

歩行通路形状を考慮した可視グラフに基づく 屋内環境ナビゲーションシステム

町田 理^{1,a)} 柳澤 政生¹ 戸川 望^{1,b)} 新田 知之² 進藤 大介² 田中 清貴²

概要: 近年、移動通信網の発展や計算機の小型化・高性能化によりモバイル端末が普及した。これによりGPSを利用し目的地への移動を補佐するナビゲーションも普及している。GPSによる位置測位は屋外では精度が良いが、屋内では極端に悪化する。そのため、屋内で位置情報を用いるサービスは屋外のものに比べて少ない。しかし、空港や駅などの大型の屋内施設上は建物構造が複雑なため、歩行者が目的地へ到着することは容易ではない。その結果、屋内環境向けナビゲーションの研究や商用化が進められている。我々は可視グラフに基づく屋内環境向けナビゲーションシステム VNS (Visibility-graph-based Navigation System) を研究している。可視グラフによるモデル化は屋内空間の広場、階層を考慮した経路探索を可能とする。しかし、可視グラフを用いた経路探索によって得た経路は、廊下などの直線の通路では歪んだ形状となる。本稿では、この問題を解決するために歩行通路形状を考慮したモデル化として、改良可視グラフによるモデル化手法を提案する。改良可視グラフは可視グラフによるモデルと道路ネットワークによるモデルを組み合わせたハイブリッドな地図モデルである。改良可視グラフを VNS へ組み込み、実験の評価結果から提案するシステムの有効性を示す。

キーワード: ナビゲーションシステム, 可視グラフ, 屋内環境, 経路探索, 歩行通路形状

An Indoor Pedestrian Navigation System based on Visibility Graphs Considering Walking Passage Shapes

SATOSHI MACHIDA^{1,a)} MASAO YANAGISAWA¹ NOZOMU TOGAWA^{1,b)} TOMOYUKI NITTA²
DAISUKE SHINDO² KIYOTAKA TANAKA²

Abstract: In recent years, the mobile device has widely spread, where navigation systems have become one of the most popular services. Since indoor environments have become more and more complex, not only outdoor navigation service but indoor navigation service is strongly required. We have been developing an indoor pedestrian navigation system called VNS (Visibility-graph-based Navigation System). VNS based on a visibility graph but they can cause problems when we model a long straight passage such as hallways. In this paper, we propose improved visibility graph for indoor environments and apply it to VNS. Our improved visibility graph combines a visibility graph and road network and effectively model indoor environments. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed system.

Keywords: navigation system, visibility graph, indoor pedestrian, search path, walking passage shape

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電話、タブレット端末が普及し、多くの人が外出

時にこれらモバイル端末を所持するようになった。モバイル端末はGPSや加速度センサを搭載し、これらによりユーザが未知の場所において周りの情報を得るために利用する地図表示や、目的地への移動を補佐するナビゲーションシステムが普及している。これらのサービスで用いられる位置情報はGPSによる位置測位を使ったものが主である。GPSによる位置測位は屋外では精度が良いが、屋内では極端に悪化する。そのため、屋内で位置情報を用いるサービスは屋外のものに比べて少ない。しかし、空港や駅

¹ 早稲田大学

Waseda University

² ゼンリンデータコム

ZENRIN DataCom Co., Ltd.

a) satoshi.machida@togawa.cs.waseda.ac.jp

b) togawa@togawa.cs.waseda.ac.jp

などの大型の施設上では屋内環境での位置情報を必要とするサービスの需要がある。

現在屋内環境向けのナビゲーションは商用化に踏み出し始め、ナビゲーションの構成要素ごとに生じる問題に対してさまざまな研究が行われている。ナビゲーションの構成要素は大きく分けて以下の3項目である。

- (1) 位置測位
- (2) 経路探索
- (3) 経路誘導

(1)の位置測位は屋外空間ではGPS衛星を利用する手法が主流であるが、屋内空間では衛星からの電波を受信する際に信号が遮断される場所が多いため、この手法は利用できない。そこで、屋内環境の位置測位では無線LANを利用する研究[2],[3]やRFIDを利用する研究[5],[6]など様々な研究がなされている。(2)の経路探索は屋外空間では道路ネットワーク[10]を利用した研究[9]が行われている。しかし、屋内空間では道路ネットワークは存在せず、空間のモデル化の研究[1],[7]などが行われているが少ない。(3)の経路誘導は、屋外空間では建物名や交差点をランドマークとして利用できるため、案内文やマップがわかりやすい。しかし、屋内空間ではランドマークが少ないため、それらを表示した際にユーザにとって理解しにくいものとなる。理解しやすい案内文の研究[4]が行われている。

我々はこれら3つのナビゲーションの構成要素を取り入れたトータルなナビゲーションシステムとして屋内環境向けナビゲーションシステムVNS(Visibility-graph-based Navigation System)を研究している[8]。VNSは歩行者に対し屋内環境でモバイル端末を利用して案内することを目的とし、可視グラフによる屋内環境モデルに基づくナビゲーションシステムである。

可視グラフによるモデルは、障害物の頂点をノード、ノード間の可視枝をリンクとするモデルであり、広場や階層といった屋内特有の構造物を考慮した経路探索を可能とする。一方で、歩道や廊下などの通路をモデル化する場合、通路形状とは一致しない歪んだ形状のリンクが設置される。本稿では、この問題を解決する地図モデルとして、改良可視グラフを提案する。改良可視グラフは可視グラフによるモデルと道路ネットワークによるモデルを組み合わせたハイブリッドな地図モデルである。改良可視グラフをVNSへ組み込み、実験の評価結果から提案するシステムの有効性を示す。

2. 可視グラフによるモデル化手法

ナビゲーションシステムでは経路探索を行うために、利用する空間をモデル化する。屋外空間を対象とした歩行者ナビゲーションシステムの一般的なモデル化手法は道路

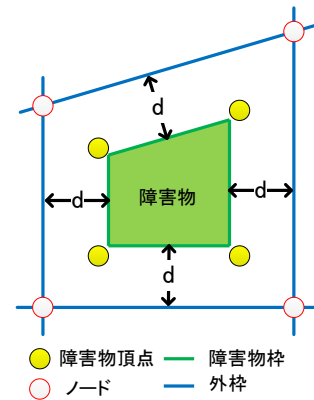


図1 ノードの設置処理。

Fig. 1 Node placement.

ネットワークを利用したもの[9]であるが、屋内空間ではそのネットワークが存在しないため、別のモデル化が必要となる。また、屋内空間をモデル化する場合、屋内特有の構造として開けた空間である広場、通過可能可変であるドアや改札、階層と階段、エスカレータ、エレベータといった階層移動手段を考慮する必要がある。

VNSの屋内空間モデル化では、広場、階層を考慮した経路探索を可能とするため、可視グラフを用いる。可視グラフは屋内空間の障害物に対して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するグラフである。可視グラフによる屋内環境モデル化はノード設置手法とリンク設置手法から成る。

ノード設置手法

店舗など歩行者が通行できない空間を障害物とする。曲線で構成される障害物は直線で近似する。そして、屋内空間内にある障害物を構成している直線が交わる点から距離 d だけ離れた位置にノードを設置する。ノードの設置の例を図1に示す。

屋内空間には階層があるため、各階層を結ぶ階段、エスカレータ、エレベータに対して特殊ノードを設置する。

リンク設置手法

ノードの間に障害物に衝突せずに直線を引くことができるとき、それをリンク(可視枝)とする。図2のように可視多角形問題に対する平面走査法を応用して自動化をする。図2(a)のように起点ノードから走査線を360度回転させて他ノードとの直線が交点を持つかを判定する。図2(b)のように障害物と交点を持つ場合は、可視枝にならない。しかし、図2(c)のように障害物と交点を持たない場合は可視枝となる。これをすべてのノードを起点ノードとして走査することでリンクを設置することができる。図2(d)はすべてのノードについてリンクを設置した結果である。

屋内空間には階層があるため、階層間を結ぶノードである特殊ノード間に特殊リンクを設置する。

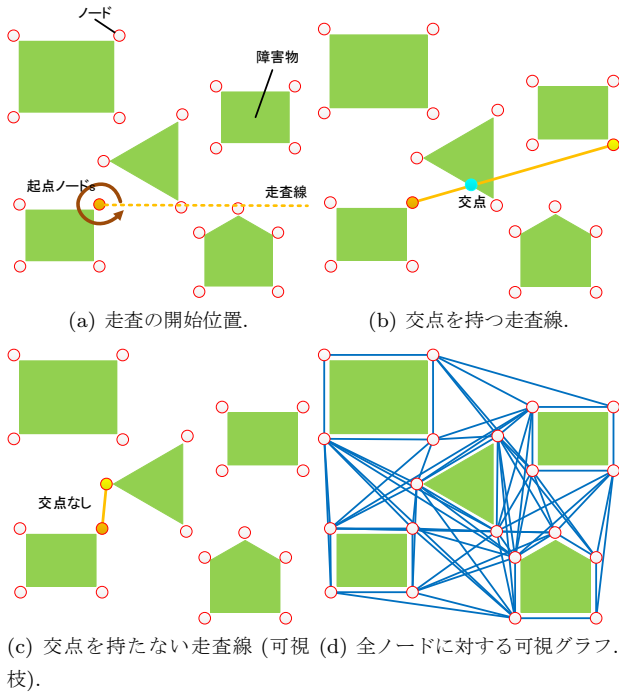


図 2 平面走査法による可視枝判定.
Fig. 2 Visible edge generation by plane sweep.

3. 改良可視グラフ

2章で議論したように、可視グラフによるモデル化は屋内空間の広場、階層を考慮した経路探索を可能とする。可視グラフを用いた経路探索によって得た経路は、地図内の歩行者が通行可能な空間上で最短経路となる。経路誘導の際、マップ上に表示する経路は、廊下などの直線通路では、歪んだ形状となる。例えば、図3(a)のように通路に対して斜めとなる、あるいは、図3(b)のように通路の端に沿った直線となる。このような経路表示では、ユーザが経路と実際の通路の形状との違いに違和感を感じ、経路誤りが生じる可能性がある。

可視グラフによる経路と実際の経路に違いが生じるという問題を解決するために、可視グラフによるモデルを歩行通路形状を考慮したモデルへ改良し、改良可視グラフによるモデル化手法として提案する。

3.1 改良可視グラフによるモデル化手法

改良可視グラフは複雑な屋内空間で経路探索を行うために可視グラフをベースとする。そして、歩行通路形状を考慮したリンクを設置可能とするため、屋外空間で用いられている道路ネットワークを利用したモデル化手法 [9] の処理を組み込む。この手法では、図4(a)のように道路の中心線をリンクで表し、交点をノードとして表す。しかし、図4(b)のように屋内空間には広場など明確な中心線が不明な場所があり、中心線を引くことが不可能なケースが存在する。そこで提案する改良可視グラフでは、道路ネットワークを利用したモデル化手法を空間内の通路部分のみに適用

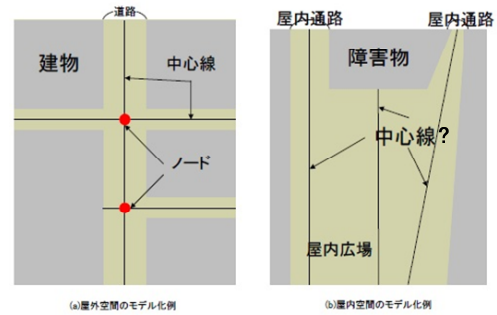


図 4 道路ネットワークを利用したモデル化.
Fig. 4 Modeling using the road network.

し、通路の端となるノードと通路形状となるリンクを新たに設置する。そして、その他の部分について可視グラフによるモデル化を行う。

このように改良可視グラフは可視グラフによるモデルと道路ネットワークによるモデルを組み合わせたモデルである。改良可視グラフによるモデル化は、障害物外周のノードとリンクを事前に用意し、障害物リンクの結合、中心線の設置・延長、ノード設置 (対応付け)、リンク設置からなる。

以下、図5を参照しながら各処理を提案する。

3.2 障害物リンクの結合、中心線の設置・延長

図5(a), (b)のようなグラフから直線通路を検出し、直線通路の交差点や端を決定するために、中心線を設置する。

図5(c)のように、ある障害物外周リンクをその延長線上にある別の障害物外周リンクと結合する。この時、結合したリンクが障害物を挟まないようにする。結合したリンクと結合しなかったリンクのうち、長さ l 以上のリンクを検出する。地図上の直線通路の片側面となる候補を取り出す。

検出した2本のリンク間の距離 (通路幅) が範囲 $[a, b]$ 内であれば、通路となる中心線を引く。中心線は障害物を挟まず、長さ α (最小通路長) 以上でなければならない。中心線の設置例を図5(d)に示す。

図5(e)のように、マップの外枠と障害物に衝突しないように、最長で最大通路幅 b の半分まで中心線の両端点を延長する。中心線を延長することで、交差点や袋小路等を判定する。

3.3 ノード設置

直線通路の範囲や接続を決定し、直線通路の形状に合わせたリンクを設置するため、通常ノード、すなわち障害物外周ノードとは別に3種類のノードを設置する。

2本以上の直線通路が交わる地点を交差点とする。中心線の交点に交差点ノードを設置する。交差点ノードを図5(f)に示す。

直線通路の終端が交差点ではなく、袋小路や広場の場合は端点とする。中心線の延長した部分に交差点ノードを設置できなかった場合、その側の端点を端点ノードとする。端点ノードを図5(g)に示す。

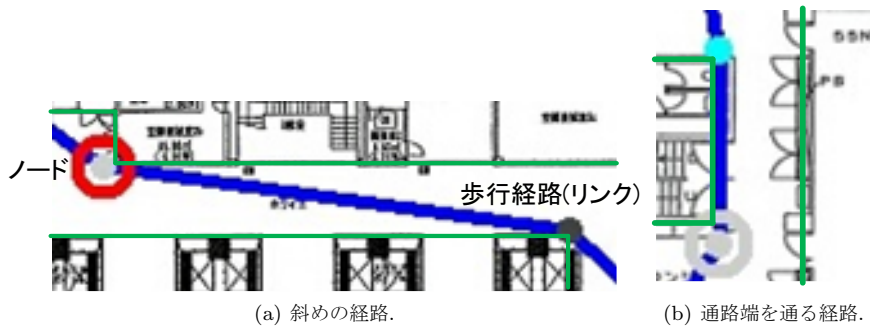


図 3 直線通路での経路表示. 実際の歩行経路と異なり違和感を感じる.
Fig. 3 Linear passage link, which does not match a walking route.

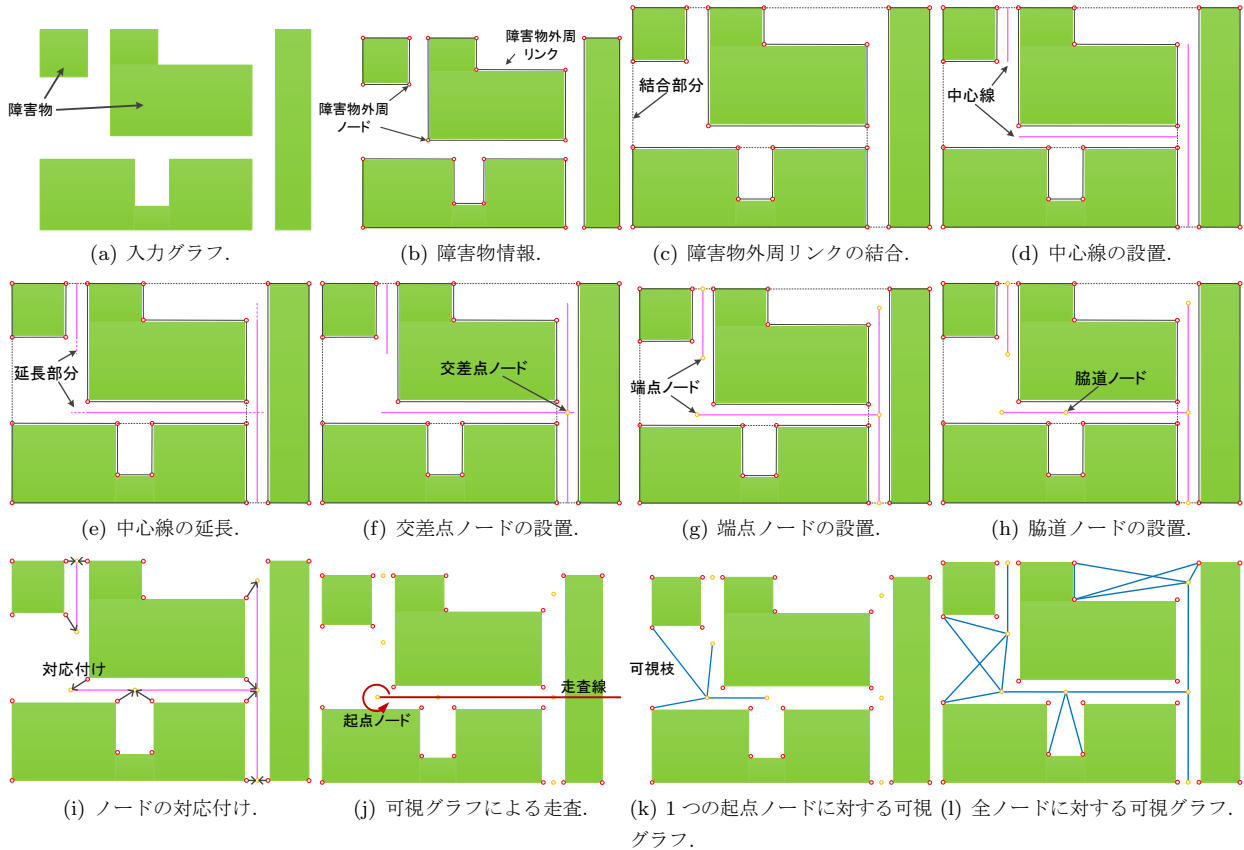


図 5 改良可視グラフによるモデル化手法.
Fig. 5 Modeling method based on improved visibility graph.

また、中心線を生成した両側面のリンクに接する通行可能なエリア (通路と判定しなかった脇道、広場) を探索する。そのエリアから最短距離の中心線上に脇道ノードを設置する。脇道ノードを図 5(h) に示す。

この 3 種類のノードは中心線を生成した両側面のリンク上にあるすべての通常ノードに対応する。図 5(i) のように、通常ノードを設置した 3 種類のノードに対応付ける。対応付けにより、ランドマーク情報が利用可能となり、不要な通常ノードがモデルから除かれる。

3.4 リンク設置

対応付けされた通常ノード以外の全てのノード間にリンクを設置する。リンクは従来の可視グラフのモデル化と同

様に、ノード間で障害物に衝突せず引くことが可能な可視枝であり、以下に示すリンク設置規則を適用する。リンクの設置を図 5(j), 図 5(k) に示す。

最終的に改良可視グラフのモデルは図 5(l) のようになる。

リンク設置規則

改良可視グラフのリンク設置規則を従来の可視グラフと同じように設定した場合、従来のグラフに交差点ノード、端点ノード、脇道ノードが追加されたことにより、歩行通路形状を無視したリンクが引かれる可能性がある。そこで、改良可視グラフによるモデル化用のリンク設置規則を決める。

説明のため、中心線を生成した両側面のリンクに囲まれ

た空間を通路エリアと呼び、通路エリア外周と中心線が交差する2辺を通路出入り口と呼ぶ。また、ノード設置処理によって設置した交差点ノード、端点ノード、脇道ノードを合わせて通路用ノードと呼ぶ。なお、通路エリアに中心線の端点は含まれない。

改良可視グラフによるモデル化のリンク設置規則を端点である2つのノードの組み合わせごとに示す。前提として、リンクは障害物を挟まずに可視枝を引くことが可能である。

通路用ノードと通常ノード間

通路用ノードと通常ノード間は、注目する通路用ノードが属する中心線の通路出入り口とその中心線の通路エリア以外の通路エリアを通過しない場合にリンクを設置する。通常ノードは対応付けの処理により通路エリア内には存在しない。この規則により、通路出入り口側から通路エリアを経由した案内する際には、必ず中心線のリンク上を通る。一方で脇道から通路へのリンクは設置可能であり、通路に接する通路以外のエリアと接続される。

通路用ノードと特殊ノード間

通路用ノードと特殊ノード間は、注目する通路用ノードが属する中心線の通路出入り口とその中心線の通路エリア以外の通路エリアを通過しない場合にリンクを設置する。特殊ノードが通路内にある場合は、歩行通路形状を無視してしまうが、通路内にあるノードから到達可能となる。一方、特殊ノードが通路外にある場合は、通路用ノードと通常ノード間と同様に、脇道以外は1つの中心線から最短な1本のみをリンクとする。

通路用ノード間

通路用ノード間は、同一中心線上にある場合にリンクを設置する。また、同一中心線上ではなく、全ての通路出入り口を通過しない場合にリンクを設置する。同一中心線上の場合は通路形状に合わせたリンクとするため、設置する必要がある。同一中心線上ではなく、通路出入り口を通過しない場合は、異なる通路間や通路と広場間を接続可能とする。また、脇道を経由した通路用ノード間の接続が可能となる。

その他ノード間

通常ノード間、特殊ノード間、通常ノードと特殊ノード間は、すべての通路エリアを通過しない場合にリンクを設置する。

4. 実験評価

改良可視グラフを利用して屋内空間の地図をモデル化する。このモデルを経路探索、経路誘導の地図モデルとしてVNSへ組み込み、屋内空間のナビゲーションの実験を行った。

4.1 実験結果

改良可視グラフのモデル化手法を利用して、早稲田大学

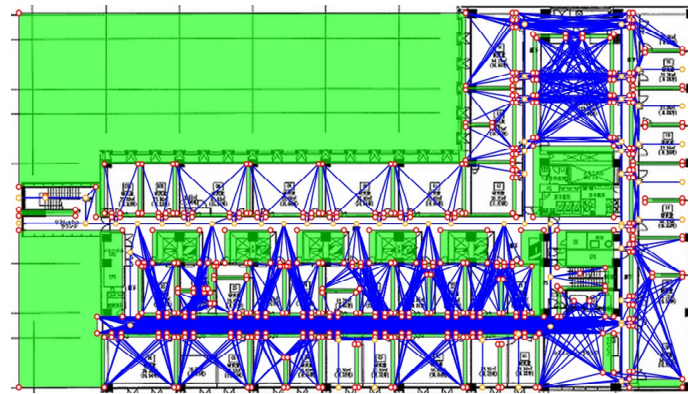


図6 西早稲田キャンパス63号館モデル化結果(7F).

Fig. 6 Modeling results of the Building No.63 in Nishiwaseda Campus (7F).

表1 西早稲田キャンパス63号館ノードリンク数.

Table 1 Number of links and nodes in the Building No.63 in Nishiwaseda Campus.

階層	全ノード	特殊ノード	交差点ノード	端点ノード	脇道ノード	全リンク
1F	150	12	2	11	13	843
2F	125	6	6	11	19	456
3F	162	5	0	4	10	721
4F	404	4	3	25	34	2701
5F	395	4	3	23	32	2760
6F	391	4	3	15	36	2601
7F	420	4	3	29	33	2644
合計	2047	39	20	118	177	12726

表2 手法ごとの西早稲田キャンパス63号館ノードリンク数の比較.

Table 2 Comparison of the number of links and nodes in the Building No.63 in Nishiwaseda Campus of each method.

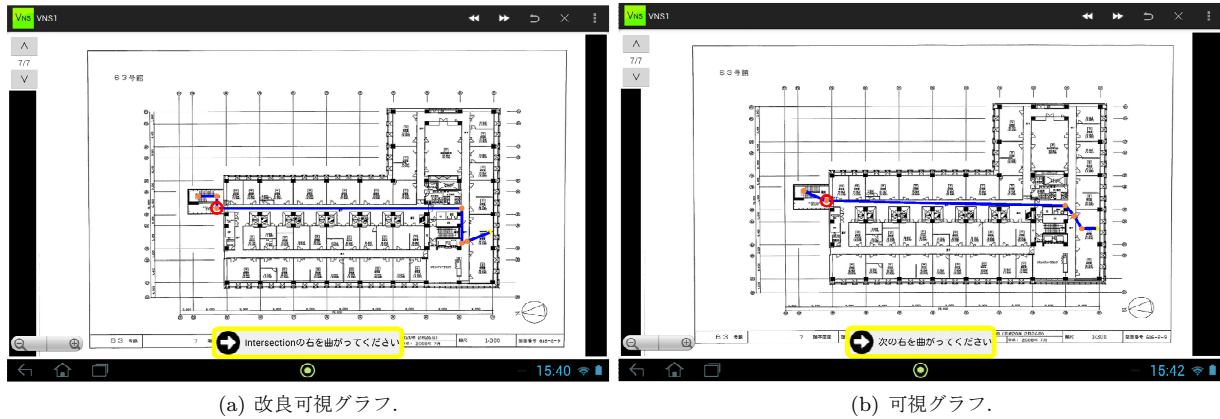
手法	ノード数	リンク数
可視グラフ	2307	29343
改良可視グラフ	2047	12726

西早稲田キャンパス63号館の地上1階から地上7階について、ナビゲーションのためのモデル化を行った。西早稲田キャンパス63号館のモデル化の結果を図6に示し、ノードリンク数を表1に示す。また、可視グラフと改良可視グラフのノード、リンク数の比較を表2に示す。

このモデルをVNSへ実装し、ナビゲーションを行った。西早稲田キャンパス63号館の改良可視グラフを利用したナビゲーションのスクリーンショットを図7(a)に示す。比較のため、可視グラフを利用した同じ経路のナビゲーションのスクリーンショットを図7(b)に示す。

4.2 実装結果考察

図6より、直線通路をその形状に沿った1本のリンクで表した地図モデルとなった。また、交差点により通路同士が接続され、端点により通路が広場や脇道と接続されてい



(a) 改良可視グラフ.

(b) 可視グラフ.

図 7 西早稲田キャンパス 63 号館へのナビゲーション適用結果.

Fig. 7 Result of applying to the navigation system in the Building No.63 in Nishiwaseda Campus.

る。直線通路を経由する経路はすべて歩行通路形状に合わせた形となる。図 7(a) より、改良可視グラフを利用したナビゲーションができています。案内誘導時に通路内の経路は歩行通路形状と一致し、通路外の経路は可視グラフとすることで、ユーザが見やすく、わかりやすい表示となった。見やすい表示により、案内誘導によって生じる経路誤りの発生を防ぐことができる。地図モデル、ナビゲーションによって、改良可視グラフの有効性を確認した。

表 2 より、改良可視グラフによるモデルと可視グラフによるモデルを比較すると、ノード数が約 10%，リンク数が約 45%削減された。ノード数の減少は、多くの通常ノードがノード対応付け処理によって通路用ノードに置換されたためである。またリンク数の減少はリンク設置規則によって、通路エリア周辺のリンクが制限されたことによる。

また、開発したシステムは障害物外周のノードとリンク情報のみで、改良可視グラフを自動生成する。本システムを西早稲田キャンパス 63 号館以外に、百貨店、大学施設等に適用し、同様に有効性を確認した。自動化と多空間への適用結果から、改良可視グラフの一般性が保証される。

屋内空間における道路ネットワークを活用した地図モデル生成の既存研究に研究 [7] がある。研究 [7] では、二次元地図からスケルトンアルゴリズムを用いて道路ネットワークを作成し、広場付近で形状が歪む問題を補正手法によって解決する。この手法ではモデル全体をネットワーク構造で表すため、広場への出入り口のリンクは全て広場の中心に繋がる。経路誘導時、広場の出入り口間の移動や、広場内の目的地への移動する際には、広場の中心を経由する必要がある。そのため、案内経路は広場が広いほど遠回りとなる。改良可視グラフでは、広場は可視グラフによってモデル化されるため、広場の出入り口や広場内の目的地の間に最短なリンクが設置される。また、形状が歪む問題は発生せず、わかりやすい経路誘導がされる。

5. おわりに

可視グラフによるモデルは廊下などの直線の通路では、歪んだ形状となる問題がある。本稿では、この問題を解決するために歩行通路形状を考慮したモデルとして、改良可視グラフによるモデル化を提案した。このモデルを利用した屋内地図のモデル化、ナビゲーションシステムへ適用した。

謝辞 本研究を進めるにあたり貴重な議論及びデータを提供いただいた川上佳也氏をはじめとする株式会社ゼンリンデータコムのみなさま、ならびに株式会社ゼンリンのみなさまに感謝いたします。

参考文献

- [1] 荒井亨, “屋内向けナビゲーションにおける歩行者の嗜好を反映させた経路探索手法,” 2006 年度修士論文, 2006.
- [2] 藤田迪, 梶克彦, 河口信夫, “Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法,” 情報処理学会論文誌, vol. 52, no. 3, pp. 1069–1081, 2011.
- [3] 梶克彦, 河口信夫, “indoor.Locky : UGC を利用した無線 LAN 屋内位置情報基盤,” 情報処理学会論文誌, vol. 52, no. 12, pp. 1–11, 2011.
- [4] K. Montague, “Accessible indoor navigation,” in *Proc of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 305–306, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] PhanDuyPhuoc, 宮島智大, 枇榔晃裕, 安積卓也, 西尾信彦, “広場通過を考慮した屋内ナビゲーションの手法検討,” 情処研報, vol. 2013-UBI-38, no. 56, pp. 1–6, 2013.
- [8] 町田理, 町田直哉, 柳澤政生, 戸川望, “VNS : 可視グラフに基づく屋内環境ナビゲーションシステム,” 情報処理学会マルチメディア分散協調とモバイル (DICOMO 2013), pp. 688–701, 2013.
- [9] 李燕, “地図から詳細な交通ネットワークデータの作成システム,” 土木計画学会研究講演集, vol. 26, 2002.
- [10] 国土交通省 国土地理院, <http://www.gsi.go.jp/>.