

## 様々なセンサを利用する位置行動検出システムの設計支援環境

Design and Development Support for Location Sensing Systems with Multi-modal Sensors

金谷 拓実<sup>†1</sup> 廣森 聡仁<sup>†1†2</sup> 山口 弘純<sup>†1†2</sup> 東野 輝夫<sup>†1†2</sup>  
 Takumi Kanaya Akihito Hiromori Hirozumi Yamaguchi Teruo Higashino

### 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ン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、例えば、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。例えば、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み合わ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。例えば、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、少ない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情報を簡単に集められるが、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が全く異なるため、システムの用途や地理環境を考慮し、少ない数の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 は地理情報システム (GIS) と連携して動作する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、センサの振る舞いの全てを包括的に再現してシミュレーションを行う点が最大の特徴となっている。この特徴によって、センサの特性や配置だけでなく、周辺環境まで含めて各要素が行動センシングシステムに与える影響を評価できるため、実環境に近い条件でシステムの特性を理解し、



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

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都市環境と歩行者、センサの全要素について現実的な振る舞いとなるようにモデル化を進める必要がある。都市環境に関しては 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、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モビリティを実現している。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、各空間毎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する。さらに、誤差や計測範囲に関する異なる特性をもったセンサを、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た。上記したようなシミュレーションの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初めとする全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示すため、人の位置情報を利用するアプリケーションに対する評価実験を行った。具体的には、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に変更しながらシステム性能の

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

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た。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し、その特徴を理解するだけでは無く、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など、設計支援環境として有効であることを確認できた。

## 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。例えば、NetTopo [1], ATEMU [2], Avrora [3], WorldSens [4], SENS [5], SenQ [6] などが 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たものであり、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、各センサの計測によって生成されるデータを再現することは行わないため、センシングの振る舞いを評価することはできない。

これに対して、文献 [7] のようにセンシングの振る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紹介されている。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および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 [8] 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することのできるシミュレータである。文献 [9] 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) [10] 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、これらのシミュレータにおいては、歩行者の細かな行動まで含めて再現することは行わないため、センシングの振る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 [11] 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非常に限定された目的に対してのみ適用できるものであって、本研究で目標とするよう

な様々な都市環境やセンサに適応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を紹介する。例えば、文献 [12] では、GIS で取り込んだ建物や道路の位置情報・形状情報を利用して、災害時の避難計画立案の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。

## 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) センサの特性の 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 [13] を使用する。さらに、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。OD 行列とは、地図上で出発点と到着点のペアが複数与えられた場合に、その各ペアについて交通量を与えるデータであり、提案シミュレータでは 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が可能である。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、さまざま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の設定については、大きく分けてセンサの能力と配置の 2 つを入力として与える。センサの能力とは計測範囲や誤差の特性を表すものであり、配置は 1 つ 1 つの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。

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易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を保持するのに加えて、歩行者の位置情報やセンサの計測範囲の格納や演算処理を行う上での親和性が非常に高い。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 [14] の拡張である PostGIS [15] を GIS データ

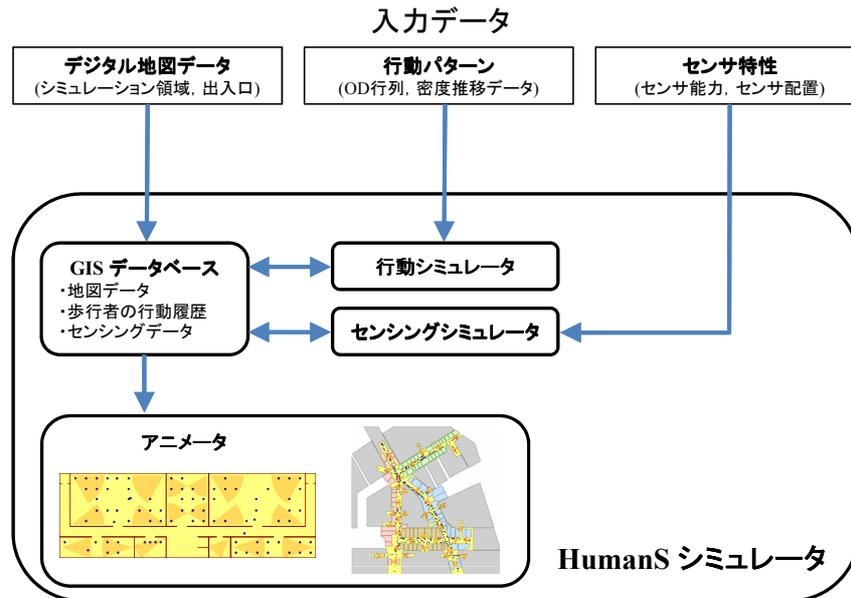


図 2 HumanS シミュレータのアーキテクチャ  
Fig. 2 Architecture of HumanS Simulator

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全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を進めることが可能である。例えば、特定の領域・時刻のセンシングデータだけを抽出し、真値を表す歩行者の行動履歴との差を取得する SQL クエリによる分析が考えられる。また、GIS データベースに格納されたシミュレーション結果は、HumanS シミュレータのもつ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通行量に関する直感的な理解を支援する。アニメータにおいては、シミュレーション領域や歩行者の位置情報、センサの配置、センシング範囲などが図 2 のように可視化される。

### 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地理環境を再現することによって、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、提案シミュレータでは、歩行者が通行可能な通路や広場、室内を閉多角形の集合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が通行可能な閉多角形領域である Free Zone と、歩行者が通行不能な領域である Prohibited Zone の 2 つから構成されると仮定する。Free Zone が複雑な形状であっても歩行者が効率的に通行可能な経路を自動的に導出するため、図 3(b) に示すように Free Zone を三角形分割 [16] する。これにより、シミュレーション領域の形状を複数の三角形の組み合わせとして単純化できる。このとき、 $n$  個の頂点からなる多角形を三角形

分割するために必要な処理時間は  $O(n \log n)$  である。さらに、生成された最大  $n$  個の三角形領域の接続関係を利用して、複数の三角形領域で共有される辺の中心を頂点とするようなグラフを構成すると、図 3(c) のようになる。1 つの三角形領域と隣接する三角形領域は高々 3 個であるため、構成されるグラフは頂点数がたかだか  $3n$  個で、辺の数が少ない疎なグラフである。歩行者の経路探索にこのグラフを利用することによって、壁や障害物からの距離を一定以上に保ちつつ、任意の 2 点間の近似的な最短経路を求めることができる。ここでは静的なシミュレーション領域を想定しており、途中で新たな障害物や通路が出現することはないため、グラフの構成や経路の探索はシミュレーション開始時に 1 度だけ実行すれば良い。また、このグラフは頂点数が少ない疎なグラフであるため、複雑な形状のシミュレーション領域であったとしても、シミュレーション全体の実行過程から見ると経路の導出は比較的小さな計算量になる。

### 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当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(c) 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たため、任意のルーティングアルゴリズムを適用可能であるが、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。この場合には、疎なグラフに対するアルゴリズムの適用であるため、各頂点を始点とする経路探索に要する

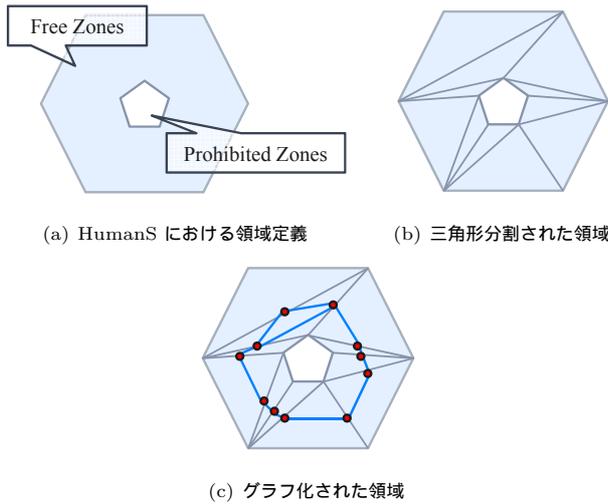


図 3 地理環境のモデル化

Fig. 3 Geographic Environment Model

	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 Behavior Settings by OD-Matrix

計算時間が  $O(n \log n)$  であり、全ての頂点を始点としてこのアルゴリズムを繰り返すと、 $O(n^2 \log n)$  の計算時間を要することになる。歩行者エージェントは発見した経路に沿って移動し、目的地に到着した時点で消滅する。

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。例えば、図 5 は 5 つの状態  $P_1 \sim P_5$  をもつ場合の状態遷移図を表している。ここで、状態  $P_i$  から  $P_j$  へ状態遷移を表す  $Q_{ij}$  は 2 つの領域間の歩行者エージェントの移動確率に相当する。シミュレータへの入力としては、一部あるいは全ての領域に対して、時刻  $t$  における各状態  $P_i$  の目標人口密度  $D_i(t)$  を与える。このとき、入力された人口密度を実現する行動パターンの生成は、シミュレーションの実行過程での時刻  $t$  における各状態  $P_i$  の実際の人口密度  $d_i(t)$  と目標の人口密度  $D_i(t)$  の差を最小化するような  $Q_{ij}$  を求める最適化問題として定義される。すなわち、領域が  $n$  個ある場合の最適化問題を数式で表すと以下ようになる。

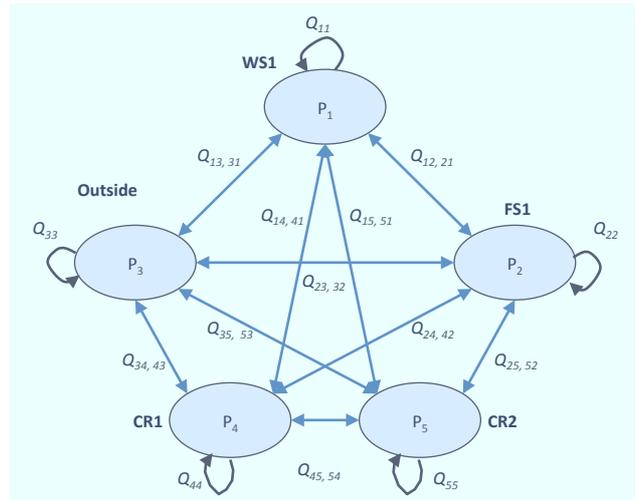


図 5 歩行者行動を表す状態遷移図

Fig. 5 Behavior State Transition Diagram

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

提案シミュレータにおいては、一定時間毎にこの最適化問題を解くことによって領域間を移動する歩行者エージェントの数を決定し、入力された人口密度の時間推移を実現するような歩行者行動を再現している。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(c) 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する。

近年、地下街やオフィスビルを初めとする都市環境の各所において施設の利用状況調査が行われており、実データに基づく OD 行列や人口密度時間推移データを得ることは比較的容易である。HumanS シミュレータでは、このような実データに基づく行動モデルを採用することによって、センシングシミュレーションの入力ともなる歩行者行動を現実に近い形で再現する。

### 3.3 センシングシミュレーション

本研究では、多様な位置センサを統一的なモデルで表現することで、さまざまな行動センシングシステムに適用できるような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、取得できる位置情報の精度に関して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位置センサの特性を再現し、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、センサの種類に関わらず、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ノード、計測位置、計測時刻が紐づけて登録されるため、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。以下では、HumanS における位置センサのモデル化について説明する。

同じように位置情報を取得するセンサであっても、そのセンサの種類によって情報を取得できる範囲は異なる。ここでは、

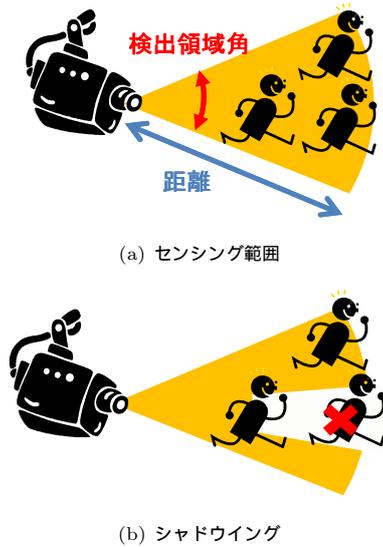


図 6 位置センサのモデル化  
Fig. 6 Sensor Modeling

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もっており、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、カメラを初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、ほかの歩行者に遮られた先の見通しを確保することができないブロッキングと呼ばれる現象が生じることがある。この特性を再現するために、障害物による見通しの有無を図 6(b) に示すようにシャドウイングとしてモデル化する。さらに、歩行者の計測によって生成されるセンシングデータの精度はセンサによって異なるため、シミュレーション内の計測結果を位置尤度という分布の形で記録することによってこれを再現する。例えば、カメラによって検出した位置情報は正規分布に従う誤差をもっている。また、レンジフリー形式の Wi-Fi 位置推定など計測範囲の何処かに歩行者が存在するという情報しかわからないといったケースでは、計測範囲内の各地点において歩行者が存在する尤度を一定とする一様分布によってセンサが表現される。

このモデル化手法によって多様な位置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位置センサを定義した例を図 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、以下に示すようなセンサの特性を再現している。

- 赤外線レーザーでは直線上の先頭の歩行者しか検出することができず、レーザー方向に沿った正規誤差をもつ。
- カメラでは扇上の領域を監視することが可能だが、後ろの歩行者が前の歩行者の影に隠れて検出されない場合がある。計測された位置情報は任意方向への正規誤差をもつ。
- レンジフリーの Wi-Fi 位置推定は電波強度に応じた円形の歩行者を見通しに関わらず検出可能だが、通信範囲内に

	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 位置センサの例  
Fig. 7 Location Sensor Examples

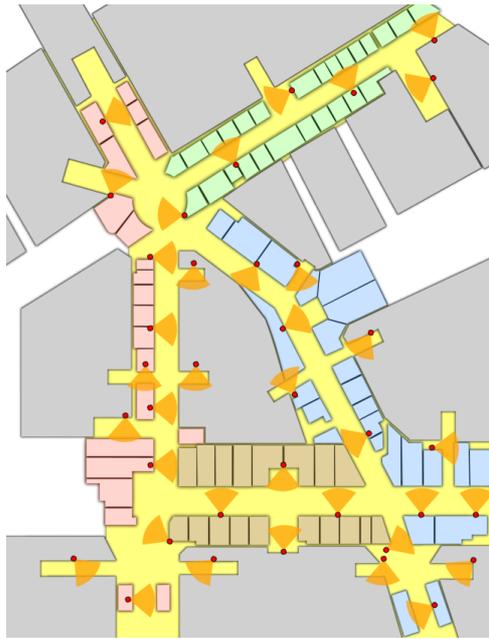
	センシング範囲	シャドウイング	位置尤度
Perfect Sensor for benchmark	扇形 (検出領域角60度)	シャドウイング無	誤差無し
LRS (Laser Range Scanner)	扇形 (検出領域角60度)	シャドウイング有	任意方向への正規分布

図 8 実験に用いた 2 種類のセンサ  
Fig. 8 2 types of Sensor Settings

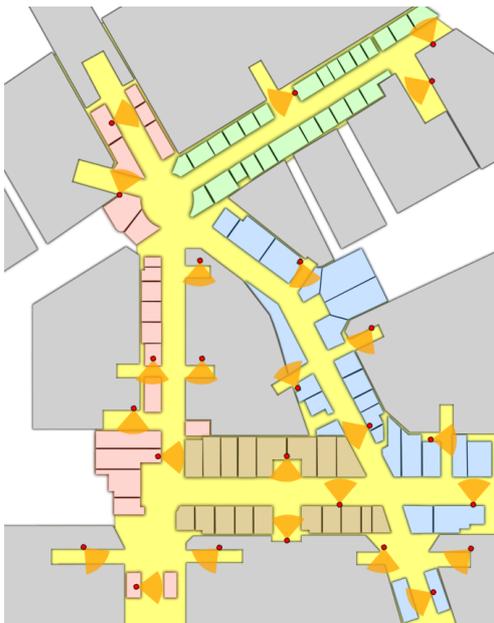
端末保持者が存在するということがわからないため、計測によって取得できる位置情報は通信範囲の何処かに歩行者がいるという情報だけである。

#### 4. シミュレーション実験

HumanS シミュレータによって、人の位置情報を利用するアプリケーションの設計に貢献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。本章では、センサの種類や配置が歩行者流分析システム UPF [17] に与える影響を調査するためのシミュレーション実験について説明する。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 [18] の  $300m \times 300m$  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 [19] を基に OD 行列を作成し、常時 1200 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。Perfect Sensor ではセンシング範囲内の歩行者数を誤差なく計測することが可能だが、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、その結果を踏まえた上で効率的な配置になるように検討したものである。



(1) シナリオ a, b におけるセンサ配置



(2) シナリオ e におけるセンサ配置

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

- (a) 全通路 37 箇所 に 1 つずつ Perfect Sensor を設置 (図 9(1))
- (b) 37 個の主要通路全てに 1 つずつ LRS を設置 (図 9(1))
- (c) 出入口に直接接続された 22 個の通路に LRS を設置
- (d) 出入口に直接接続されていない 15 個の通路に LRS を設置
- (e) 手動で選択した 25 個の通路に LRS を設置 (図 9(2)) .

HumanS シミュレータによって生成された歩行者の実際の人口密度を図 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

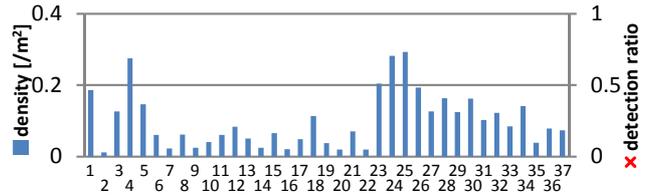


図 10 各通路における歩行者密度  
Fig. 10 True Density on Pathways

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)	Perfect Sensor	37	10 %
(b)	LRS	37	17 %
(c)	LRS	22	28 %
(d)	LRS	15	132 %
(e)	LRS	25	14 %

誤差を表 1 に示す。図 11 の左側の軸は 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わかる。右側の軸は 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全く誤差の無い Perfect Sensor 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、センサの位置は全く変更しないまま誤差をもった 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わかるが、これは LRS のも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を調査した結果を図 12 に示す。

図 12 の結果から、シャドウイングの特性をもつ LRS の計測精度は、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わかった。シミュレーション中の人口密度は平均で  $0.12 \text{ persons/m}^2$  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繋がったと考えられる。このように、HumanS によって行動センシングシステムの特性を効率的に分析することが可能である。

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、出入口を含むバラつきのある配置の方が高い精度が得られることがわかった。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) の結果を踏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ると考えられる検出率の低い LRS を取り除いてい

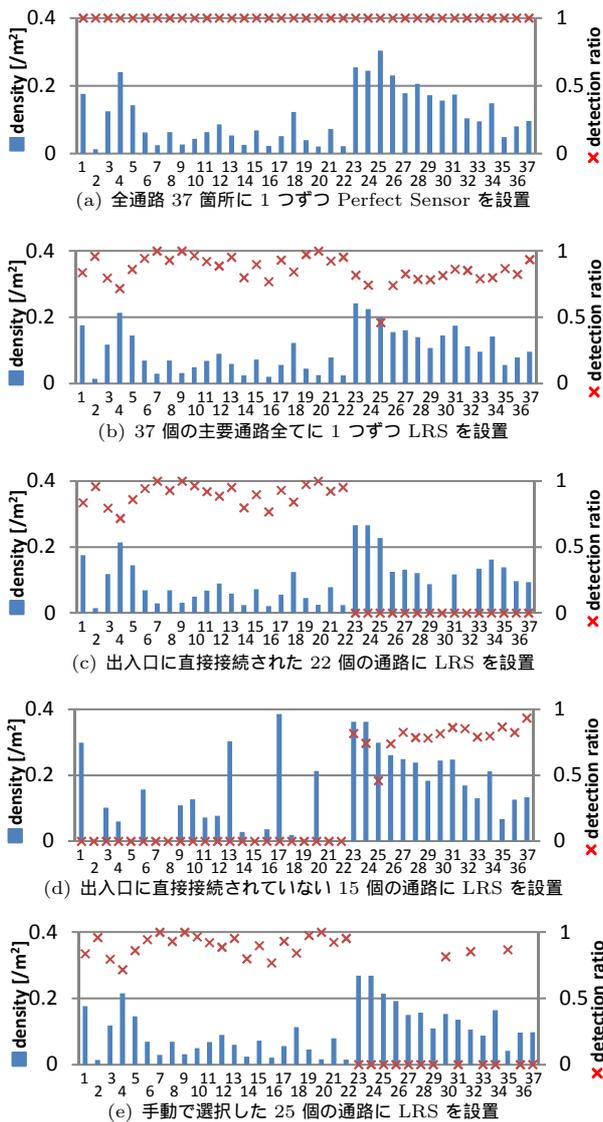


図 11 各通路における歩行者の検出率と推定結果

Fig.11 Estimated Density and Detection Ratio of People

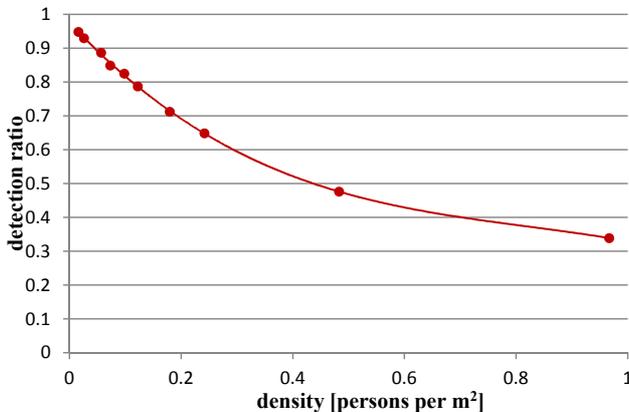


図 12 LRS を用いた場合の人口密度と検出率の関係

Fig.12 Density VS. Detection Ration in LRS Model

る．ただし，ある程度はバラツキをもって配置した方が良いこともシナリオ (c), (d) の結果から明らかになっていたため，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関わらず，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良いとは限らず，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良い推定結果を得られるということがわかった．

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，さまざま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性を把握し，設計に活かすことで，効率的な運用に貢献できることがわかった．

## 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て HumanS と呼ばれるシミュレータの設計開発を行った．HumanS シミュレータは，GIS との連携による現実世界の地図データ入力や，比較的入手の容易な実データに基づく現実的な歩行者モビリティの再現，多様な特性をもったセンサの評価を実現する統合的なセンサモデルの導入などを特徴としている．この特徴によって，提案シミュレータはさまざまな環境やアプリケーションに適用することが可能になっている．また，実際に地下街における歩行者流推定システムを対象としたシミュレーション実験を行い，センサとシステムの関係性を明らかにし，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ことによって，行動センシングシステムの特性を理解し，効率的な開発や運用を行うために HumanS シミュレータが有効であることを示した．

今後は BEMS ( Building Energy Management System ) を初めとして，熱や気候に関する分野について HumanS シミュレータを適用できるように拡張を進めていく予定である．そのために温度，湿度， $CO_2$  など，歩行者以外で airflow 制御の要となるパラメータ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必要がある．

## 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 (2011).
- 2) Polley, J., Blazakis, D., McGee, J., Rusk, D. and Baras, J.: ATEMU: a fine-grained sensor network simulator, *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp.145 – 152 (2004).
- 3) Titzer, B. L., Lee, D. K. and Palsberg, J.: Avroa: scalable sensor network simulation with precise tim-

- ing, *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, IPSN '05, IEEE Press (2005).
- 4) Fraboulet, A., Chelius, G. and Fleury, E.: Worldsens: development and prototyping tools for application specific wireless sensors networks, *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, IPSN '07, ACM, pp.176–185 (2007).
  - 5) Sundresh, S., Kim, W. and Agha, G.: SENS: A Sensor, Environment and Network Simulator, *Proceedings of the 37th annual symposium on Simulation*, ANSS '04, IEEE Computer Society, pp.221– (2004).
  - 6) Varshney, M., Xu, D., Srivastava, M. and Bagrodia, R.: SenQ: a scalable simulation and emulation environment for sensor networks, *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, IPSN '07, ACM, pp.196–205 (2007).
  - 7) Goodin, C., Kala, R., Carrillo, A. and Liu, L.: Sensor modeling for the Virtual Autonomous Navigation Environment, *Sensors, 2009 IEEE*, pp.1588–1592 (2009).
  - 8) *The UrbanSim Simulator*, <http://www.urbansim.org/>.
  - 9) 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).
  - 10) 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).
  - 11) 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, *Technologies for Homeland Security (HST), 2010 IEEE International Conference on*, pp.446–452 (2010).
  - 12) 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, Supplement 1, No.0, pp.348–353 (2008).
  - 13) *ESRI Shape File*, [http://www.esri.com/products/gis\\_data/shape/](http://www.esri.com/products/gis_data/shape/).
  - 14) *PostgreSQL*, <http://www.postgresql.org/>.
  - 15) *PostGIS*, <http://postgis.refractor.net/>.
  - 16) Berq, M.D., Cheong, O., Kreveld, M.V. and Overmars, M.: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, chapter3, Springer-Verlag New York Inc (2008).
  - 17) 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).
  - 18) *Diamor Osaka*. <http://www.diamor.jp/lang/en/>.
  - 19) 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, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/jutsu1/00/03.htm> (2005). (In Japanese).