

屋内歩行空間ネットワークの生成支援機構

坂本 大輔¹ 西山 大河² 村尾 和哉² 望月 祐洋³ 西尾 信彦²

概要：現在、ユーザの位置情報を用いたナビゲーションサービスが多く存在する。屋内でのナビゲーションを行う際には、現在地から目的地までの経路情報を算出するために屋内歩行空間ネットワークが必要となる。屋内歩行空間ネットワークは、ユーザが歩行可能な経路をノード・リンクで表現したものである。しかし、屋内歩行空間ネットワークは一部の建物でしか作成されていない上、作成されていても自由にナビゲーションサービスに利用できない場合がある。また、複雑な構造を持つ屋内空間である場合、データの作成や更新に大きな手間がかかる。そこで、屋内歩行空間ネットワークの自動生成を行うことで、屋内歩行空間ネットワークの生成支援を行えるようにする。歩行者デッドレコニングを利用して屋内測位を行うことでユーザの移動軌跡を推定し、移動軌跡から屋内歩行空間ネットワークの自動生成を行う。ノードの生成にはユーザの進行方向の差分に着目する。数歩ごとにユーザの移動方向の差分を合計し、一定以上であれば曲がり道と判定しノードを生成する。リンクはノードを繋げることで生成する。加えて、気圧センサを利用することで滞在階層を推定し、エレベータと階段階層移動を推定することで、複数の階層情報を含めた屋内歩行空間ネットワークを生成する。この提案手法に対して自動生成の評価を行った結果、部分的に自動生成を行うことができ、少しの修正で屋内歩行空間ネットワークを作成できるようになった。

1. はじめに

現在、ユーザの位置情報を用いたナビゲーションサービスが多く存在する。屋外におけるナビゲーションは Google Maps [1] や NAVITIME [2] などのサービスにより実現されているが、建物内や地下街といった屋内におけるナビゲーションは現在位置を知ることが難しく限定的にしか実現されていない。

一般的に、ナビゲーションを行う際にはユーザの現在位置と目的地までの経路情報の2つが必要となる。屋外におけるユーザの現在位置の推定には GPS を用いた測位が一般的であるが、屋内では GPS による測位精度が著しく下がるため GPS を用いた測位は適さない。そのため、Wi-Fi や BLE(Bluetooth Low Energy) の電波を用いた測位や加速度センサと角速度センサを利用した PDR(Pedestrian Dead Reckoning) を用いた測位などの研究が盛んである [3][4]。目的地までの経路情報を知るためには、歩行者が移動可能な経路を示すネットワーク（以下、屋内歩行空間ネットワーク）が必要となる。屋内歩行空間ネットワークとは、ユーザが歩行可能な経路をノードとリンクで表現したものである。屋内歩行空間ネットワークは複雑な構造であれば作成と構造の変化による更新の手間がかかる上、屋内歩行空間

ネットワークやその作成に用いる建物の情報が公開されないこともあり、屋内歩行空間ネットワークの入手や作成が屋内ナビゲーションサービスの実現のための課題となる。

そこで、本研究では屋内でのユーザの移動軌跡をスマートフォンのセンサデータから推定することで屋内歩行空間ネットワークの生成を支援するシステムを構築する。屋内におけるユーザの移動軌跡を推定し、ノードやリンクを自動生成することで、屋内歩行空間ネットワークの生成と更新の手間の削減を行う。加えて、スマートフォンに搭載された気圧センサを利用することで滞在階層と階層移動手段を推定し、複数の階層を持つ建物の屋内歩行空間ネットワークの生成支援を行う。

2. 関連研究

梶ら [5] はスマートフォンに搭載された加速度センサ、角速度センサ、気圧センサの値をもとに3次元の移動軌跡推定を行っている。進路方向推定とフロア間移動推定においてセンサ信号が短時間に大きく変化する区間を直接検出するのではなく、センサ信号の変化が少なく安定している区間を検出することで検出精度を向上させる手法を提案している。本手法では、フロア間の移動における移動手段を階段に限定している。また、フロア間移動は一連の気圧センサのデータを収集後に抽出しているため、リアルタイムにノードやリンクを生成していない。詳細な情報を持たな

¹ 立命館大学大学院 情報理工学研究科

² 立命館大学 情報理工学部

³ 立命館大学 総合科学技術研究機構

い建物における屋内歩行空間ネットワークの生成支援という観点では、リアルタイムにノードやリンクの生成過程を見ることができ、生成結果の誤りに気づいてその場で修正可能であることが望ましい。

米田ら [6] は、スマートフォンに搭載された気圧センサを利用することで、屋外と屋内それぞれに応じた行動認識手法を提案している。屋内においては、気圧センサデータから階層移動の開始と終了を検知し、開始点と終了点の気圧変化量に着目することでユーザーが何階移動したのかを推定している。しかし、この手法では直前の階層移動の開始点と終了点の気圧変化量のみを見て階層移動数を判定するため、踊り場がある階段や、階層移動の途中で立ち止まった場合などに滞在階層推定に誤りが生じることがある。例えば、踊り場がある階段を上る場合、下の階層から踊り場、踊り場から上の階層の移動を別々の階層移動と認識することがある。その場合、それぞれの気圧変化量を見て階層移動数を判定するため、それぞれで1階層分階層を移動したと認識されたり、いずれも1階層分は階層移動していないと認識することがあり、実際の階層移動数に比べて±1階層分誤差が発生する問題がある。

3. 要件とアプローチ

本節では、屋内歩行空間ネットワークの生成支援機構の要件とそれを実現するためのアプローチについて述べる。

3.1 要件

本研究で生成する屋内歩行空間ネットワークの定義を行う。屋内歩行空間ネットワークはノードとリンクから構成される。ノードは、経路上の曲がり道や交差点などの通路の方向が変わる場所、階段前やエスカレータなどの階層が変わる場所に配置する。リンクはノード間を結ぶことで通路を表現する。図1に歩行空間ネットワークの例を示す。図中のマーカーがノードを、ピンとピンを結ぶ線がリンクを表す。ノードは種類ごとに色が異なり、「曲がり道・交差点」は赤色、「階段前」は紫色、「エレベータ」は黄色で表す。ノードは、指定した階のノードのみを表示する。リンクは同一フロアのノードを結ぶものを黒色、異なる階層のノードを結ぶものを青色で表す。

屋内歩行空間ネットワークを生成する支援機構としては以下の機能が必要である。

- ノード・リンクの自動生成
- ノード・リンクの編集機能

従来の手法では屋内歩行空間ネットワークの作成には建物のCADデータやフロアマップといった建物情報が必要とされ、そのような情報が入手できない建物の屋内歩行空間ネットワークの作成は困難であった。スマートフォンの端末を保持した状態で建物内を歩くことで移動軌跡を推定し、移動軌跡からノードとリンクを自動生成する。



図1 歩行空間ネットワークの例

実際に建物すべての屋内歩行空間ネットワークを正しく自動生成することは難しく、生成された屋内歩行空間ネットワークをスマートフォン上などから簡易的に修正が行える編集機能が求められる。具体的には、ノードの追加・削除・移動、リンクの追加・削除が挙げられる。

3.2 アプローチ

本章では、屋内歩行空間ネットワークのノードとリンクを自動生成するための手法について述べる。

ノードとリンクの自動生成は以下のことを行い実現する。

- 移動軌跡の推定
- リアルタイムな滞在階層の推定
- 曲がり道におけるノード・リンク生成
- 階層移動におけるノード・リンク生成

移動軌跡の推定には、研究室内で開発されているPDRを利用する。PDRによって推定された歩行軌跡を元にノードとリンクの自動生成を行う。

また、リアルタイムに滞在階層を推定する。米田らの手法では、階層移動の開始時と終了時の気圧差を見て階層移動数を計算し現在の階層を更新していた[6]。この手法では直前の階層移動の開始点と終了点の気圧変化量のみを見て階層移動数を判定するため、踊り場がある階段や、階層移動の途中で立ち止まった場合などに滞在階層推定に誤りが生じることがある。そこで、本研究では階層移動の開始と終了時の気圧差を見て階層移動数を判断するのではなく、基準となる階層と気圧を保持し、定期的に現在の気圧を取得することで、現在の気圧と基準となる階層との気圧差から相対的に現在ユーザーがいる階層を推定するアプローチを取る。しかし、気圧は刻々と変化するため定期的な更新が

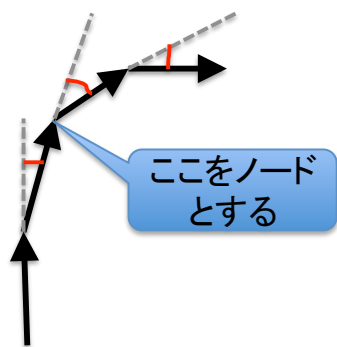


図2 ノードの自動生成

必要である。本研究では、20秒間の気圧センサの変動幅が $\pm 0.1\text{hPa}$ であり、歩数が10歩以上であった場合に基準となる階層と気圧を更新することとした。気圧の変化と歩数をみることで、階段や踊り場で立ち止まっていた場合にその地点が基準として更新されてしまうことを防ぐ。

曲がり道におけるノード・リンクの生成はユーザの一步ごとの移動方向の角度に着目する。ユーザは数歩の歩行によって曲がり道を曲がる。そこで、数歩ごとにユーザの移動方向の差分を合計し、一定以上であれば曲がり道と判定しノードを生成する。表2に曲がり道におけるノード生成について示す。本研究では、経験的に4歩間の移動方向の差分の合計が80度以上になった際にノードを生成することとした。また、新しくノードを生成した際に、今回生成したノードと前回生成したノードを接続するリンクを生成する。

階層移動におけるノード・リンクの生成は、米田ら[6]の気圧センサを用いた階層移動認識アルゴリズムを用いる。ノードの生成は、階層移動の開始や終了を検知した際に推定する階層移動開始時刻、終了時刻にユーザがいた場所に行う。階段とエレベータのどちらかを使ったかという階層移動手段の判定は、階層移動を行っていた区間のユーザの歩数に着目して行う。階段での階層移動ではユーザは常に歩いている状態になる。一方、エレベータでの階層移動ではユーザはほとんど歩かず静止していることが考えられる。そこで、階層移動区間におけるユーザの歩数をカウントし、歩数が一定数以下であればエレベータでの階層移動と認識し、一定数以上であれば階段と認識させる。本研究では経験的に閾値を4歩と定めた。

4. 設計と実装

本章では、3.1節で述べた要件を満たし、3.2節で述べたアプローチを実現するための設計および実装について述べる。

4.1 システム概要

システム概要図を図3に示す。気圧センサによる階層移動検知、気圧センサによる滞在階層推定、PDRの位置

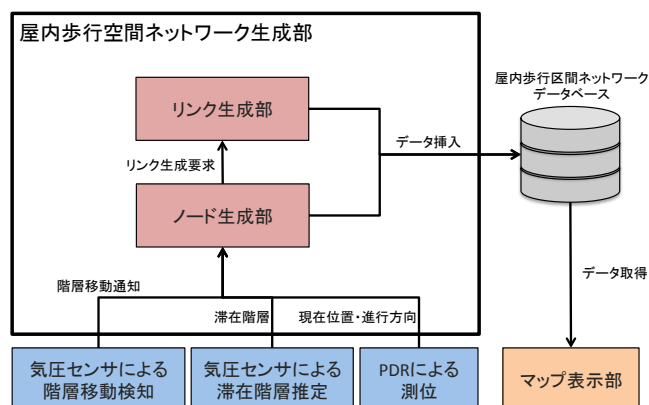


図3 システム概要図

表1 ノードのテーブルスキーマ

カラム名	型	説明
id	整数	ノードのID
latitude	浮動小数	緯度
longitude	浮動小数	経度
level	整数	階層
type	整数	ノードの種類

表2 リンクのテーブルスキーマ

カラム名	型	説明
id	整数	リンクのID
node1_id	整数	結ばれているノードのID
node2_id	整数	結ばれているノードのID
distance	浮動小数	距離 (m)
bearing	浮動小数	方位角
type	整数	リンクの種類
pressure	浮動小数	リンクの気圧差

測位の情報をノード生成部が受け取り、ノードを生成する。ノード生成は3.2節で述べたアプローチに従って行う。ノード生成後、リンク生成部に対してリンク生成を要求する。ノード生成部、リンク生成部は生成したノード・リンクを屋内歩行空間ネットワークデータベースに保存し、マップ表示部が保存したデータをマップ上に表示する。

4.2 ノードとリンクのテーブルスキーマ

ノードとリンクのテーブルスキーマを定義する。ノードのテーブルスキーマを表1に示す。idはノード毎にユニークな値を割り当てる。latitude, longitudeは緯度、経度を格納する。levelはノードが何階に存在しているかという階層情報が格納され、1階、2階は1, 2, 地下1階、地下2階は-1, -2と表現する。typeはノードの種類を示し、「曲がり角・交差点」、「エレベータ内」、「階段前」のいずれかの値を格納する。ノードの種類として、「エレベータ内」、「階段前」といった情報を保持することで、ユーザをナビゲーションする際に階層の移動をどういった方法で行えるのかを情報提示することが可能となる。

リンクのテーブルスキーマを表2に示す。idはリンク

毎にユニークな値を割り当てる。node1_id と node2_id はリンクを構成するノードの ID が格納される。distance、bearing にはリンクの距離と方位角が格納される。type には、リンクの種類を示し、「通路」、「エレベータ間」、「階段」のいずれかの値を格納する。「通路」は、交差点ノードと任意のノードを接続するリンクを表す。「エレベータ間」はエレベータ内ノード同士を接続する縦方向のリンクを表す。「階段」は、階段前ノード同士を接続するリンクを表す。

4.3 実装

本研究では、ユーザが端末を持ち歩くことで自動的に屋内歩行空間ネットワークを生成できるようにするために、Android アプリケーションとして実装した。

PDR は加速度センサや角速度センサを用いて相対的に測位する技術であるため、絶対座標ではなく初期位置からの相対座標で測位される。そのため初期位置および初期方向を設定する必要がある。測位開始前に緯度経度を設定するようにした。

実際に屋内歩行空間ネットワークを完全に自動生成することは難しい上、間違った推定による屋内歩行空間ネットワークが作られる可能性がある。そこで、簡易的に屋内歩行空間ネットワークを編集できる機能を実装した。具体的には、ノードの作成、削除、移動とリンクの作成を行えるようにした。

5. 評価

本機構を用いてノード・リンクが自動で生成できるかについて、評価を行った。

本評価実験で使用した Android 端末の機種名は Nexus5、型番は LG-D821、OS は Android OS 5.0.1 である。また、Nexus5 に搭載されている気圧センサは Bosch Sensortec 社製の BMP280、加速度センサ、角速度センサは InvenSense 社製の MPU-6515 である。

被験者は大学生の男性 1 名でスマートフォンを胸の前で保持した状態で建物内を歩行してもらった。実験は人通りの少ない時間に行った。被験者に一定の速度で立ち止まることなくまっすぐ歩行を行った。

5.1 同一フロアにおけるノード・リンク自動生成の評価

同一フロアを移動した場合のノード・リンクの自動生成について評価する。被験者に研究棟の 5 階を図 4 のように歩行を行ってもらった。

自動生成した結果を図 5 に示す。図 5 より、実際の建物構造に近い形の屋内歩行空間ネットワークを生成することができていることがわかる。しかし、ノードの位置が壁にめり込んだり、リンクが壁を突き抜けたりとといった実際の歩行経路とは異なるネットワークが生成されてしまっている。これは、今回利用した PDR における歩幅と実際の

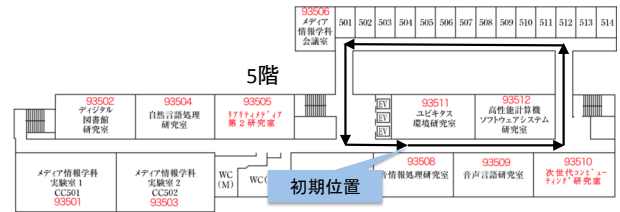


図 4 歩行した経路

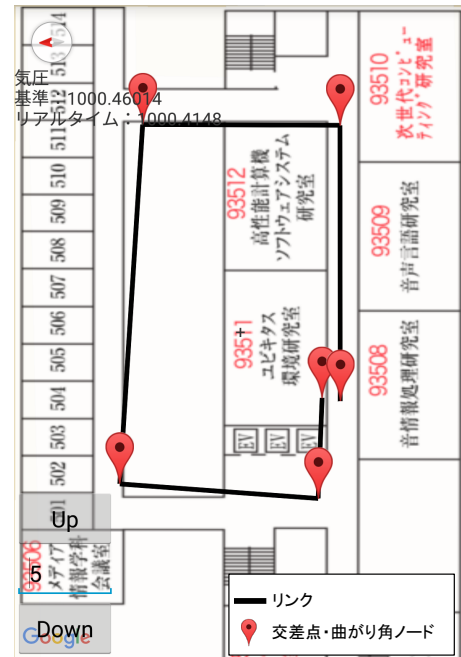


図 5 同一フロアにおけるノード・リンクの自動生成結果

歩幅の誤差や進行方向推定における誤差が蓄積したことにより発生したと考えられる。このような誤差を修正するため、ユーザが編集機能によりノードの位置修正をすることが必要である。

5.2 階層移動を行った際のノード・リンク自動生成の評価

階層移動時のノード・リンク自動生成について評価する。階段での階層移動とエレベータでの階層移動のそれぞれで評価を行った。階段では、踊り場のある階段を研究棟 5 階から同棟 4 階までを図 6 のような経路で、エレベータでは研究棟 5 階エレベータ前から同棟 1 階エレベータ前までを図 7 のような経路で移動した。

階段による移動時のノード・リンクの自動生成の結果について、5 階の結果を図 8、4 階の結果を図 9 に、エレベータによる移動時のノード・リンクの自動生成の結果について 5 階の結果を図 10、1 階の結果を図 11 に示す。図 8、図 9 は、階段前ノードを紫色のマーカーとして表示し、図 10、図 11 は、それぞれの階層におけるエレベータ内ノードを黄色のマーカーとして表示している。図 8、図 9 で、後述する説明のために、踊り場で生成されるべきノード群を赤枠で囲っている。また、マーカーがリンクの上に

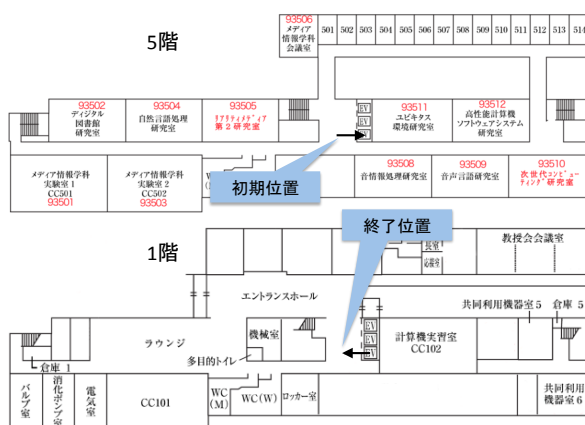
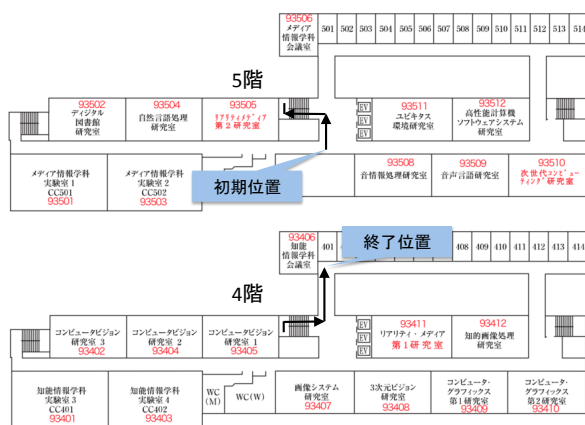


図 8 階段での階層移動でのノード・リンクの自動生成結果 (5 階)

重なりリンクが見えなくなることを防ぐために、図 9 のみ地図を傾けて表示している。

図 8, 図 9, 図 10, 図 11 に示す実験結果より, 階段とエ



図 9 階段での階層移動でのノード・リンクの自動生成結果 (4 階)



図 10 エレベータでの階層移動でのノード・リンクの自動生成結果
(5 階)

レベータの区別は正しく行えることがわかった。しかし、階段でのノード生成の位置が大きく失敗している。図 8 図 9 の赤枠内に生成されたノード群は踊り場で生成されるべきであるが、踊り場を突き抜けて生成されてしまっている。これは階段での歩幅が通常歩行時の歩幅より短くなったことにより誤差が生じてしまったためと考えられる。この問題は、階段のような環境の違いを利用して歩幅を環境に応じて考慮する研究を適用することで、回避可能である [7]。階段による移動時の結果である図 8, 図 9 に注釈を加えたものを図 12 に示す。図 12 より、ノード・リンク



図 11 エレベータでの階層移動でのノード・リンクの自動生成結果 (1 階)



図 12 ノード・リンク生成の誤り

生成に誤りが生じていることがわかる。曲がり道を曲がる動作は階段を下り終わってから行うはずにもかかわらず、踊り場での階層移動終了時に生成された階段前ノードが、5 階で生成された曲がり道ノードの後に生成されてリンクとして繋がっている。これは階層移動終了の時刻を推定する際に、実際に階層移動終了した時刻よりも後の時刻を推定したためである。この問題を解決するためには、階層移動の終了時刻をより正確に推定する必要がある。

図 10, 図 11 より、エレベータでの階層移動時にエレベータ内ノードが生成できることがわかった。一方で図 10 に示すように、エレベータ内ではエレベータ内ノードだけでなく、交差点・曲がり角ノードも生成されている。これは被験者がエレベータに侵入した後に出口の方向に向きを変え、曲がり道と認識されたためである。図 10, 図 11 からは非常に分かりづらいが、階層間のリンクもそれぞれの階

層のエレベータ内ノードを接続するように正しく生成している。エレベータ内ノード同士を結ぶリンクは縦に生成されるため、3 次元的に見せるなど表示の方法を工夫する必要がある。

6. 結論

スマートフォン搭載センサからユーザの移動軌跡や階層移動を推定し、自動的に屋内歩行空間ネットワークを生成する屋内歩行空間ネットワークの生成支援機構を構築し、評価を行った。その結果、部分的に屋内歩行空間ネットワークを自動生成することができた。自動生成しきれない部分についても、編集機能を利用することにより修正できることから、手作業で屋内歩行空間ネットワークを作成することに比べて手間を減らすことができた。

本研究では部分的な屋内歩行空間ネットワークの生成を行った。実際の環境では、通路を網羅的に移動することにより、ノードとリンクを生成することが想定される。現状はリンクを一筆書きで生成しているため、複数回同じ道を通る場合、重複して同じようなリンクが生成されてしまう問題がある。また、区間が広域である場合や単一端末でネットワークの生成をする場合、時間がかかることが予想される。そのため、複数端末で生成した屋内歩行空間ネットワークや、単一端末が複数回に分けて生成した屋内歩行空間ネットワークを統合できることが望ましい。

参考文献

- [1] Google マップ. <https://maps.google.co.jp/>.
- [2] 地図・ルート検索 - navitime. <http://www.navitime.co.jp/>.
- [3] Kazuya Miyazaki, Masahiro Mochizuki, Kazuya Murao, and Nobuhiko Nishio. Cross-assistive approach for pdr and wi-fi positioning. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, UbiComp '14 Adjunct, pp. 777–786, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [4] 吉見駿, 村尾和哉, 望月祐洋, 西尾信彦. マップマッチングを用いた PDR 軌跡補正. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2014-HCI-160, No. 20, pp. 1–8, October 2014.
- [5] 梶克彦, 河口信夫. 安定センシング区間検出に基づく 3 次元歩行軌跡推定手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 12–24, jan 2016.
- [6] 米田圭佑, 望月祐洋, 西尾信彦. 気圧センシング技術を用いた行動認識手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 260–272, jan 2015.
- [7] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫. 歩行者自律測位における行動センシング知識の利用. マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, 第 2014 巻, pp. 1614–1619, jul 2014.