屋内環境モデル化と柔軟な歩行経路生成手法

町田　直哉[†1]　　柳澤　政生[†1]　　戸川　望[†1]

現在，移動通信網の発展や計算機の小型化・高性能化により携帯通信サービスが急激に成長している．しかしながら屋内環境における歩行者向けナビゲーションというのは位置追跡システムが難しい点や屋外環境と異なり道路ネットワークが存在しない点が問題となり停滞している．本稿では屋内空間を対象とした歩行者ナビゲーションシステムに関するモデル化手法を示し，それを用いた柔軟な歩行経路生成手法を示す．屋内空間の障害物に対し各頂点をノードとし各ノードから障害物を挟まない可視枝をリンクとしたモデルを構成し Dijkstra 法を用い探索を行う．提案手法の有効性を示すため 8 種類のシミュレーション実験を実施し柔軟な歩行経路生成を示す．

Indoor Modeling for Pedestrian Navigation and its Route Searching Alogrithm Based on Individual Prefrences

Naoya MACHIDA,[†1] Masao YANAGISAWA[†1] and Nozomu TOGAWA [†1]

Mobile communication services rapidly grow up due to mobile communication network development and downsized mobile devices these days. However such kinds of services are available only for outdoor environment, since it is difficult to trace positions in indoor environment. Moreover there exist few research works to automatically model indoor environments. In this paper we first propose a method to automatically model indoor environments, making use of visibility graphs. In our indoor modeling, the nodes are composed of obstruct vertices and the visible links are designed such that there are no obstructs between nodes. Based on this modeling, we secondly propose a route searching algorithm which satisfies individual preferences. In order to show the effectiveness of our proposed modeling and algorithm, we carry out eight types of simulation and indicate that we obtain optimal routes for indoor navigation.

1. はじめに

近年，移動通信網の発展や計算機の小型化・高性能化により携帯通信サービスが急激に成長している．携帯電話の多くは GPS(Global Positioning System) を搭載しており GPS を利用したサービスが発展し未知な場所において周りの情報を得るための現在地を示す地図表示や，目的地への移動を補佐する歩行者ナビゲーションシステムを利用することができる．例えば KDDI が「ez ナビウォーク」[17] という歩行者向けのナビゲーションサービスを行っている．しかしながらこのような携帯通信サービスで展開されている対象は屋外環境が主である．

屋内環境である大きな駅などではバリアフリーを目的としエレベータを後から改装するなどしたため複雑になっており，歩行者は屋内環境で迷ってしまうことが多々あり，屋内歩行者ナビゲーションシステムの必要性は高まっている．しかしながら屋内環境における歩行者向けナビゲーションは位置追跡が難しい点や屋外環境と異なり道路ネットワークが存在しない点が問題となり停滞している．

ある出発地点からある目的地までのナビゲーション手順は大きく分けて以下の 3 つの工程から確立される．

(1) ユーザの位置情報取得

(2) 経路検索

(3) 経路及び案内表示

(1) のユーザの位置情報取得の主流となっている手法は GPS 衛星を利用するものであるが，衛星からの電波を受信する際，信号が遮断される場所においてはこの手法は利用できず，GPS 信号が遮断されやすい地下街や屋内の経路探索サービスにおいて実現化されていない．屋内環境のユーザの位置情報の取得では RFID を利用する研究[8)11)] や無線 LAN を利用する研究[3)9)] など様々なされている．(2) の経路探索では屋外空間を対象とした道路ネットワーク[14)15)] を利用した研究が数多く行われている[7)13)]．一方屋内環境における経路探索手法，空間のモデル化の研究例[6)12)] は少ない．(3) の経路及び案内表示では屋内空間特有の階層構造を表現する研究[4)] が行われている．

上記 (1)〜(3) のうち著者は (2) の経路探索に着目し，その中でも，研究例が少なく，発

†1 早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報理工学専攻
Department of Computer Science and Engineering, Waseda University

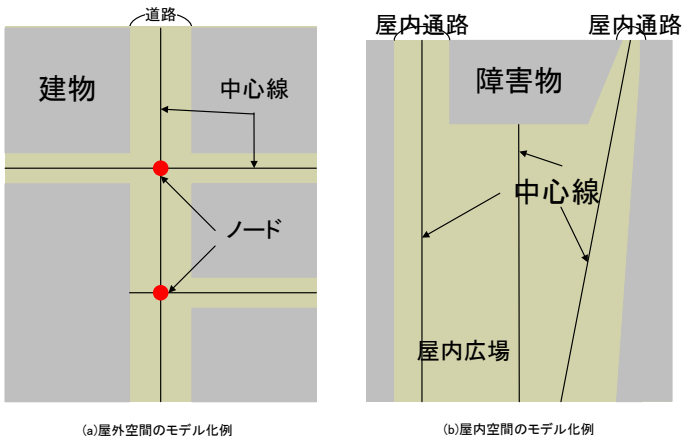

図 1　屋内空間と屋外空間の差異.

展性のある屋内空間を対象とした経路探索に注力する. 屋外空間で用いられているモデル化手法は道路ネットワークを利用し，図 1 のように道路の中心線をリンクで表し，中心線同士の交点をノードとして表している. しかし，屋内空間では広場など，中心線を引くことが不可能なケースが存在することから屋外空間で用いられているモデル化手法は適用できない. モデル化を手動で行う場合，ノードとリンクをどのように設置すれば経路探索に適したモデルとなるか考えるのは手間が大きく，また，多数の屋内空間に対して手動でモデル化を行うのは現実的ではない. そのため計算機によりモデル化を自動で行う必要がある. 著者の知る限り屋内空間の自動モデル化に関する研究は少なく文献[6),12)] のみである. 文献[6)] において，ナビゲーションを可能にするため空間を可視多角形に分割する手法を取り上げているが，これは複雑な構造をもつ駅や百貨店といった多様な屋内空間を網羅できるものではなく自動にモデル化を行うことが難しい. また文献[12)] ではラスターマップに対し画像処理で自動にモデルを生成することができるが，メッシュ構造のモデルを構成しており，このモデルに対し経路探索を行うと角ばった経路がお導出されるため歩行しやすい経路にするため平滑化しなければならないが，計算時間に問題が残る. また，階層という概念を考えておらず画像処理でラスターマップの画素情報のみで判断するため歩行者の嗜好を反映させることが難しい.

本稿では屋内空間を対象とした歩行者ナビゲーションシステムのための屋内空間の自動モデル化手法を提案し，それを用いた柔軟な歩行経路生成手法を提案する. 自動モデル化手法は可視グラフを利用したノードとリンク構造を利用し，歩行経路生成手法はユーザからの入力パラメータを元に Dijkstra 演算の重みづけを変動させることで実現する. 8 種類のシミュレーション実験を実施し，ユーザにとって最適な経路を出力し，本研究の有効性を示す.

2. 屋内空間を対象としたナビゲーションシステム

屋内空間を対象としたナビゲーションシステムは図 2 のように事前準備のフェーズと運営中のフェーズが存在し，事前準備のフェーズにおいて屋内空間をモデル化し，運営中フェーズにおいて経路探索を行う[19)]. また，システムは運営者とユーザによって利用され，運営者側でモデル化と経路探索を行い，ユーザは目的地等のパラメータを入力し経路表示を結果として得る. 図 2(1) ファイル群生成ではラスター形式の画像の座標位置あるいは CAD データを空間の入力マップとして参照し，モデル化に必要なファイル群を生成する. 図 2(2) モデル化においてはファイル群から経路探索可能な空間のモデル化を行う. 図 2(3) 経路探索ではモデル化された空間に対しユーザからのパラメータに適した経路を探索する.

本稿では (2) モデル化と (3) 経路探索を扱い，(2) モデル化において生成されたファイル群からノード設置処理とリンク設置処理を行い自動モデル化を行い，(3) 経路探索においてユーザからの目的地点等のパラメータを元に Dijkstra 法を用いた演算により経路探索を行う.

3. 可視グラフを用いた屋内空間の自動モデル化

屋外空間を対象とした歩行者ナビゲーションシステムでの一般的なモデル化は道路ネットワークを利用したものであるが，屋内空間では同様に扱えず，独自のモデル化を必要とする. 屋内空間をモデル化する際に以下の 3 点に注意しなければいけない.

(1) 広場　屋内空間には屋外空間と異なり一方に長い道以外にも開けた空間である広場が存在する. 広場は道路ネットワークのようにモデル化することはできない.

(2) ドア・改札　屋内空間にはドアや改札などのように通行可能か可変であるものが存在する.

(3) 階層　屋内空間には階層があり，階層間を移動する手段として階段，エスカレータ，エレベータなどがある. 階層間を移動する手段をどのように選択するかはユーザの嗜好による.

さて，ここでロボットが空間を走行する経路を生成する手法として可視グラフを利用する研究[5)] がなされている. 歩行者の歩行経路とロボットの走行経路に差異は見られない. そこ

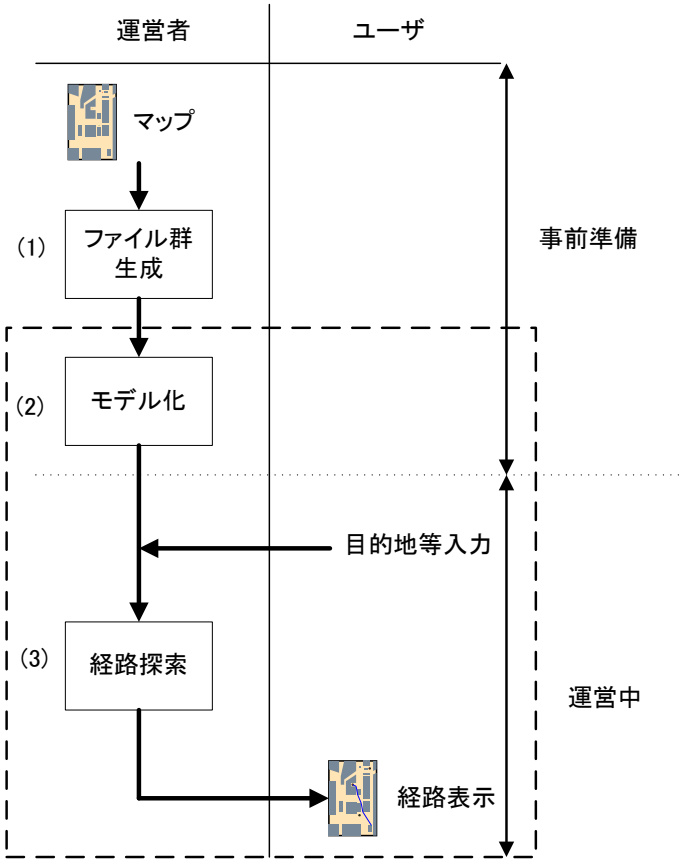

図 2　屋内空間を対象としたナビゲーションシステム.

で，屋内空間のモデルとして屋内空間の障害物に対し各頂点をノードとし各ノードから障害物を挟まない可視枝をリンクとした可視グラフを利用したモデルを提案する．このモデルを利用することで以上の 3 点を考慮できる．

(1) 広場　可視グラフを利用することで広場に対してもリンクを引くことが可能になる．

(2) ドア・改札　ドア・改札に関しては，ユーザが通過できないものはそれを障害物と見なし，通過可能であれば通路と見なす. 通過できるかどうかが一定でないものに関しては特別なリンクとして扱うことにより考慮できる．

(3) 階層　ユーザの嗜好に沿うように経路を選択可能にするため Dijkstra 演算にユーザからのパラメータを反映させる. また，可視枝のリンクとは別の特殊なノードとリンクとして定義することにより考慮できる．

3.1 節では屋内空間のモデルのノード設置手法，3.2 節では屋内空間のモデルのリンク設置手法を提案する．

3.1　ノード設置手法

ノード設置手法は店など歩行者が歩行できない空間である障害物の情報をもとに実行される．その際，屋内空間は多くの場合，曲線からではなくて直線で構成されており，曲線で構成されている障害物については直線に近似し全て直線で扱うものとする．まず，空間内にある障害物を構成している直線分同士が交わる点にノードを設置することを考える．ところが図 3 のように障害物の頂点をノードとした障害物ノードを結んだ障害物枠は障害物に接し歩行経路として不適切になる. そこで各頂点位置から距離 d 外側へずらした位置にノードを定める．各障害物ごとにノードを設置した例を図 4 に示す．

屋内空間には階層があり各階層を結ぶオブジェクトとして階段・エスカレータ・エレベータが存在し，各階層を結ぶオブジェクトに対し別途階層ノードを用意する．階段，エスカレータ，エレベータが存在するマップに対し階層ノードのみを設置した例を図 5 に示す．図 5 においてピンクのノードが階段，オレンジのノードがエスカレータ，緑のノードがエレベータを表す．

3.2　リンク設置手法

ノード情報をもとに同階層のノード同士が障害物に衝突せず結ぶことができる場合，そのノード間にリンクを設置する. つまりノード間に可視枝が引くことができる場合のみそれをリンクとする．可視多角問題に対する平面走査法[2] を応用して自動化することが可能である．

図 6 は平面走査法を応用し起点ノードから残りのノードへ可視枝が引けるかを判定するものである．起点ノード S と残り n 個のノードの集合 C において可視枝を判定することを考える．起点ノード S から図 6(a) のように走査線を 360 度回転させ他ノード C_i の線分が障害物と交点を持たないか判定してゆく．図 6(b) において，線分 SC_1 は障害物と交点を持つので可視枝ではない，一方図 6(c) において線分 SC_2 は障害物と交点を持たないので可視枝として判定する．走査線を 360 度回転させたものつまり起点ノード S と C における可視枝の判定を行ったものが図 6(i) である．この操作を全てのノードを起点ノードに変えて行うことによりリンクを設置することができる．これを図 4 で設置されたノードに対し行いリン

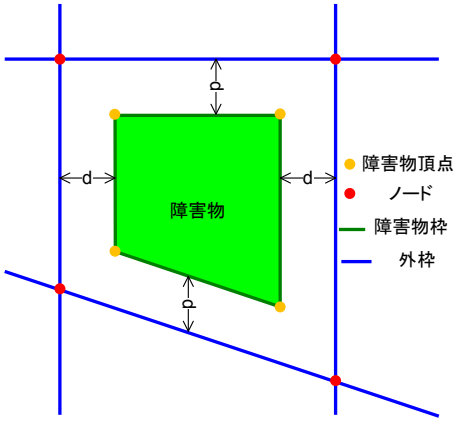

図 3　ノード設置処理.

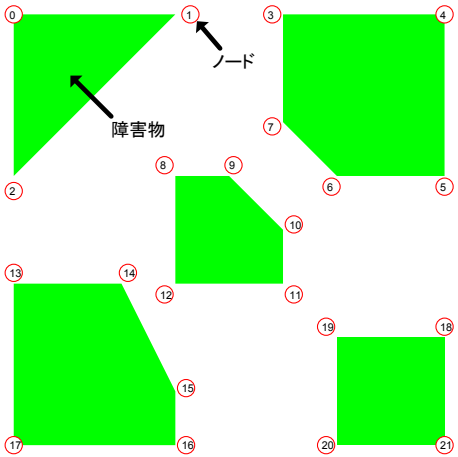

図 4　ノード設置例.

ク設置した結果を図 7 に示す.

1 階と 2 階を結ぶ階段などの階層を跨ぐノード間に対し別途階層リンクを設置する.

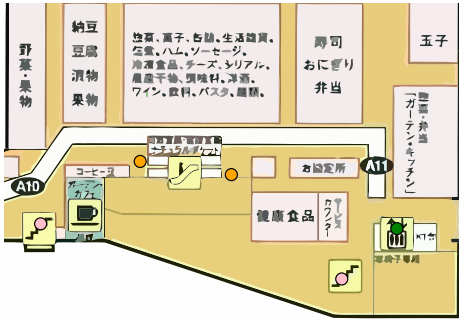

図 5　階層ノード設置例.

4. 経路探索手法

2 点間の最短経路を求めるには Dijkstra 法がよく使われており[18]，本稿でも Dijkstra 法を利用した経路探索を扱う．屋内空間に対しユーザの経路探索の嗜好には，階層移動手段の選択，混雑度に応じた経路探索などがある．本稿では階層移動手段の選択によるユーザの嗜好を反映した経路探索を行う．階層を移動する手段として階段，エスカレータ，エレベータなどが存在し，経路探索を行う際これら階層を移動する手段のうちどれを選ぶかはユーザの嗜好により分かれる．そのためユーザの嗜好を反映させる重みパラメータを導入する．Dijkstra 法による経路探索では階層の移動間の距離を定式化する必要があり，階層移動間距離を仮想経路長とし重みパラメータを反映させ定式化する．例えば，バリアフリー探索経路であれば階層移動にエレベータを利用する経路は仮想経路長は階段を利用する仮想経路長より小さくなるような経路探索を行う．

経路探索手法のアルゴリズムを以下に示す.

Step1 ユーザのパラメータ入力

経路探索を行うための必要なパラメータ値として出発地点，目的地点，探索手法をユーザが入力する.

Step2 Dijkstra 演算処理

設置されたノードとリンクに対し，ユーザの嗜好判断を反映した Dijkstra 法を用いた経路導出する.

Step3 経路表示処理

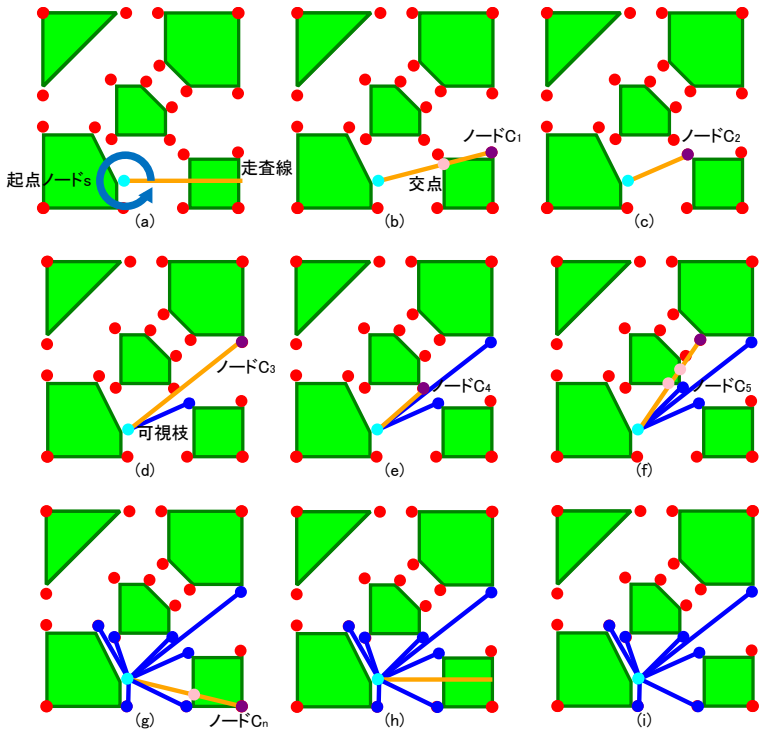

図 6　平面走査法による可視枝判定.

Dijkstra 演算結果を元に経路を示したマップを生成し，ユーザに提示する.

4.1　Step1 ユーザのパラメータ入力

階層移動手段の選択によるユーザの嗜好を反映した経路探索を行うためにユーザから出発地点，目的地点，重みパラメータの 3 つの入力を受け取る必要がある．重みパラメータは歩行者の嗜好を考慮するため，以下の 3 種類を用意した.

(1)　最短経路

(2)　最適経路 (エスカレータ・エレベータ優先)

(3)　バリアフリー (エレベータ優先)

この 3 パターンを元に各リンクに重みづけを行い歩行者の嗜好判断を反映させた経路を導出する.

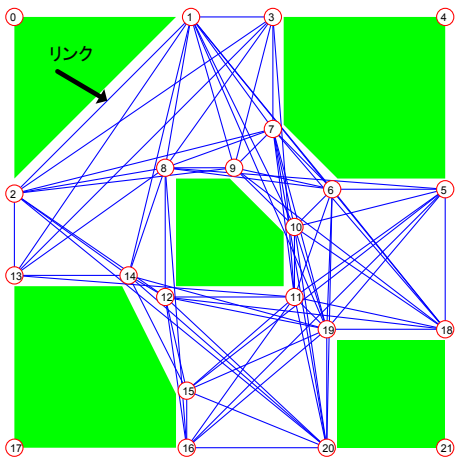

図 7　リンク設置例.

4.2　Step2 Dijkstra 演算処理

Dijkstra 演算処理は Dijkstra 法[1] を用いて最短経路問題を効率的に解く演算処理である.Dijkstra 演算処理のアルゴリズムを以下に示す.

図 8 のようにリンクで結ばれたノードに対し C，S をそれぞれ，候補ノードの集合，すでに選ばれたノードの集合とする．任意の時点で，S は始点ノードからの最短距離が既に知られているのノードを含み，C はそれ以外の全てのノードを含んでいる．初期時点では，図 8(a) のように S は始点ノードだけを含み，図 8(e) のように演算が終了したとき，S はグラフの全てのノードを含んでいる．S に含まれるノードを経由し，始点ノードと結び付く場合始点ノードから他のノードへの経路は特別であるという．各ノードは始点ノードからの特別の経路の最小距離を含んでいる.

まず，図 8(b) のように各ノードが持つ最小距離が最小であるノード 1 を C から選び，それを S に加える．ノード 1 が S に加わったために，ノード 1 を経由する特別な経路を考慮する．ノード 1 が持つ最小距離とノード 1 と各ノードのリンクの重みの和を比較し小さい方に各ノードが持つ最小距離に更新する．更新された値の元，図 8(c) のように C から各ノードが持つ最小距離が最小であるノードを S に加え，同様の作業を図 8(e) のように C が空になるまで繰り返す．C が空になるときが演算が終了したときであり，各ノードが持つ最小距離の値をもつ経路が最短経路である

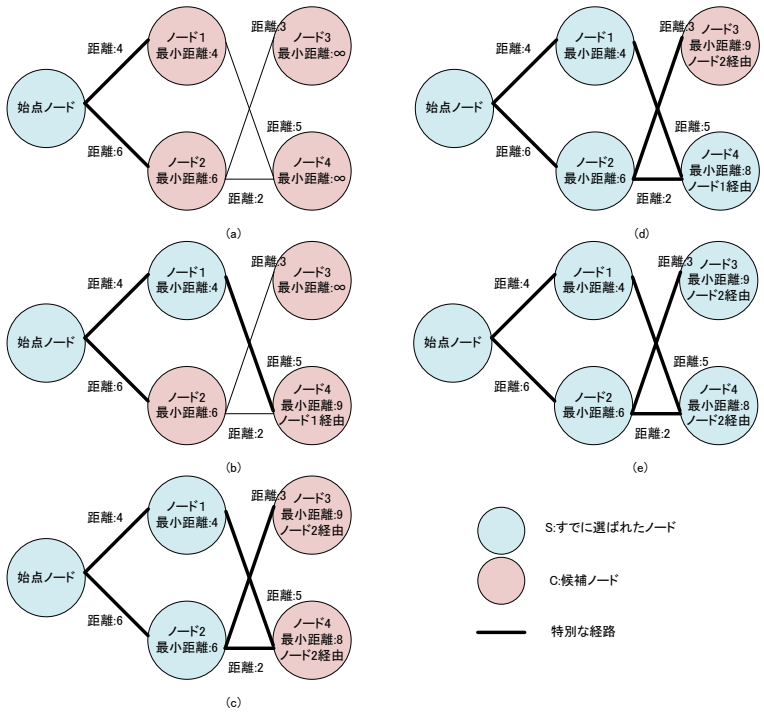

図 8　Dijkstra 法.

この演算を設置したノードとリンクに対し経路を探索する．リンクの重みはノード間の距離を参照するが，階層リンクの場合重みを階層間の階層経路長から求める．

階層間の仮想経路長導出

階層間を移動する際の Dijkstra 演算における全体の仮想経路長 L は式 1 や 2 のように表される．

図 9 経路 1 のように出発地点から階層入口までの距離を s，階層間の仮想経路長を F，階層出口から目的地点までの距離を g とする．

$$L = s + F + g \tag{1}$$

図 9 経路 2 のように階層移動中に別の階層移動手段に切り替える場合は式 2 のように階層出口から次の階層入口までの距離を m を間に加える．

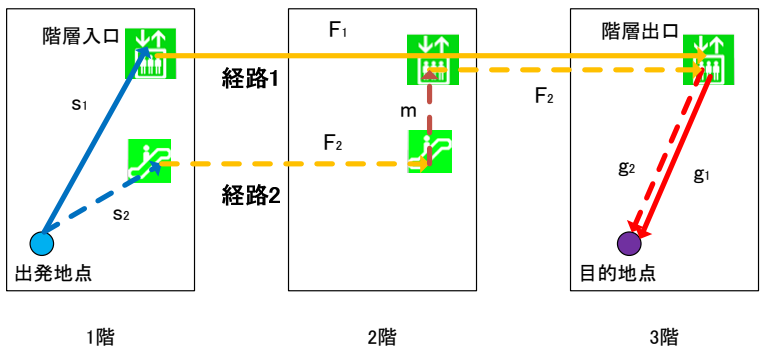

図 9　仮想経路長.

$$L = s + F + m + F' + g \tag{2}$$

階層間を移動する手段として大きく階段，エスカレータ，エレベータが存在し，階層間の仮想経路長 F を移動手段別に定める必要がある．また，歩行者の嗜好を考慮するため，最短経路，最適経路，バリアフリー経路による重みパラメータ α の変化を考慮する必要がある．階層間を結ぶ水平方向の距離を M とする．移動する階層を f とする．

各移動手段ごとにおける仮想経路長の式を以下に示す．

(1) 階　段

階段における仮想経路長は式 3 に定式化する．

$$F = M \times f \times \alpha \tag{3}$$

階段の仮想経路長は移動する階層に比例する．本稿では，最短経路の重みパラメータを $\alpha = 2$，最適経路の重みパラメータを $\alpha = 10$，バリアフリー経路経路の重みパラメータを $\alpha = 100$ と設定する．

(2) エスカレータ

エスカレータにおける仮想経路長は式 4 に定式化する．

$$F = M \times f \times \alpha \tag{4}$$

エスカレータの仮想経路長は移動する階層に比例する．本稿では，最短経路の重みパラメータを $\alpha = 2$，最適経路の重みパラメータを $\alpha = 2$，バリアフリー経路経路の重みパラメータを $\alpha = 10$ と設定する．

(3) エレベータ

エレベータにおける仮想経路長は式 5 に定式化する．

$$F = d + n \times f + W \tag{5}$$

なお，d はドアの開閉時間，n は 1 階層分を移動するのにかかる時間，W は最大待ち時間とする．時間は不動産の表示に関する公正競争規約に従い 1 分=80m と距離換算する．エレベータの仮想経路長は重みパラメータの影響を受けず移動する階層のみによって変化する．

エレベータの待ち時間に関しては文献[10] のような研究が行われているが，エレベータアルゴリズム，建物の構造，各階ごとの利用頻度などを考慮する必要があるが，これらを元にし待ち時間を算出するのは難しいため，本稿では一律 $d = 0, n = 5, W = 80$ とする．よってエレベータの仮想経路長を式 6 のよう定義しなおす．

$$F = 5 \times f + 80 \tag{6}$$

4.3 Step3 経路表示処理

ユーザに対し計算された経路を示すためにはさまざまな方法がある．今回は各階ごとの上観図を用いて SVG 形式[16] で表示する．上観図は真上からの視点で見た地図であり，地図を階層構造で分け，各階ごとに店情報などを多く載せられ，路や交差点形状を忠実に書きやすいという利点がある．

5. 評 価 実 験

自動モデル化手法と歩行経路生成手法の有効性を確認するために仮想屋内を対象にした評価実験と，実在する屋内空間を対象とする評価実験を行った．対象とした空間は仮想屋内空間，駅，百貨店，ショッピングモールなどの実在する屋内空間計 8 種類である．これらに対し自動モデル化手法を行い，経路探索を行ったものを表 1 に示す．

乗り換え案内などの最短経路探索では日本全国の駅を対象としノード数は約 9000，リンク数約 28000[18] を用いたモデルが利用されている．このモデルと比較しても可視グラフのノード数，リンク数は膨大な数ではなく，評価実験で最大のリンク数である日本橋三越本店のリンク数は 18744 本で 28000 を下回り，自動モデル化手法の実行時間は実現に耐えうるものである．

評価実験の一部である JR 大宮駅に対しノードリンク設置を行ったものを図 10 に示す．このモデルに対し出発地点を，西口として 6，7 番線を目的地点としたバリアフリー経路探索を行ったものを図 11 に示す．なお，Intel Core2 Duo CPU 上でこの探索を行った結果実行時間は 0.015 秒であった．

評価実験により各空間に対しナビゲーション可能なモデルを自動生成することができた．経路探索においても移動階層に応じて歩行者の嗜好に沿う移動手段を提示することができた．

表 1 モデル化された屋内空間のノード数とリンク数

対象	屋内空間	構造	ノード数	リンク数
	仮想屋内空間	5 階建 $1000 \times 700m^2$	430	3536
駅	JR 大宮駅[20]	2 階層 $140 \times 200m^2$	341	3058
	JR 池袋駅	3 階層 $100 \times 400m^2$	380	3761
	JR 高田馬場駅	3 階層 $50 \times 300m^2$	64	191
百貨店	西武百貨店池袋本店[21]	地下フロア 2 階層分 $50 \times 300m^2$	504	4296
	日本橋三越本店[22]	新館 (12 階層 $60 \times 80m^2$) 本館 (9 階層 $80 \times 100m^2$)	2358	18744
ショッピングモール	コクーン新都心[23]	2 階層 $100 \times 250m^2$	191	1148
	モラージュ菖蒲[24]	3 階層 $80 \times 500m^2$	348	1680

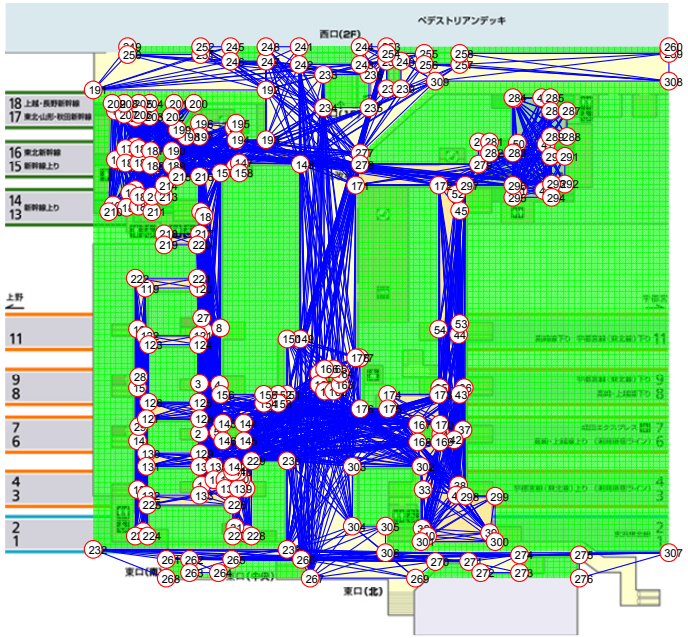

図 10 JR 大宮駅　ノードリンク設置結果．

6. ま と め

屋内空間を対象としたナビゲーションシステムを確立するために，屋内空間の自動モデル

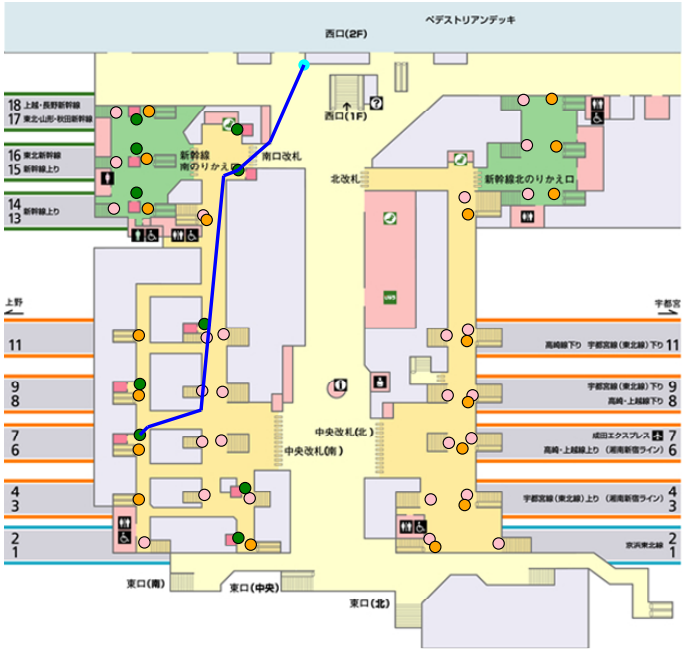

図 11　JR 大宮駅　バリアフリー経路探索結果.

化手法と屋内空間に特化した柔軟な経路探索手法を提案した. 今後の課題としてユーザの現在位置情報取得や経路及び案内表示を検討していく必要がある.

謝　　辞

本研究の一部は，科学研究費補助金 (課題番号 21650238) のもとに実施された.

参　考　文　献

1) E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
2) 浅野孝夫, 今井浩, 計算とアルゴリズム, オーム社, pp. 143–161, 2000.
3) 藤田迪, 佐々木威, 河口信夫, “地下鉄構内の制約条件を利用した無線 LAN 位置推定手法,” 情処研報 2008-UBI-19(27), 2008-USN-37, vol. 2008, no. 66, pp. 153–157, 2008.
4) 廣石敏行, “屋内用歩行者ナビゲーションにおける階層構造表現を用いた経路表示手法,” 早稲田大学 2008 年度修士論文, 2008.
5) J. L. Guzman, M. Berenguel, F. Rodriguez, and S. Dormido, “An interactive tool for mobile robot motion planning,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 56, no. 5, pp. 396–409, 2008.
6) J. Lertlakkhanakul, Y. Li, J. Choi, and S. Bu, “GongPath: development of BIM based indoor pedestrian navigation system,” in *Proc. of 2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, pp. 382–388, 2009.
7) M. Weigel, T. Preuss, J. Brustel, “Generating navigation capable maps from user provided data with woodtracker,” in *Proc. of 2010 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)*, pp. 544–548, 2010.
8) 岡本篤樹, 内田敬, 大藤武彦, 川端荘平, “歩行者ナビゲーションにおける位置特定基盤としての電波タグシステム,” 第 2 回 ITS シンポジウム, 2003.
9) 櫻木伸也，峰野博史，水野忠則, “無線 LAN 環境を想定した屋内向けナビゲーションの検討,” 情処研報 2007-DPS-132, 2007-GN-65, 2007-EIP-37, pp. 13–18, 2007.
10) 島川陽一，“エレベータ待ち時間の確率モデル (待ち行列 (2)),” 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, 1997-09-10, pp. 62–63, 1997.
11) 梶尾一郎，“RFID を利用したユーザ位置検出システム,” 情処研報 00-HI-88, pp. 45–50, 1998.
12) V. Walter, M. Kada, and H. Chen, “Shortest path analyses in raster maps for pedestrian navigation in location based systems,” in *Proc. of International Symposium* on *Geospatial Databases for Sustainable Development*, 2006.
13) 李燕, “地図から詳細な交通ネットワークデータの生成システム”, 土木計画学会研究講演集, vol. 26, 2002.
14) 国土交通省国土地理院, http://www.gsi.go.jp/
15) 財団法人日本地図センター, http://www.jmc.or.jp/
16) ScalableVectorGraphics (SVG), http://www.w3.org/TR/2003/REC-SVG11-20030114/
17) KDDI, http://www.kddi.com/
18) Navitime Japan, http://corporate.navitime.co.jp/
19) Micello, Inc., http://www.micello.com/
20) 東日本旅客鉄道株式会社, http://www.jreast.co.jp/
21) 株式会社西武百貨店, http://www2.seibu.jp/usrinfo/
22) 株式会社三越, http://www.mitsukoshi.co.jp/index.html
23) 片倉工業株式会社, http://www.cocoonweb.jp/
24) モラージュ菖蒲, http://www.mallage.com/shobu/