

1. 研究の背景と目的

これまで、そぞろ歩きのような自由探索行動を表すエージェントモデルとして、スペースシンタックス理論 (以下 SS 理論)¹⁾ により「自然な動き」を模擬すると称する EVACS などが知られていた^{2),3),4)}。

それに対し、何か目的物を探索する行動などは能動的探索行動であると言える。能動的探索行動は、「経路探索行動」、「目的物探索行動」の2種類に分類できる。ここで、今日の「デパ地下状況 (地下の密集した売り場の中であれこれ迷いながら商品を購入する状況)」等で見られる目的物探索行動について考えると、売り場を巡る効率のため同じ経路を辿ろうとしない反面、メンタルマップの不完全さや記録・想起の不完全さゆえに経路が重複する行動が時折観察される。しかし、このような目的物探索行動を表すモデルについての議論は活発ではない。

本研究では、はじめに最少筆書原則 (できるだけ少ない筆書数で行動すること) と忘却 (人間の記憶の不完全さ) を考慮した能動的探索行動モデルとして考案された Lessened Strokes Exploration Model(以下 LSEM)^{5),6)} をシミュレーション実験によってその特性を確認する。次に、三次元仮想空間システムにおける被験者実験を行い、その際の人の能動的探索行動がいかなる行動ルールをもって行われているのかを分析する。さらに、LSEM と被験者実験より得たデータとの突き合わせを行う。その上で、LSEM が人の行動特性のどのような側面を表しているのかを分析、検討する。

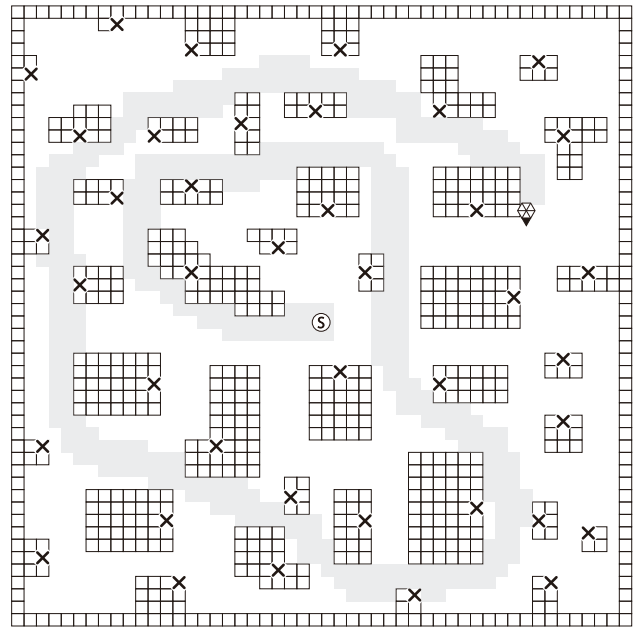
2. 能動的探索行動とそのモデル

2.1 LSEM について

本研究で取り扱う LSEM とは、経路履歴、いわば足跡を歩行平面に「記録」し、可能な限りその足跡を踏むことを避ける、つまり、「筆書数 (stroke)」を最少化しようと振る舞う歩行者モデルである。また、この足跡の消去によって「忘却」を操作的に扱うことが可能になる。図 1 がその実験対象空間である。LSEM は図 2 に示す行動アルゴリズムに従って、候補商品購入数を満たすまで行動する。

2.2 LSEM の行動原理とその特徴

LSEM の行動原理を詳説する。まず、細密グリッドとして表現された空間上に、ある進行方向を向いたエージェントを考える。エージェントは進行方向を中心に等角度に「分割単位領域 (扇形状に区分された領域)」で構成された視野を持つ。「分割単位領域」にお



⑤ スタート位置 ▲ エージェント/被験者(▲は進行方向)
 田 棚(N=40) X 商品(N=40) 足跡(経路履歴)

図 1 能動的探索行動実験のための対象空間

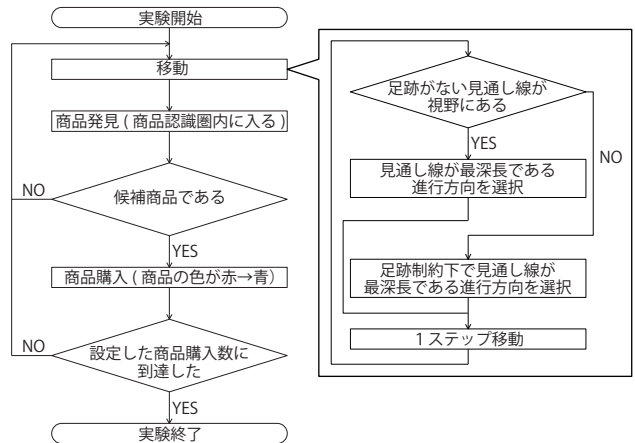
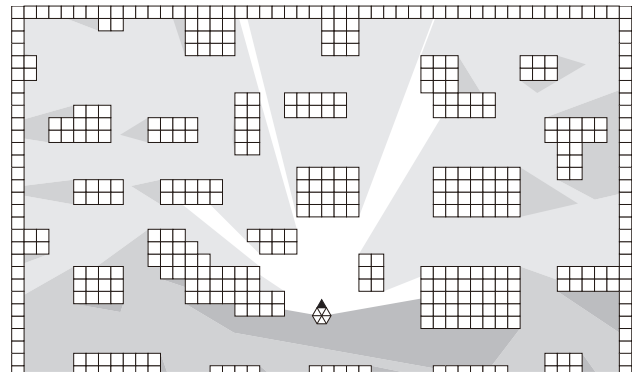


図 2 LSEM(Lessened Strokes Exploration Model) の行動アルゴリズム



▲ エージェント(▲は進行方向) 田 棚
 □ VSD=1 □ VSD=2 □ VSD=3 □ VSD=4

図 3 スペースシンタックス理論における Visual Step Depth の説明図

ける各々の方向は進行方向を変更する際の候補となる。柵や壁までの直線距離、すなわち見通し線（分割単位領域）が最深長である方向を一つ選択し、一時間ステップあたり一歩進行する。これを繰り返す。このとき、見通し線の候補集合は、SS理論の Visibility Graph Analysis における Visual Step Depth(以下 VSD) が1で構成する領域、すなわち Isovist と等しい。VSD が2や3の場合に拡張することも考えることができ、その際には、見通し線の長さは、長さの総和に置き換えられる(図3)。

さて、LSEM においてエージェントが一歩進行する際に「足跡」を歩行平面に記録する。候補方向を検討する際に見通し線を遮る「足跡」の有無によって、辞書式順序を設ける。これを足跡制約と呼ぶが、この制約は壁や柵の制約より弱い(優先順位が低い)点に注意されたい。すなわち、まず「足跡」にかからない見通し線を候補とし、方向を選択することにし、この候補がない場合にのみ「足跡」にかかる見通し線を候補として、最深長原則によって進行方向を選択する。(図4) なお、「足跡」は、十分に狭い通路を通過した印として、進行方向の真後ろから左右45度にかかる歩行者大のタイル3つを歩行平面に記録する。

2.3 足跡制約を導入した LSEMver.1

LSEM について最初に、足跡制約を導入した LSEMver.1 とそうでないモデルとの比較を行い、足跡制約の効果を示す。このシミュレーションは、図1において空間内に40ヶ所設けられた商品のうち30ヶ所の商品に接近した時点でシミュレーションを終了するものである。ここでは、歩行ステップ数と足跡が重複したタイル数(以下重複タイル数)の二つの指標に着目する。前者は足跡(経路履歴)の記録による能動的探索行動の効率化の効果を、後者は「最少筆書原則」からの逸脱の程度を表している。表1に足跡制約の有無の比較結果を示す。なお、各行には、VSDを1,2,3とした際のケースを示す。各ケースともシミュレーションを50回試行し、歩行ステップ数と重複タイル数の平均値と標準偏差を示した。

すべての比較において足跡制約の導入により歩行ステップ数、重複タイル数の双方の劇的な短縮が確認された。また、双方の指標の相関は高く、ともに歩行行動の冗長性を示していることも確認した。これらのことは、足跡制約を導入した LSEM が自由探索行動よりもむしろ能動的探索行動のモデルとして好適な性質を備えていることを示唆している。

また、VSDの違いをみると、足跡制約を導入した場合には VSD が2の場合に最も歩行が効率的で、他方、足跡制約を導入しない際には、VSD が、3,1,2の順に歩行が効率的であることが明らかになっている。

被験者実験データと突き合わせることで、その

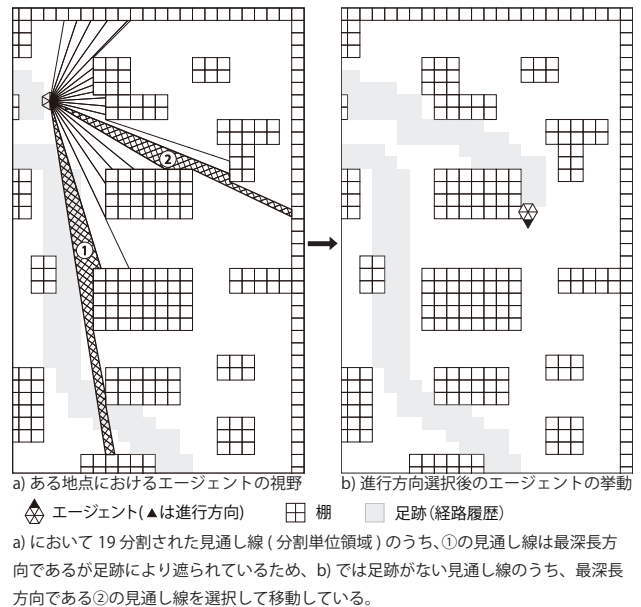


図4 足跡制約による進行方向選択

表1 足跡制約による歩行行動の冗長性

		足跡制約なし		足跡制約あり	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
Visual Step Depth=1	歩行ステップ数	1890.32	1112.34	352.12	132.12
	重複タイル数	4563.84	3180.43	227.74	241.22
Visual Step Depth=2	歩行ステップ数	5747.96	3515.03	275.52	43.64
	重複タイル数	15931.28	10339.78	92.82	43.77
Visual Step Depth=3	歩行ステップ数	775.40	326.38	279.12	37.38
	重複タイル数	1365.94	849.43	99.70	42.78

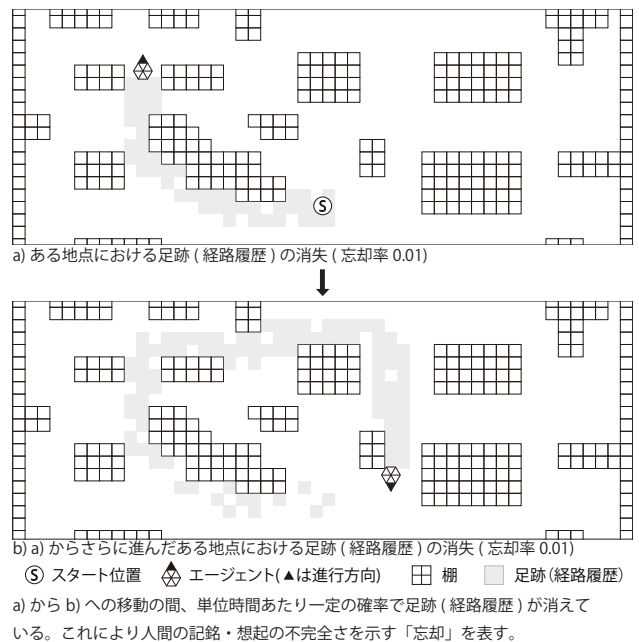


図5 足跡(経路履歴)の消失による忘却の説明図

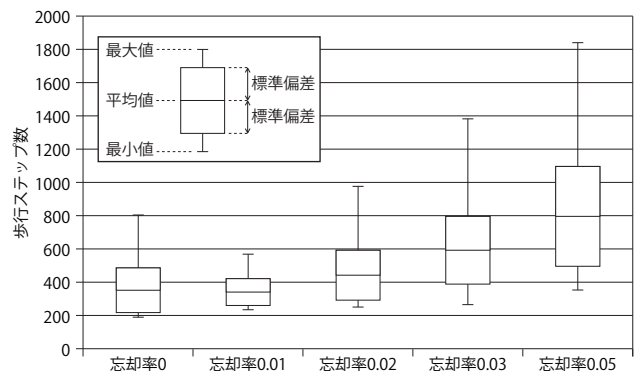


図6 忘却率と歩行行動の冗長性

行動が LSEM のどの VSD のケースに適合しているかを選択することが原理的に可能になった。

2.4 忘却を導入した LSEMver.2

本節では、エージェントの通過経路上に記録される足跡（経路履歴）を単位時間あたり一定の確率で消去することで「忘却」を導入した LSEMver.2 についてシミュレーション分析を行うことにより、モデルの性質について検討する（図 5）。

空間が未知な場合の探索行動を検討するために VSD を 1 とし、忘却率が 0,0.01,0.02,0.03,0.05 の 5 ケースを対象に行ったシミュレーション結果を図 6 に示す。終了条件は前節と同じとした。ここで冗長性の指標として歩行ステップ数に着目すると、忘却率に対して単調増加の傾向にあることが明らかになっている。また、LSEMver.2 において忘却率が十分大きい（足跡が記録されない）場合、能動的探索行動のみならず自由探索行動を含むモデルであると言える。

3. 三次元仮想空間における被験者実験

3.1 三次元仮想空間の作成とその特徴

LSEM シミュレーションにおけるエージェントの歩行行動と三次元仮想空間における行動の双方のデータを突き合わせるため、3D デザインツールである StoneyDesigner と SketchUp の両ソフトで仮想空間を作成した。柵と商品は、比較のため LSEM と同数同配置とした（図 1）。

図 7 に実験システムのフローチャートを示す。実験画面には 2D マップと 3D マップがあり、被験者には 3D マップのみ見えている。そして、被験者が仮想空間内をキーボードの E(前進)、S(左回転)、D(右回転)、X(後退) の 4 つのキーを使用して歩行者 (LSEM のエージェントに該当する) を行動させることで、2D マップに LSEM 同様の足跡記録がなされる。分析のため、実験の終了と同時に歩行記録、足跡記録、CSV ファイル（時間ステップ数、時間ステップ数ごとの座標、重複タイル数）を保存することとした。

3.2 三次元仮想空間被験者実験の概要

被験者 25 名による図 1 の仮想空間での被験者実験を行った。歩行者が商品認識圏内に侵入することで、赤い球体の出現と同時に商品値が表示されるため、被験者はその都度候補商品か否かの判定をする（図 8）。実験終了条件は、候補商品 5 個のうち 3 個を見つけた時点とした（図 7）。

4. 三次元仮想空間被験者実験と LSEM シミュレーションの結果の突き合わせによる検討

4.1 三次元仮想空間被験者実験にみる最適な忘却率の検討

この節では、忘却率が 0 である LSEM シミュレーション（以下忘却率 0 ケース）が被験者実験データに近い傾向を示しているかを検証する。なお、被験者実験は

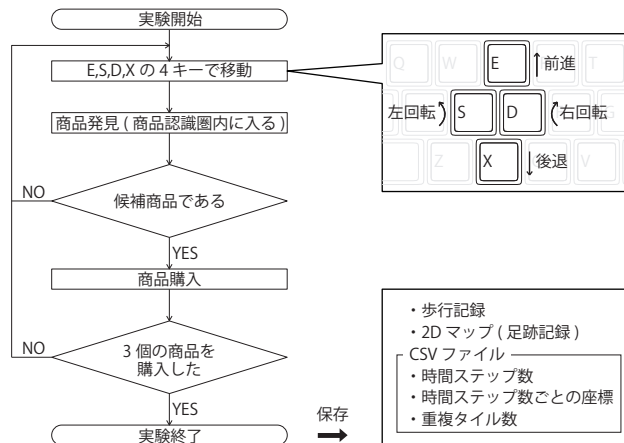


図 7 三次元仮想空間被験者実験システムのフローチャート

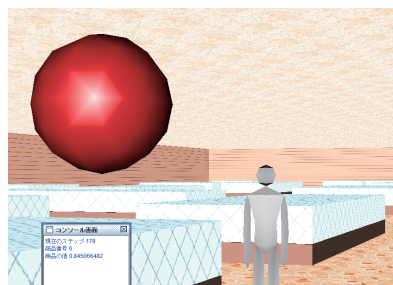


図 8 三次元仮想空間被験者実験における商品発見時の画面例

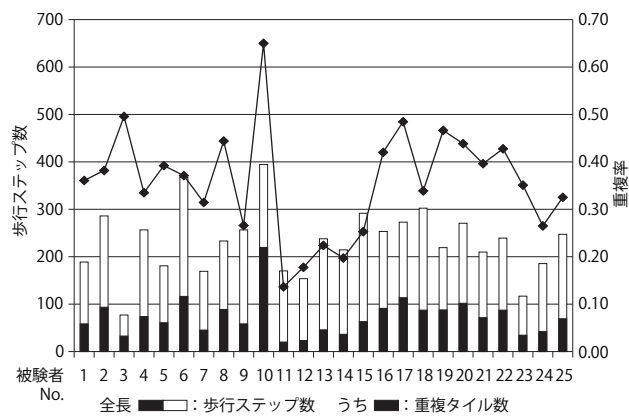


図 9 三次元仮想空間被験者実験における重複率（重複タイル数 / 歩行ステップ数）

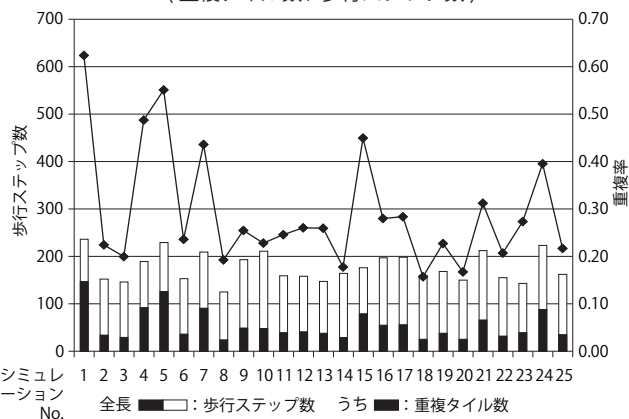


図 10 LSEM シミュレーション (忘却率 0 ケース) における重複率（重複タイル数 / 歩行ステップ数）

表 2 重複率の平均値の差の検定

	平均値 (標準偏差)	検定結果
三次元仮想空間被験者実験 (N=25)	0.305 (0.096)	p=0.712 (有意差10%で認められず。)
LSEMシミュレーション (忘却率0ケース, N=25)	0.293 (0.122)	

メンタルマップ皆無状況下であるため、忘却率 0 ケースの VSD は 1 とした。図 9 に被験者実験、図 10 に忘却率 0 ケースの測定結果を示す。忘却率 0 ケースに比べ、被験者実験の方が歩行ステップ数、重複タイル数ともにばらつきが大きいことが読み取れる。そこで、重複タイル数を歩行ステップ数で除したものを重複率、すなわち、どれだけ同じ経路を辿ったかの指標として、被験者実験と忘却率 0 ケースを平均値の差の検定を行ったものが表 2 である。平均値は被験者実験 (0.305)、忘却率 0 ケース (0.293)、標準偏差は被験者実験 (0.096)、忘却率 0 ケース (0.122) で双方の差は縮まり、有意水準 10% で差が認められなかった。この結果は忘却率 0 ケースが被験者実験で得たデータの傾向に近いと考えてよい。

4.2 足跡制約の当てはまりの検証

LSEM に導入した足跡制約の有効性を検証するために、被験者実験から得たデータを用いて、10 歩行ステップごとに座標をプロットし、進行方向選択の行動ルール抽出を試みた。図 11 に行動ルール抽出の順序を示す。各プロット点における進行方向選択は、足跡制約を踏まえた最深長方向である①「足跡制約型最深長方向」、足跡制約を無視し、足跡を横断するような最深長方向である②「非足跡制約型最深長方向」、そのどちらでもない③「その他」、の 3 項目に分類した。図 12 に行動ルール抽出のための分類例を示す。集計した結果が表 3、図 13 である。計 482 の観測地点のうち、足跡制約型最深長方向の選択が最も多く (343 地点 (71.16%))、次いで、その他 (102 地点 (21.16%))、非足跡制約型最深長方向 (37 地点 (7.68%)) となっている。これは、LSEM における足跡制約の有効性を支持していると考えられる。

5. 結論

本研究では、「足跡制約」を用いることによって、「最少筆書き」を試みる能動的探索行動モデル LSEM の特性を確認後、三次元仮想空間における被験者実験のデータとの突き合わせを行い、LSEM が人の行動のいかなる側面を表しているかを検証した。得られた知見を以下に示す。

1) 足跡制約を導入した LSEMver.1 は、既存の自由探索行動と比べてはるかに効率的な結果であることから、足跡制約が能動的探索行動における「目的物探索行動」のモデルに有効な行動ルールであることを確認した。2) 足跡 (経路履歴) の消失によって「忘却」を導入した LSEMver.2 のシミュレーションによれば、冗長性の指標である歩行ステップ数が忘却率に対して単調増加することが明らかになった。また、忘却率が十分に大きい場合、LSEMver.2 は自由探索行動を表現可能なモデルであると言える。3) 仮想空間における被験者実験に関しては、LSEM (忘

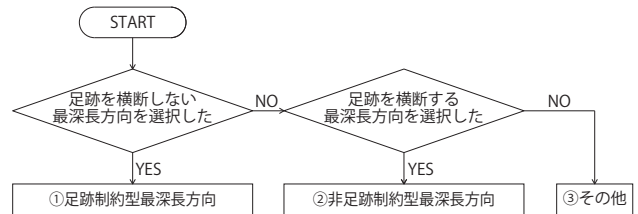


図 11 三次元仮想空間被験者実験における進行方向選択の行動ルール抽出

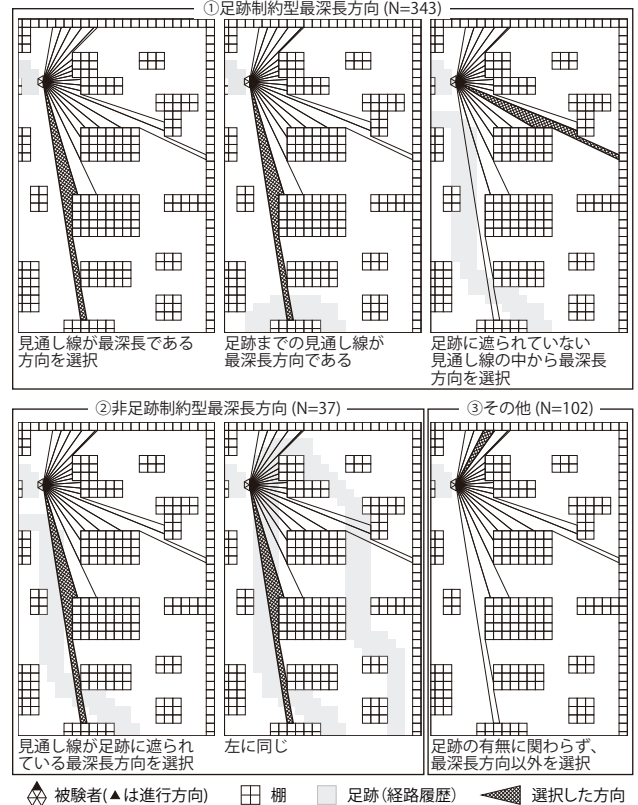


図 12 進行方向選択の行動ルール抽出のための分類例

表 3 10 歩行ステップごとの抽出した行動ルールの各回数

	該当する方向の 選択回数 (回)	一人あたりの 平均回数 (回)
①足跡制約型最深長方向	343	13.72
②非足跡制約型最深長方向	37	1.48
③その他	102	4.08
計	482	19.28

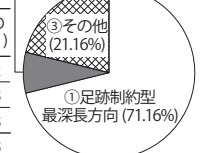


図 13 進行方向選択における抽出した行動ルールの割合

却率 0 ケース) は近い傾向を 4) 被験者実験において、10 歩行ステップごとの進行方向選択をカウントすると 7 割を超える地点において足跡制約型最深長方向の選択が多く、LSEM における足跡制約という行動ルールの有効性が示唆された。

以上のことから、LSEM が自由探索行動とは異なる、「目的物探索行動」を表す能動的探索行動モデルとして有効な特性を持っていることが明らかになった。

【参考文献】

1) Hillier B. and Hanson J., The Social Logic of Space, Cambridge University Press 1984
 2) Penn A. and Turner A., Space Syntax based Agent Simulation, in Schreckenberg, M., & Sharma, S. (eds), Pedestrian and Evacuation Dynamics 2001, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 99-114
 3) Turner A. and Penn A., Encoding natural movement as an agent-based system: an investigation into human pedestrian behaviour in the built environment, Environment and Planning B: Planning and Design 2002, volume 29, pages 473-490
 4) Penn A. and Turner A., A system and method for intelligent modelling of public spaces, Patent Application GB0020850.4, UK Patent Office 2004
 5) Toshiyuki K., Kohei O. and Masaki T., Modeling and Simulation of Proactive Exploration Behaviors with Imperfect Recall, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014
 6) 兼田敏之, 自律エージェントの能動的探索行動シミュレーションシステム, 国際特許分類 G06Q 10/00, 日本特許庁 2014