), (c), (d) の結果をふまえた上で効率的な配置を考案したものである。具体的には、シナリオ (b) から、UPF による推定に悪影響を与えようと考えられる検出率の低い LRS を取り除いている。ただし、ある程度は地理分散的に配置した方がよいこともシナリオ (c), (d) の結果から明らかになってきたため、一部の領域に配置が偏りすぎないように留意した。その結果、センサの数を 25 個まで減らしているにもかかわらず、推定誤差が 14% とシナリオ (b) よりも優れた結果を得ることができた。UPF においては誤ったセンシングデータが推定結果に悪影響を与えることがある。特に LRS を使用した場合には、図 12 に示したように人口密度が高ければ高いほど検出率が低下する傾向があるため、必ずしもセンサの数を増やせばよいとは限らず、狭い通路や交通量の多い通路などにはセンサを置かない方がよい推定結果を得られるということが分かった。

このように、HumanS シミュレータを利用することによって、センサの種類や配置など、様々なパラメータを変更しながらシミュレーションを実行することができる。さらに、その結果から、各アプリケーションに応じた行動センシングシステムの特徴を把握し、設計に活かすことで、効率的な運用に貢献できることが分かった。

4.2 オフィスビルにおける空調・照明の省エネ制御システム

従来の照明制御システムでは、机上的ような個人の作業に必要な空間の明るさを確保する照明と、壁や床などの周辺環境の明るさを確保する照明が区別されておらず、部屋全体でつねに一定の明るさが確保されている。空調に関しても同様で、部屋全体を対象とした制御が一般的である。これに対して、オフィスビルにおける省エネ化システムとして、タスク・アンビエントな空調・照明制御システムが提案されている。このシステムでは、個人を対象とするタスク機器と、周辺環境を対象とするアンビエント機器の組合せにより、部屋全体だけでなく、個人単位での空調および照明の制御を実現する。たとえば、センサで計測した執務

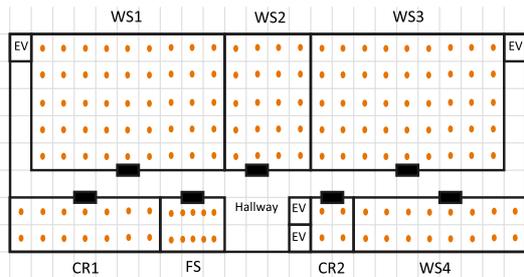


図 13 実験の対象となるオフィス

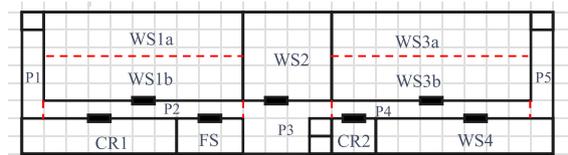
Fig. 13 Floor map used in simulation experiments.

者の在不在情報を利用し、タスク照明・タスク空調を制御することで、電力消費の削減が期待できる [18], [19], [20]. しかし、このようなシステムにおいては、センサによる執務者の監視が完全ではなく、本来は不要であるはずの機器を稼働させてしまう場合や、それとは反対に、必要な機器の稼働を開始しないなどの制御ミスが発生してしまう場合がある. 本節では、センシングデータの分析にとどまらず、その分析結果に基づいた評価においても HumanS シミュレータが活用できることを示す.

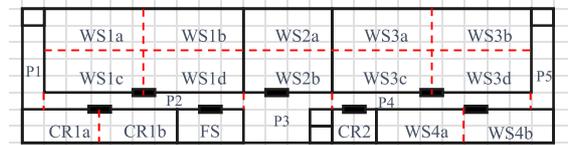
地理環境として、大阪大学大学院情報科学研究科棟のあるフロアを模して、図 13 に示すように、4つのオフィス WS1~WS4 と 2つの会議室 CR1 と CR2、休憩室 FS と 4つのエレベータ EV から構成される 40m x 120m の領域を用意した. また、フロア全体で 126 人が在籍しているものとして、実際のオフィスにおける 10 分間隔の観測調査データ [21] に基づき、現実的な人口密度推移に従うよう歩行者エージェントを生成した.

また、HumanS のモビリティモデルを拡張し、オフィスや会議室などの室内に席を設置し、執務者はいずれかの席の上に滞在するようにした. オフィスにおける席の選択方法としてはランダムと優先度順の 2つを準備しており、ランダムの場合には各室に到着した際に空席の中から無作為に 1つを選択して着席するが、優先度順の場合には左上から順に詰めるようにして座って行く. この拡張は、執務者を狭い範囲に集めることによって、付近に執務者が存在しない機器を停止し、どの程度の消費電力を削減することが可能であるかを検証する目的を持っている. また、空調や照明の制御については各機器ごとにサービスエリアが設定されており、センサによってそのサービスエリア内に人の存在が確認できた場合に機器を稼働させ、人の存在を確認できなかった場合には停止するという単純なモデルを仮定する. サービスエリアは図 14 に示すように大小 2通りの区分を用意し、同一サービスエリア内の空調およびアンビエント照明は、一括してオン・オフの制御がなされるものとした.

機器の電力消費モデルとして、人の行動、気象条件、空調および電力需要を考慮したモデル [22] を採用し、人の行動による機器の稼働状況、外気によって変化する空調需要



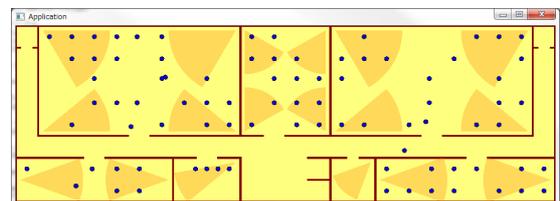
(1) サービスエリア大



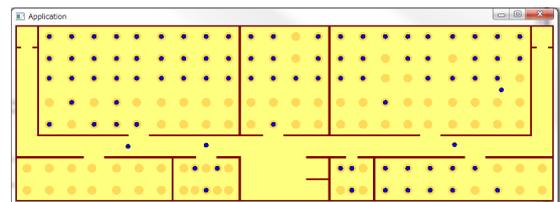
(2) サービスエリア小

図 14 オフィスフロアにおけるサービスエリア区画

Fig. 14 Dividing offices.



(a) カメラ (ランダム着席)



(b) 赤外線センサ (優先度順着席)

図 15 2種類のセンサとその配置

Fig. 15 2 types of sensor settings.

に対する消費電力を計算することができる. このモデルに対し、HumanS によって生成されるモビリティや機器の制御情報に加えて、実測に基づく気象条件と、大阪大学大学院情報科学研究科棟の立地条件、建築仕様、形状を入力として与えた. さらに、人の快適度を表す指標として、機器からサービスを受けることのできた期間の長さを表すサービス提供度を導入する.

制御の入力となるセンサに関しては図 15 (a) にその配置とセンシング範囲を示すカメラと、図 15 (b) にその配置を示す赤外線センサ (配置箇所のみがセンシング範囲)、最適センサの 3 種類の設定を用意する. 図 15 において、橙色の扇や円は各センサのセンシング可能な範囲を、青い丸はシミュレーション中のある時点における歩行者位置を表している. カメラと赤外線センサはそれぞれ異なる計測範囲を持つが、最適センサは対象領域全体で執務者を完全に検出できるような、性能比較目的での仮想センサである. このような条件のもとで行動センシングシステムを導入し、表 2 に示す 9 つのシナリオについてシミュレーション実験を行った.

表 2 シミュレーションシナリオ

Table 2 Simulation scenarios.

	制御方針		
	歩行者行動	センサ	サービスエリア
(1)	ランダム	N/A	N/A
(2)	ランダム	赤外線センサ	大
(3)	ランダム	カメラ	大
(4)	ランダム	最適センサ	大
(5)	ランダム	赤外線センサ	小
(6)	ランダム	カメラ	小
(7)	ランダム	最適センサ	小
(8)	優先度順	最適センサ	大
(9)	優先度順	最適センサ	小

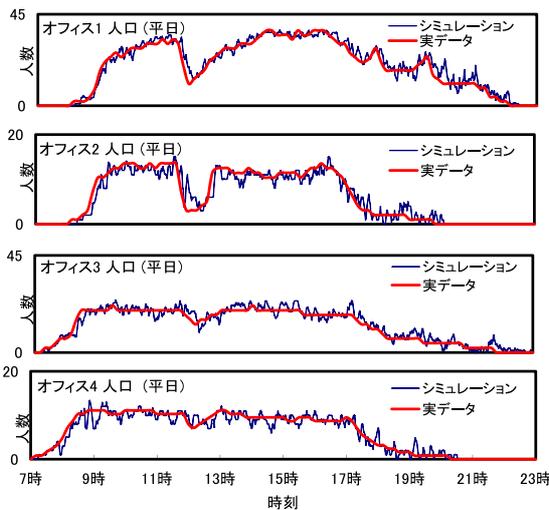


図 16 実データとシミュレーションにおける人口推移の比較
Fig. 16 Number of workers in WS1, WS2, WS3 and WS4.

まず、HumanS シミュレータによって生成された歩行者行動について考察する。この実験では、3.2 節において示した、人口密度の時間推移を入力とするモビリティモデルを利用している。図 16 は、歩行者行動生成のためにシミュレータに与えた各オフィスにおける人口推移の実データと、そのデータを基に実際に HumanS シミュレータによって生成された歩行者エージェントの人口推移を表している。この結果から、HumanS シミュレータでは入力された実データを非常に高い精度で再現しており、現実的な歩行者エージェントを生成できたといえる。

次に、各シナリオにおける空調および照明の省エネルギー率を図 17 に、サービス提供度を図 18 に示す。ここで、省エネルギー率とは、制御をまったく行わず空調・照明が常時稼働しているシナリオ (1) に対して、シナリオ (2)~(9) の制御によって、どれほどの割合の電力を削減することができたのかを表す指標である。図 17 に注目すると、シナリオ (8) と (9) の場合に特に省エネルギー率が高くなっている。この 2 つのシナリオはいずれも席の選択順として優先度順を採用していることから、オフィスにおける優先度順の導入による省エネ効果が非常に大きいことが

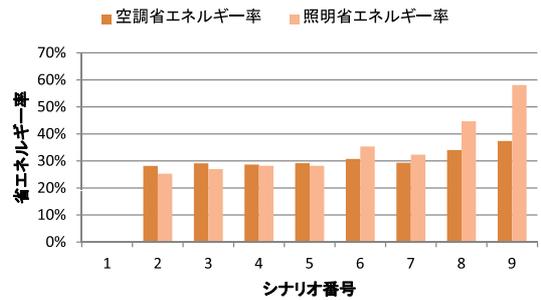


図 17 各シナリオにおける空調および照明の省エネルギー率
Fig. 17 Energy consumption ratio of air-conditioning and lighting.

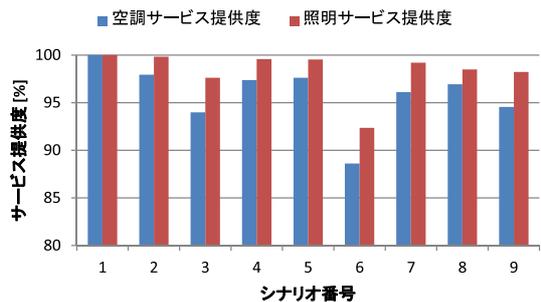


図 18 各シナリオにおける空調および照明のサービス提供度
Fig. 18 Service availability of air-conditioning and lighting.

確認できる。特に、その効果はサービスエリアの小さいきめ細かな制御を行っているときに顕著である。次に、図 18 のグラフから、シナリオ (3) や (6) のサービス提供度が低くなっていることが分かる。これらのシナリオはセンサとしてカメラを採用している点が共通しており、カメラの視界の届かないところにいる執務者が十分なサービスを受けられなかったと考えられる。また、シナリオ (2) や (5) の赤外線カメラを使用した場合には、カメラを使用した場合よりもわずかに省エネルギー率で劣るものの、サービス提供率は最適センサを用いた場合とほとんど同等であった。これは、席ごとに備え付けられた赤外線センサを使用すれば、着席中の執務者を確実にとらえることができるためである。

このように、HumanS シミュレータを利用することによって、行動センシングシステムによって得られたセンシングデータが、そのセンシングデータを利用する制御システムに与える影響まで含めて評価することが可能である。

5. まとめと今後の課題

本研究では、行動センシングシステムの開発支援を目指し、HumanS シミュレータの設計開発を行った。HumanS は、GIS との連携による現実世界の地図データ入力や、実データに基づく歩行者モビリティの再現、統一的なセンサモデルの導入などを特徴とするシミュレータである。また、2 つの事例に対して、HumanS シミュレータを利用し、シミュレーションを通して得られたセンシングデータを解

析および可視化することにより、行動センシングシステムの性能を効率良く評価できることを示した。

今後は、より現実的な環境に対して、提案するシミュレータを適用するために、実世界における人の動きを考慮した詳細な歩行者モビリティモデルについて検討する。同様に、センサモデルについても、高さの概念を導入し、より現実的なセンサの見通しが再現できるよう拡張することを検討する。さらに、行動センシングだけでなく、BEMS (Building Energy Management System) をはじめとした環境を対象としたセンシングシステムにも HumanS シミュレータを適用できるよう、温度、湿度、CO₂ を計測対象とするセンサについてモデル化を進めていく。

謝辞 本研究の一部は KDDI 財団ならびに文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業—次世代 IT 基盤構築のための研究開発—「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012 年度～2016 年度) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Shu, L., Hauswirth, M., Chao, H.-C., Chen, M. and Zhang, Y.: NetTopo: A framework of simulation and visualization for wireless sensor networks, *Ad Hoc Netw.*, Vol.9, pp.799–820 (online), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.09.003> (2011).
- [2] Polley, J., Blazakis, D., McGee, J., Rusk, D. and Baras, J.: ATEMU: A fine-grained sensor network simulator, *Proc. IEEE SECON 2004, 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp.145–152 (2004).
- [3] Goodin, C., Kala, R., Carrillo, A. and Liu, L.: Sensor modeling for the Virtual Autonomous Navigation Environment, *IEEE Sensors 2009*, pp.1588–1592 (online), DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398491 (2009).
- [4] The UrbanSim Simulator, available from <http://www.urbansim.org/>.
- [5] Hollick, M., Krop, T., Schmitt, J., Huth, H.-P. and Steinmetz, R.: Modeling Mobility and Workload for Wireless Metropolitan Area Networks, Vol.27, No.8, pp.751–761 (2004).
- [6] Sun, Z., Deal, B. and Pallathucheril, V.: The land-use evolution and impact assessment model: A comprehensive urban planning support system, *URISA Journal*, Vol.21, No.1, pp.57–68 (2009).
- [7] King, M., Harris, B., Toolin, M., DuBord, R., Skowronski, V., LuSoto, M., Estep, R., Brennan, S., Cosofret, B. and Shokhirev, K.: An urban environment simulation framework for evaluating novel distributed radiation detection architectures, *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST 2010)*, pp.446–452 (online), DOI: 10.1109/THS.2010.5654958 (2010).
- [8] Uno, K. and Kashiya, K.: Development of Simulation System for the Disaster Evacuation Based on Multi-Agent Model Using GIS, *Tsinghua Science & Technology*, Vol.13, No.1, pp.348–353 (online), DOI: 10.1016/S1007-0214(08)70173-1 (2008).
- [9] ESRI Shape File, available from http://www.esri.com/products/gis_data/shape/.
- [10] PostgreSQL, available from <http://www.postgresql.org/>.
- [11] PostGIS, available from <http://postgis.refractor.net/>.
- [12] Berq, M.D., Cheong, O., Kreveld, M.V. and Overmars, M.: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, chapter 3, Springer-Verlag New York Inc. (2008).
- [13] 佐藤圭祐: 極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.102–109, DOI: 10.7210/jrsj.11.702 (1993).
- [14] 月尾嘉男, 祖父江隆弘: 歩行者の速度と密度との関係の測定, 学術講演梗概集, 計画系, Vol.52, pp.699–700 (1977).
- [15] Maeda, K., Sato, K., Konishi, K., Yamasaki, A., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Getting Urban Pedestrian Flow from Simple Observation: Realistic Mobility Generation in Wireless Network Simulation, *Proc. 8th ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pp.151–158 (2005).
- [16] Diamor Osaka, available from <http://www.diamor.jp/lang/en/>.
- [17] The Statistics Bureau and the Director-General for Policy Planning of Japan: Population Census in National Survey of Japan, Technical Report, Ministry of Internal Affairs and Communications (2005). (In Japanese), available from <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/jutsu1/00/03.htm>.
- [18] Taisei Corporation: T-Zone Saver, available from http://www.taisei.co.jp/about_us/release/2010/1275870348591.html.
- [19] Yanai, T. and Sasaki, M.: Execution and Verification of Task/Ambient Air Conditioning at Medium-scale Headquarters Building, *Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol.84, No.8, pp.643–650 (2010).
- [20] Furuya, S. and Takai, H.: In Case of the Office Renewal Using Task and Ambient Lighting which Adopted LED Lighting, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Vol.2010, pp.1335–1336 (2010).
- [21] The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan: Internal Heat Gains in Office Buildings and Heat Load Simulation (2009).
- [22] Yamaguchi, Y., Shimoda, Y. and Mizuno, M.: Development of Simulation Model for Heat and Electricity Demand of Office Building based on Occupants' Behavior, *Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.93, pp.37–47 (2004).

推薦文

本研究は、地図データと歩行者交通量の統計データ、歩行者の行動情報を計測するセンサの配置・設定を包括的に扱うシミュレータである。具体例を用いた性能評価もあり、有用性、正確性は高く評価できる。よって、ここに研究会推薦論文として推薦する。

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査
竹下 敦)



金谷 拓実 (学生会員)

平成 23 年大阪大学基礎工学部情報科学学科卒業。平成 25 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。在学中、都市環境における行動センシングシステムの性能評価手法に関する研究に従事。



廣森 聡仁 (正会員)

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 17 年株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社。平成 20 年より大阪大学大学院情報科学研究科助教。博士 (工学)。モバイルアプリケーションやモバイルネットワーク

ワークの設計および性能評価に関する研究に従事。IEEE 会員。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学大学院情報科学研究科助

手。平成 19 年より同研究科准教授。博士 (工学)。分散システムや無線通信プロトコルの設計および実装に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散システム、通信プロトコル、モバイルコン

ピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会、ACM 各会員。IEEE Senior Member。