平成16年度 修士論文

群集の移動情報に基づく
最適経路導出法の提案と評価

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報システム設計学専攻

0350040　三浦 明平

指導教官　多田 好克　　助教授
Vytautas Reklaitis　教授
古賀 久志　　講師

提出日　　平成17年1月31日

目 次

第 1 章　はじめに **7**

第 2 章　背景と目的 **10**

2.1 背景 10

2.2 研究目的 11

第 3 章　関連研究 **14**

3.1 GPS 付き携帯電話 14

3.2 歩行者ナビゲーションシステム 15

3.2.1 REAL 15

3.2.2 Drishti 15

3.3 群集の移動情報 16

3.3.1 PROBER 16

3.3.2 歩行履歴情報 17

3.4 歩行者の経路に対する嗜好を反映した経路生成 17

3.5 歩行者シミュレーション 18

第 4 章　システム設計 **22**

4.1 想定環境および前提条件 22

4.1.1 想定環境 22

4.1.2 歩行者とユーザ 22

4.1.3 ユーザの要求 23

4.1.4 移動情報 25

4.1.5 ノードとリンク 25

4.1.6 経路導出に用いる経路属性 25

4.2 経路探索法 27
4.2.1 ダイクストラ法 27
4.2.2 通りやすさ指標値の計算方法 28
4.2.3 最適経路の導出 31

第 5 章 シミュレーション 34

5.1 シミュレータの設計 34
5.1.1 パラメータ 34
5.1.2 歩行速度の変化 36
5.2 シミュレータの実装 37
5.2.1 シミュレータの詳細 37
5.3 シミュレーション結果 40
5.4 基礎実験 40
5.4.1 混雑度と歩行速度の関係 42
5.4.2 歩行速度と幅員の関係 42
5.4.3 考察 45

第 6 章 評価 46

6.1 評価方法 46
6.1.1 ユーザの要求の反映 46
6.1.2 混雑度の変化に伴う最適経路の変化 48
6.2 実験結果 48
6.2.1 ユーザの要求の反映 48
6.2.2 混雑度の変化に伴う最適経路の変化 56
6.3 考察 63
6.3.1 所要時間を考慮した経路 63
6.3.2 混雑度を考慮した経路 64

6.3.3 道路工事を考慮した経路 65
6.3.4 所要時間・混雑度の変化に伴う最適経路の変化 65

第 7 章 問題点と課題 67
7.1 本システムのユーザ数の影響 67
7.2 移動情報の誤差 67
7.3 複数の要求への対応 68
7.4 歩行速度の変化要因の検出 68
7.5 動的な閾値の設定 69
7.6 その他の要求を考慮した経路導出 69
7.7 所要時間・混雑度の変化に伴う最適経路の変化 69
7.8 実環境への適応 70

第 8 章 終わりに 71

図 目 次

2.1 最短経路 12
2.2 最適経路 13

3.1 歩行者密度と歩行者流量の関係 19
3.2 歩行者流量と歩行速度の関係 20
3.3 歩行者密度と平均歩行速度の関係 参考文献 20

4.1 歩行者とユーザ 24
4.2 ノードとリンク 26

5.1 属性データファイル 38
5.2 歩行速度が変化する場合 39
5.3 シミュレータ 41
5.4 歩行速度と混雑度の関係 43
5.5 歩行速度と幅員の関係 (10 回) 44
5.6 歩行速度と幅員の関係 (平均値) 44

6.1 所要時間を考慮した経路 49
6.2 最速経路と最短経路の所要時間 50
6.3 最速経路と最短経路の所要時間の割合 51
6.4 混雑度を考慮した経路 52
6.5 距離と混雑度の関係 53
6.6 最短経路と最適経路との混雑度の比較 53
6.7 最短経路と最適経路の距離 54
6.8 最短経路と最適経路の距離の比較 54
6.9 道路工事を考慮した経路 55

6.10 実験環境 57
6.11 ノード 5 → 37 の最適経路 58
6.12 ノード 19 → 37 の最適経路 59
6.13 ノード 25 → 37 の最適経路 61
6.14 ユーザが歩行した最適経路 62

表 目 次

3.1 外出時に案内がほしいと思うケース 18

5.1 シミュレーションの前提条件 40
5.2 基礎実験 (1) 条件 42
5.3 基礎実験 (2) 条件 43

6.1 最速経路と最短経路の所要時間 50
6.2 混雑度を考慮した経路の混雑度 51
6.3 道路工事を考慮した経路の混雑度 56
6.4 最適経路の比較 (ノード 19 → 31) 60
6.5 最適経路の比較 (ノード 25 → 37) 60
6.6 ユーザが歩行した経路と最短経路の混雑度 63

第 1 章

はじめに

近年、GPS 付き携帯電話などが普及し、モバイル通信技術と位置同定技術が気軽に利用できるようになってきている。近い将来、発売される携帯電話のほとんどが GPS 搭載端末になると予想され、今後、これらの技術を用いたサービスがより普及していくものと考えられる。

これらの技術を用いたサービスのひとつとして、歩行者ナビゲーションシステムが注目されている。歩行者ナビゲーションシステムとは、ユーザに対してある位置から目的地までの経路誘導を行うものである。

既存の歩行者ナビゲーションに関するサービスや研究では、携帯電話や PDA などの小画面にわかりやすく表示するなどといったことに重点が置かれてきた。既存システムで提供する経路は、目的地までの距離が最も短い最短経路のみである。既存の歩行者ナビゲーションシステムでは、地図データなどの経路の距離に関する情報のみを用い、最短経路を導出し提供している。しかし、ユーザは経路に対するさまざまな要求を持ち、その要求によってシステムが導出すべき経路が異なる。ユーザの経路に対する要求として、以下のようなものが考えられる。

- 人ごみを避けて通りたい。
- 坂道や階段を避けて通りたい。
- 目的地に早く着きたい。
- わかりやすい道を通りたい。

- 安全な道を通りたい。

既存の歩行者ナビゲーションでは、経路の情報として距離の情報のみを用いて経路導出を行っているために、これらの要求を考慮した経路を導出することが出来ない。これらのユーザの経路に対する要求には、さまざまな経路情報が関係すると考えられる。「人ごみを避けて通りたい」という要求には混雑度、「坂道や階段を避けて通りたい」という要求には傾斜度と階段、「目的地に早く着きたい」という要求には所要時間や歩行速度、「わかりやすい道を通りたい」という要求には目印、「安全な道を通りたい」という要求には混雑度や階段、段差、道路工事や障害などの経路情報が距離に関する情報以外に関係すると考えられる。

これらの経路の情報の中でも、歩行速度や混雑度、道路工事や障害などはリアルタイムに変化するために直接取得することが困難である。また、既存の歩行者ナビゲーションシステムのように地図データから取得することができない。

本研究では、最短経路ではなく、ユーザを考慮した最適経路を導出することに着目した。「空いた道を通りたい」、「目的地に早く到着したい」などのさまざまなユーザの経路に対する要求に着目し、これらの要求に添った経路の導出を行った。都市部など人口密度の高い地域では経路が混雑し、「空いた道を通りたい」、「目的地に早く到着したい」という要求が高いと考えられる。これらの要求には混雑度や歩行速度といった情報が関係すると考えられる。これらの情報は、リアルタイムに変化するために、従来の距離情報のように地図データから導出することが出来ない。そこで本研究では、GPS などから取得できる歩行者の歩行者の移動情報より混雑度などの情報を推測できると考え、それらに基づく経路を導出した。

本研究の主な目的は、混雑度や所要時間を考慮した経路の導出である。移動情報は GPS などを用いて得られると考え、移動情報の収集については対象外とした。

本研究では、群集の移動情報に基づき、混雑度などを考慮した最適経路を導出するシステムを構築した。また、本システムによって導出された経路の有効性を実証するために、本研究では、歩行者シミュレータを作成した。作成したシミュレー

タによるシミュレーションを通じて、本システムによって導出された経路が、所要時間を短縮する、混雑を避けるのに有効であることを実証し、既存の歩行者ナビゲーションシステムで提供されている最短経路に代わる最適経路が導出できることを示した。

本論文は、次のような構成となっている。第 2 章では、GPS 携帯電話などの普及、歩行者の経路に対する要求などの研究の背景について述べ、次に、本研究の目的について述べる。第 3 章では、本研究の関連研究について述べる。第 4 章では、本研究の提案システムの設計について述べる。第 5 章では、本システムの評価のためのシミュレーションについて述べる。第 6 章では、本研究で作成したシミュレータを用いた本システムの評価について述べる。第 7 章で本システムに残された問題点と課題、今後の展望などについて述べ、最後に第 8 章で本研究についてまとめる。

第 2 章

背景と目的

2.1 背景

近年、携帯電話や無線 LAN などのモバイル通信技術や、GPS などの位置同定技術が進歩してきている。これらの技術が用いられた端末として、 GPS 付き携帯電話が挙げられる。現在、携帯電話が急速に普及してきており [9] 、GPS 付き携帯電話も次第に普及してきている [10] 。今後、携帯電話全体に占める GPS 搭載機種の割合が次第に増加していくと予想され [8] 、一層普及が進んで行くものと考えられる。

これらのモバイル通信技術や位置同定技術を用いたシステムとして、近年、歩行者ナビゲーションシステムが注目されている。歩行者ナビゲーションシステムとは、歩行者に対し目的地までの経路誘導を行うものである。既存の歩行者ナビゲーションシステム [1][2] では、ユーザの現在位置から目的地までの距離が最も短い最短経路を導出し、ユーザに提供している。

しかし、ユーザによって、経路に対するさまざまな要求が考えられる。ユーザの経路に対する要求として、以下のようなものが考えられる。

- 人ごみを避けて通りたい。
- 坂道や階段を避けて通りたい。
- 目的地に早く着きたい。

- わかりやすい道を通りたい。
- 安全な道を通りたい。

例えば、ビジネスパーソンは、経路の距離や所要時間を重視する。高齢者や障害者は、経路の安全性を重視する。旅行者は、経路のわかりやすさを重視すると考えられる。これらの経路に対する要求には、経路の距離の他に、所要時間、混雑度や道路工事、障害、傾斜度、階段、段差、目印、景色、明るさ、店などの経路の属性が関係すると考えられる。経路の所要時間には、距離や歩行速度、混雑度などの経路属性が関係すると考えられる。経路の安全性には、混雑度や道路工事、障害、傾斜度、階段、段差、明るさなどが関係すると考えられる。また、経路のわかりやすさには、目印や明るさ、店などが関係すると考えられる。

しかし、既存の歩行者ナビゲーションシステムでは地図データなどの距離の情報のみから経路を導出しており、これらの経路の属性を組み入れていない。

都市部などの歩行者の非常に多い地域では、図 2.1 のように経路が混雑し、既存の歩行者ナビゲーションシステムの経路では、目的地までの所要時間が長くなる、安全性が低下するなどの状況が考えられる。

混雑状況や所要時間はリアルタイムに変化するが、既存の歩行者ナビゲーションシステムが提供する最短経路では、リアルタイムに変化する経路属性を考慮していないため、混雑した箇所を避けたり、所要時間を短くすることができない。

2.2 研究目的

本研究の目的は、最短経路に代わる、歩行者のさまざまな要求を考慮した最適経路を導出することである。例えば、図 2.2 のように、混雑度や所要時間などといったリアルタイムに変化する経路状況を考慮した最適経路を導出する。本研究では、混雑度や所要時間などの経路属性を、群集の移動情報より計算する。ユーザが要求する経路は、そのユーザの嗜好によって異なる。そこで、混雑度や所要時間を考慮

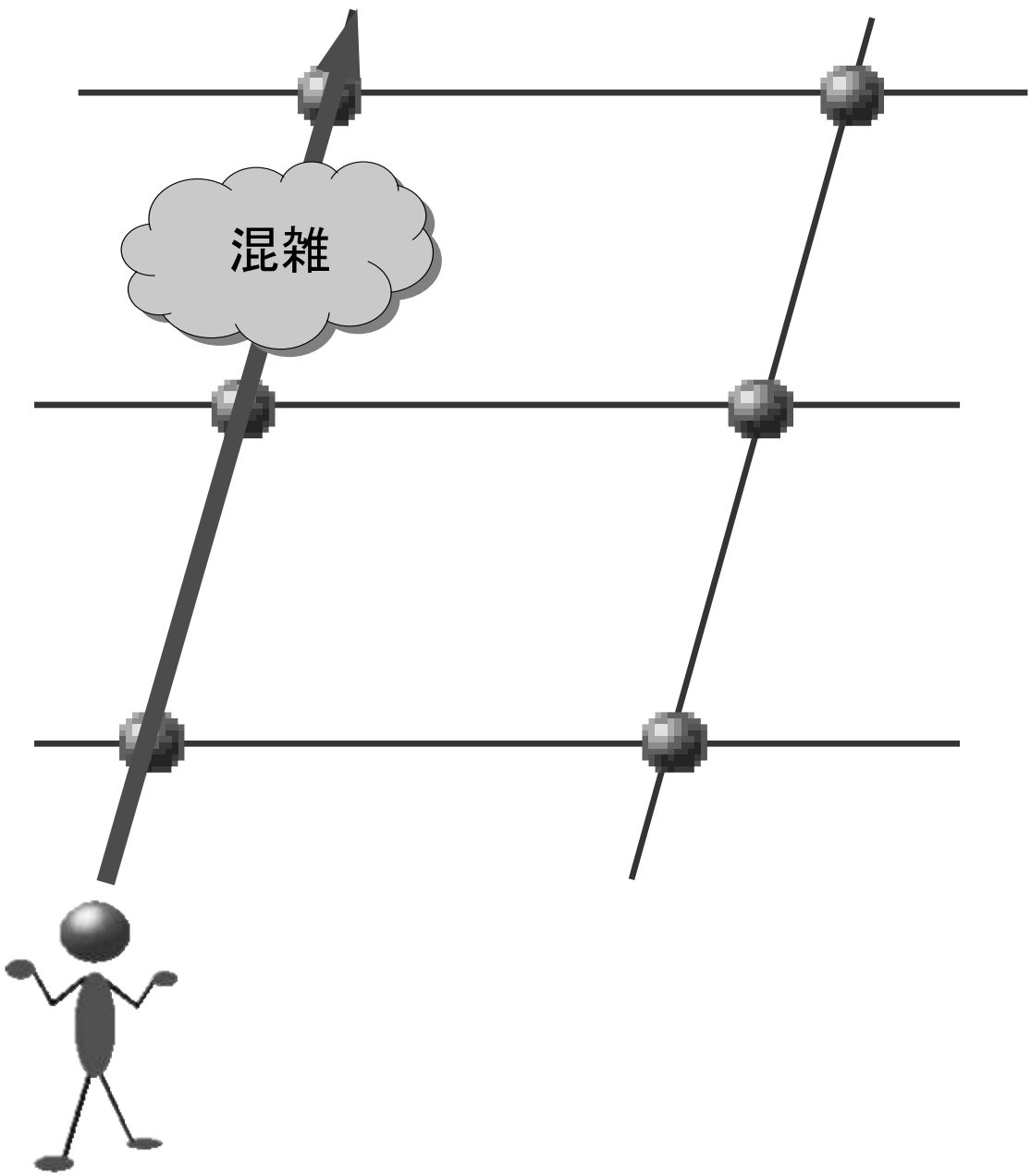

図 2.1: 最短経路

することによって、快適性の高い経路を導出する。本研究の主な目的は、群集の移動情報を考慮した最適経路の導出であり、群集の移動情報の収集については GPS などを用いて関連研究 [3][4][5] の手法で収集できるものとし、本研究では対象外とする。

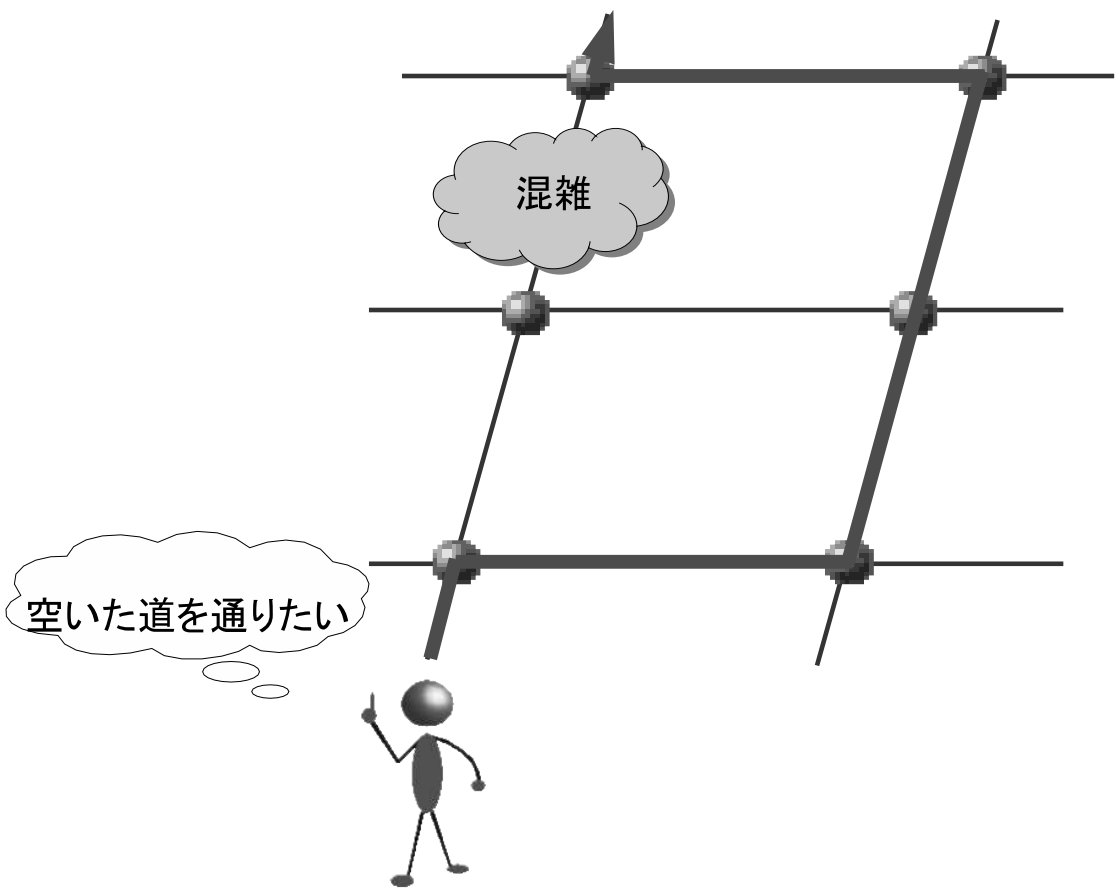

図 2.2: 最適経路

第 3 章

関連研究

3.1 GPS付き携帯電話

モバイル通信機能と位置同定機能を備えた端末として、GPS 付き携帯電話が挙げられる。近年、携帯電話は急速に普及してきており、現在携帯電話の保有率は、93.9% である (2003 年 世帯別保有率) [9]。また、GPS などを搭載した端末の割合が高まってきており、現在、位置情報通知機能を有する端末は携帯電話全体の 18.1% である (2004 年 8 月) [10] 。総務省 情報通信政策局は、2004 年 5 月、「携帯電話からの緊急通報における発信者通知機能に係る技術的条件」についての報告書案 [8] を公開した。

この報告書案によると、近年、110 番や 119 番への緊急通報のうち、携帯電話からの緊急通報の件数が増加してきている。携帯電話からの緊急通報が増えるのに伴い、レスポンスタイム (通報の受理から警察官などが現場に駆けつけるまでの平均時間) が長くなることが問題となっている。このレスポンスタイム悪化の原因のひとつとして、携帯電話からの通報による「位置特定の難しさ」を挙げている。これらの問題をふまえ、報告書案では、「2007 年 4 月以降、携帯電話事業者が新規に提供する第 3 世代携帯電話端末については、原則として GPS 測位方式による位置情報通知機能に対応する」、としている。今後、GPS 付き携帯電話は一層普及し、近い将来、多くの歩行者が GPS 付き携帯電話を持つ可能性が高いと考えられる。

3.2 歩行者ナビゲーションシステム

モバイル通信技術や位置同定技術を用いたシステムとして、歩行者ナビゲ– ションシステムが注目されてきている。歩行者ナビゲーションシステムとは、歩行者に対し目的地までの経路の案内を行うものである。本節では、既存の歩行者ナビゲーションシステムに関する関連研究について述べる。

3.2.1 REAL

REAL [1] は、屋内と屋外での透過的なナビゲーションと、技術的資源およびユーザの認識能力への適応を目的としたシステムである。屋内での測位には赤外線、屋外での測位には GPS を用いている。ユーザの認識能力への適応のために、ユーザの移動速度に応じて画面に表示する地図の精度を変化させている。また、技術的資源への適応については、PDA やノート PC などのディスプレイの大きさや解像度に応じて、表示画面の詳細度を変化させている。しかし、提供される経路情報は最短経路に関する情報であり、最適経路に関する経路情報は提供されていない。

3.2.2 Drishti

Drishti [2] は、視覚障害者および身体障害者の歩行支援のための歩行者ナビゲーションシステムである。Drishti では、身体障害者のためのヘッドマウントディスプレイ、視覚障害者のためのヘッドセットを用意し、映像および音声による経路案内を試みている。また、障害者にとって最適経路である、危険性の少ない経路の導出を試みている。しかし、最適経路の導出には、ユーザ個人の歩行経験を蓄積した情報を用い、群集の移動情報は用いられていない。

3.3 群集の移動情報

混雑状況などを考慮した経路導出のために、群集の移動情報より経路の通りやすさに関するパラメータを導出することが適当であると考えられる。本節では、群集の移動情報に関する関連研究に付いて述べる。

3.3.1 PROBER

PROBER [3] は、「プローブ情報システム」を歩行者の移動情報の収集に適用することを検討している。「プローブ情報システム」とは、自動車を「プローブ (調査機) 」に見立て、車の持つセンサを利用して、情報を収集・蓄積・加工・提供を行うものである。プローブ情報システムでは、車載されたセンサが収集した情報をネットワークを介して情報センターに蓄積し、加工を行い、交通情報や気象情報などといった情報を提供するシステムである。

PROBER では、モバイル端末をセンサに見立て、端末に搭載された GPS を利用し、歩行者の位置情報や歩行速度、経路情報を収集している。収集された情報を NA (Nomadic Agent) を用いて蓄積・解析を行っている。NA とは、端末間を移動する Mobile Agent である。PROBER では、NA を利用することによる利点を以下のように挙げている。

- 場所に密着した最新の情報を統計的に処理することが可能となり、より正確な情報を歩行者に提供できる。
- アドホック接続型の無線通信のみでネットワーク構成が可能となるために、無線 LAN のアクセスポイントのようなインフラ設置が不要である。
- 携帯通信網のように通信料金が発生しないことから低コストで情報共有・提供が出来る。

PROBER では、歩行者の移動情報の収集が試みられているが、移動情報を用いた経路導出は行われていない。

3.3.2 歩行履歴情報

白川ら [4][5] は、GPS から得られる歩行者の歩行履歴情報からナビゲーション情報を生成することを検討している。彼らは、歩行履歴情報を複数蓄積し統計的に解析することにより、歩行者にとって有効な情報を抽出することを試みている。彼らは、GPS の位置情報より移動距離と標高差の情報を抽出し分析している。また、移動距離の変化から、歩行者の信号待ちによる歩行者信号機や横断歩道の検出、移動手段の変化の検出を試みている。混雑度についても歩行履歴情報より取得することを試みている。彼らは、混雑度に比例し、歩行速度が減少することを示している。しかし、歩行履歴情報を用いた経路導出は行われていない。

3.4 歩行者の経路に対する嗜好を反映した経路生成

松田ら [6] は、距離以外に、安全性や快適性を考慮した経路の生成を行っている。彼らは、歩行者に経路への嗜好性を探るためのアンケート調査を行っている。彼らは、まず、「外出時に案内がほしいと思うケース」について調査している。調査の結果は、図 3.1 に示した。彼らは、この調査結果をもとにさらに経路探索パラメータの重要性についての、アンケート調査を行っている。この 2 回目のアンケート調査で、彼らは、「10 分程度で到達できる経路に対して、どの程度の遠回りなら許容できるか」について調査をしている。彼らは、信号やガードレール、横断歩道、階段、坂など、安全性や快適性に係る経路探索条件についてどの程度なら最短経路よりも遠回りを許容できるか、について調査している。そして、調査結果より経路探索パラメータの算出を行い、そのパラメータを経路の重みとして付加することにより、歩行者の経路に対する嗜好を反映した経路の生成を行っている。彼らの

生成している経路は、階段や坂道などを避けた経路であり、混雑度などは考慮されていない。

表 3.1: 外出時に案内がほしいと思うケース

状況	人数 (%)
雨にぬれない道を案内してほしい	86 (90.5%)
歩道のある道を案内してほしい	81 (85.2%)
人ごみを避けて歩きたい	80 (84.2%)
エレベータ・エスカレータが利用できる	76 (80.0%)
安全な夜道を案内してほしい	72 (75.7%)
急な坂を歩きたくない	73 (76.8%)
階段は避けたい	71 (74.7%)
横断歩道や信号のある交差点で横断したい	65 (68.4%)

(対象回答者 95 名) (参考文献 [6] より引用)

3.5 歩行者シミュレーション

David Marchal ら [7] は、歩行者の群集の行動についてシミュレーションを行っている。彼らは、大都市における歩行者の行動について、歩行者個々の動きと、群集の動きについてシミュレーションしている。彼らは、建物や歩行者同士の衝突の検知についてシミュレーションを行い、混雑している状況による歩行者の行動、歩行者密度による歩行者の行動の変化、歩行者がグループになった場合の行動などについてシミュレーションを行っている。しかし、彼らのシミュレーションは、

群衆の中での歩行者個々のの衝突回避行動など微視的な歩行者の行動についてのシミュレーションであり、広いエリアでの歩行者の巨視的なシミュレーションは行われていない。

また、彼らは、歩行者同士の衝突の回避行動について以下のようにまとめている。

- 人間が必要な面積は、静止状態で約 $0.14\mathrm{m}^2$ であるが、歩行者が歩行するには、約 $0.5\mathrm{m}^2$ の面積が必要である。
- 歩行者の歩行速度は、およそ $44\mathrm{m/min}$ から $122\mathrm{m/min}$ である。
- 歩行者密度を k [人/m^2] 、歩行速度を $U[\mathrm{m/min}]$ とおくと、歩行者の流量 q[人/$\mathrm{m}\cdot\mathrm{min}$] は以下のようにおける。

$$q = kU$$

彼らは歩行者の流量と、歩行者密度、平均歩行速度の関係を図 3.1、図 3.2、3.3 のようにまとめている。

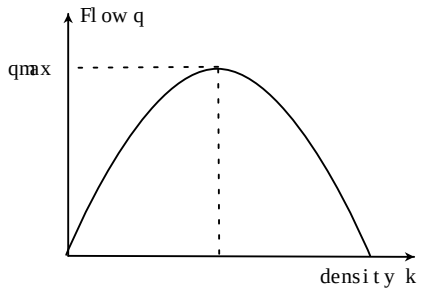

図 3.1: 歩行者密度と歩行者流量の関係

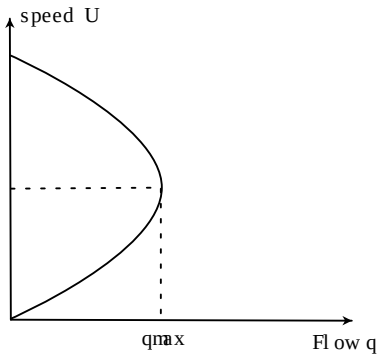

図 3.2: 歩行者流量と歩行速度の関係

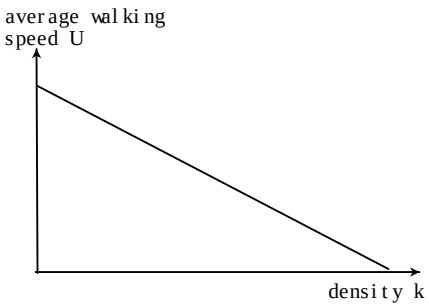

図 3.3: 歩行者密度と平均歩行速度の関係 参考文献

以上の関連研究をふまえ、本研究では、以下のことに着目した。

- GPS などによる位置情報が気軽に利用できるようになってきている。
- 既存の歩行者ナビゲーションシステムでは最短経路が提供されている。
- 群集の移動情報より混雑度などを導出できる。
- 混雑度や所要時間などを考慮した経路導出法が提案されていない。
- 歩行者によって、それぞれ経路に対する嗜好性が異なり、距離以外に、経路の快適性や安全性が要求されている。
- 人ごみを避けて歩きたい (混雑度の低い経路を通りたい) という要求が高い。

第 4 章

システム設計

本システムでは、端末を多数の歩行者が持ち、多数の歩行者が自身の位置座標を取得し、その座標と通過した時刻より経路導出のための通りやすさの指標値を求める。さらに、求められた指標値を用いて経路導出を行うことにより、混雑度などを考慮した最適経路を導出する。

4.1 想定環境および前提条件

本節では、本研究が想定する実世界環境について述べる。本システムは以下のような条件がそろった状況で利用されることを想定している。

4.1.1 想定環境

本研究では、歩行者が多数存在し、歩行者により経路が混雑するような状況を想定する。実世界環境では都市部などの人口密度の高い地域がこれに当たり、実際に経路上に多くの歩行者が存在し、経路が混雑する状況が考えられる。

4.1.2 歩行者とユーザ

本研究では、歩行者とユーザを以下のように定義する。

歩行者

歩行者は本システムを用いるエリアを歩行し、多数の歩行者が何らかの方法でそれぞれの歩行者が自身の位置座標を取得し、本システムに座標とその座標を通過した時刻を発信すると定義する。つまり、本システムは多数の歩行者の位置座標とその座標を通過した時刻が得られるものとする。たとえば、GPS 付き携帯電話を多数の歩行者が持っているような状況を想定する。現在、携帯電話の保有率は、93.9%であり (2003 年 世帯別保有率) [9]、その内、位置情報通知機能を有する端末は 18.1%である (2004 年 8 月) [10]。2007 年 4 月以降発売される携帯電話機は、ほぼ全てが GPS 受信機能対応になると予想される [8]。近い将来、多くの歩行者が GPS 付き携帯電話を持つと予想される。

また、近年、無線 LAN や RFID による位置同定技術が研究・開発されており、近い将来、多数の歩行者の位置座標が得られるという前提条件が成り立つ可能性が高いと考えられる。

本システムでは、歩行者より得られた位置座標と通過した時刻から歩行者の歩行速度や進行方向などの移動情報を計算し、所要時間や混雑度などの経路属性の導出に用いる。

ユーザ

ユーザは、本システムにより導出された最適経路を利用することができる歩行者であると定義する。ユーザは、経路に関する要求を本システムに送り、その要求に添った経路を得ることが出来る。

歩行者とユーザについて図 4.1 に示した。

4.1.3 ユーザの要求

本システムではユーザが何らかの経路に対する要求を持ち、その要求に添った経路を導出できるよう設計を行う。本研究では、ユーザの要求として所要時間と混

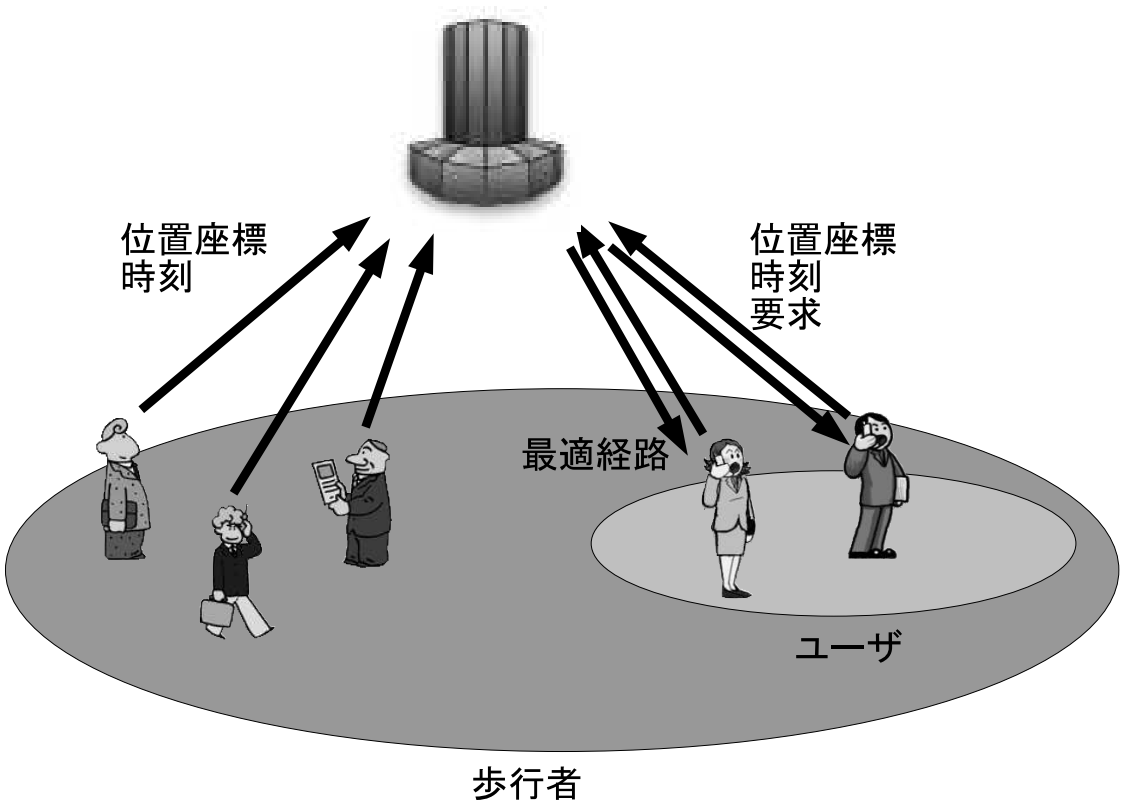

図 4.1: 歩行者とユーザ

雑度を定義する。本システムは所要時間の最も短い経路 (最速経路) 、あるいは混雑度の低い経路を導出する。また、道路工事や障害、階段や坂を考慮した経路の導出を行う。

4.1.4 移動情報

本システムでは、全歩行者のそれぞれの座標とその座標を通過した時刻より、各歩行者の移動情報を計算する。これらの移動情報を基に混雑度や所要時間などの経路属性の計算を行う。

4.1.5 ノードとリンク

本研究では、経路の交差点などの分岐、交差する地点をノード、ノードによって分割された経路をそれぞれリンクと定義する (図 4.2) 。リンクごとに群集の移動情報より経路属性の導出を行う。

4.1.6 経路導出に用いる経路属性

本研究では、最適経路導出に係るさまざまな経路属性の中から、以下の経路属性に着目し、経路導出に用いる。

距離および幅員

各リンクの距離および幅員は、既知のものとする。距離や幅員の情報は地図データなどから得ることが出来る。

歩行速度

各歩行者の位置座標とその座標を通過した時刻より各歩行者の歩行速度を計算し、リンク上の全歩行者の歩行速度の合計から各リンクの平均歩行速度を求める。

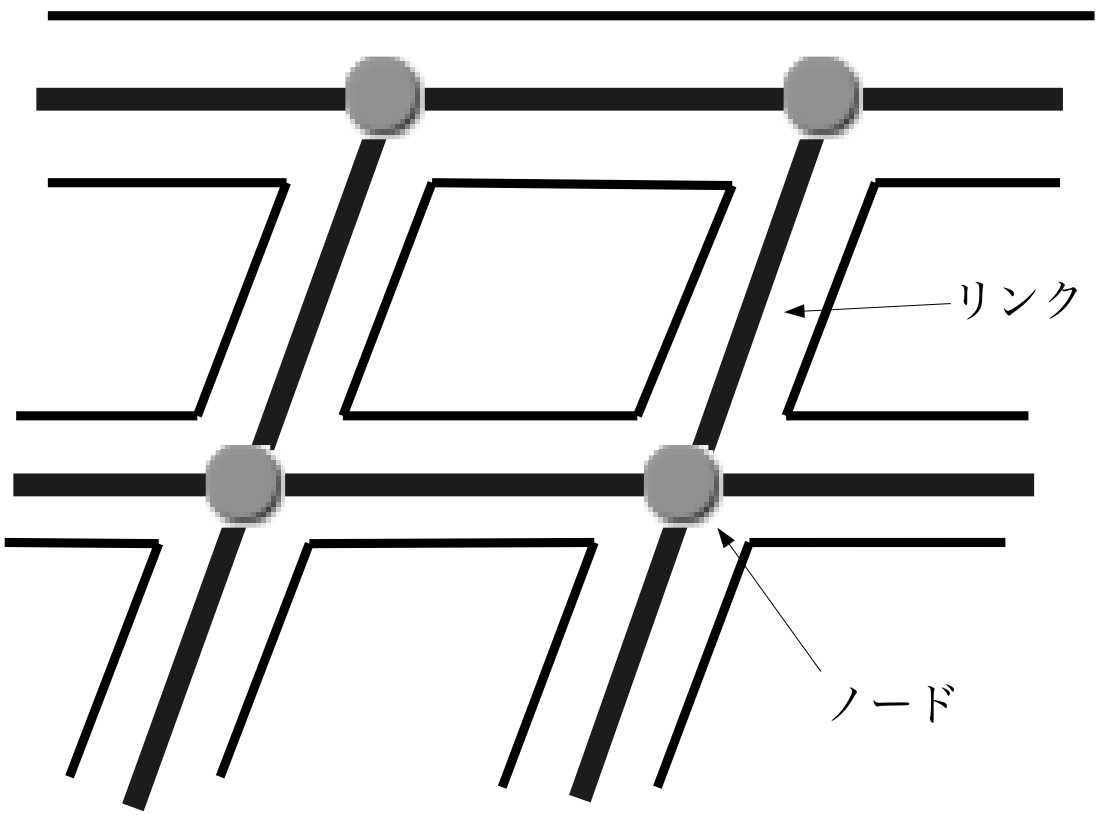

図 4.2: ノードとリンク

所要時間

各リンクの平均歩行速度とリンク長から各リンクの所要時間を計算する。

混雑度

各歩行者の位置と、リンク長、幅員より各リンクの混雑度を計算する。

進行方向

各歩行者の位置と、その過去の位置より、歩行者の進行方向を求める。

以上の経路属性から、ユーザの要求に添った経路の導出を行う。

4.2 経路探索法

4.2.1 ダイクストラ法

既存の歩行者ナビゲーションシステムでは、最短経路の導出に主にダイクストラ法 [11] が用いられている。ダイクストラ法とは、ネットワーク上における、ある地点から別の地点までのコストが最小である経路を求めるアルゴリズムである。以下に、ダイクストラ法の経路探索の手順に付いて述べる。

ネットワーク G のリンク e_{ij} の重み係数を g_{ij} 、始点ノード s からノード i までの経路長を $L(s)$ 、その経路上でノード i の一つ手前のノードを $R(i)$ と表した場合、はじめに $L(s) = 0$ 、始点ノード s 以外の全てのノード i に対して $L(i) = \infty$ とする。そして、以下の (1)、(2) の手順を全ての点がマークされるまで繰り返す。

(1) まだマークされていないノードの中で経路長が最小のノード i を選び、そのノードをマークする。

(2) ノード i に隣接し、まだマークされていない各ノード j について、$L(j) > L(i) + g_{ij}$ ならば $L(j) = L(i) + g_{ij}$、$R(i) = i$ とする。$L(j) \leq L(i) + g_{ij}$ ならば $L(j)$、$R(i)$ はそのままとする。

始点ノード s からノード i までの最短経路長は、最終的に得られた各ノード $i(i = 1, 2, 3, \ldots, n)$ の経路長 $L(i)$ となる。

既存の歩行者ナビゲーションシステムでは、探索時の重み係数として経路の距離を与えることで最短経路を求めている。

4.2.2 通りやすさ指標値の計算方法

本システムでは以下のようにして各リンクの通りやすさの指標値をそれぞれ計算する。

所要時間について

(1) 各歩行者の歩行速度を各歩行者の位置と時刻より求める。各歩行者の歩行速度を v_{ij} とする。

(2) 各リンク上の歩行者の歩行速度と歩行者数 p_{ij} より各リンクの平均歩行速度 $\bar{v_{ij}}[\mathrm{m/s}]$ を求める。

(3) 各リンクの平均歩行速度 $\bar{v_{ij}}$ と各リンクの長さ l_{ij} より各リンクの平均所要時間 $\bar{t_{ij}}$ を求める。

$$\bar{t_{ij}} = \frac{l_{ij}}{\bar{v_{ij}}}[\mathrm{sec}] \tag{4.1}$$

所要時間を考慮した経路を導出する場合、各リンクの所要時間を各リンクの重み係数として用いることにより目的地までの最速経路を導出する。

混雑度について

(1) 各リンクの長さ l_{ij} と各リンクの幅員 w_{ij} より各リンクの面積 a_{ij} を求める。

$$a_{ij} = l_{ij} \times w_{ij}[\mathrm{m}^2] \tag{4.2}$$

(2) 各リンク上の歩行者数を p_{ij} とし、p_{ij} と各リンクの面積 a_{ij} より各リンクの混雑度 (歩行者密度) d_{ij} を求める。

$$d_{ij} = \frac{p_{ij}}{a_{ij}}[\text{人}/\mathrm{m}^2] \tag{4.3}$$

(3) 第 4.2.1 節のダイクストラ法の重み係数を距離とし、最短経路を求める。

(4) 最短経路のリンクの長さと幅員から面積を求め、リンクの面積と歩行者数から最短経路全体の平均混雑度 $\bar{d}$ を求める。

各リンクの混雑度 d_{ij} と最短経路の平均混雑度 $\bar{d}$ を比較し、あるリンクの混雑度が最短経路の平均混雑度よりも小さければ、そのリンクは「空いている」と言えると考える。つまり、$\frac{d_{ij}}{\bar{d}}$ が 1 未満であれば、そのリンクは「空いている」と判断し、1 以上であればそのリンクは「混んでいる」と判断する。

道路工事、障害、坂、階段について

第 3.5 節の図 3.3 より、混雑度が高くなると、それに比例し歩行速度が遅くなると考えられる。混雑度が低いにもかかわらず歩行速度が遅くなる場合、混雑以外の要因で歩行速度が遅くなったと考えられる。この混雑以外の要因として、道路工事や障害、坂、階段などが挙げられる。道路工事や障害などがリンク上に生じた場合、あるいはそのリンクが坂や階段である場合、混雑度に関係なく歩行速度が遅くなると考えられる。本研究では、以下のように混雑度と歩行速度に閾値をおき、道路工事や障害、坂や階段を検出する。

(1) 混雑度と平均歩行速度について閾値をおき、それぞれ th_d 、th_v とおく。

(2) 各リンクの混雑度 d_{ij} と平均歩行速度 $\bar{v_{ij}}$ について、

$$\begin{cases} d_{ij} < th_d \text{ かつ} \\ \\ \quad v_{ij} < th_v \end{cases} \tag{4.4}$$

である時、そのリンク上に道路工事や障害が生じた、あるいはそのリンクが坂や階段であるものと推測する。

道路工事や障害が生じた場合、本システムでは道路工事や障害を直接検出することは出来ない。しかし、各リンクにおいて歩行者密度および平均歩行速度を計算することにより、ある閾値を下回った場合、そのリンク上に道路工事や障害が生じた、あるいはそのリンクが坂や階段であるものと推測することができる。ユーザが、道路工事や障害を避けたい場合、そのリンクを通らない経路を導出する。

坂、階段について

あるリンクが坂や階段である場合、道路工事や障害が生じた場合と同様に歩行速度が変化すると考えられる。本研究では、あるリンクが坂もしくは階段である場合、リンク上の歩行者の進行方向によって速度を分析することにより、坂、階段の検出を行う。歩行者が階段や坂を歩行する時、下りの場合は歩行速度があまり変化しないのに対し、上りの場合に歩行速度が遅くなると考えられる。つまり、リンク上をある方向に歩行している歩行者の歩行速度が変化しないのに対し、逆の方向に歩行している歩行者の歩行速度が遅くなるような場合、そのリンクが坂や階段であると推測する。また、どちらの方向に向かって歩行している歩行者の歩行速度が遅くなったかによって坂や階段の向きを検出する。つまり、歩行速度が減少した歩行者が歩行している方向が上りであり、逆の方向が下りであると推測する。この坂や階段の向きによってそのリンクの上り方向の重み係数を大きく設定することにより、坂や階段の向きを考慮した経路導出が可能である。

各ノード i から隣接するノード j のリンク上を歩行している歩行者の平均歩行速度をみる。このとき、平均歩行速度を進行方向によって分析し、坂や階段の検出を行う。ノード i からノード j に向かう歩行者の平均歩行速度を $\bar{v_{ij}}$ 、ノード j からノード i に向かう歩行者の平均歩行速度を $\bar{v_{ji}}$ とする。ノード i とノード j の間のリンクが坂もしくは階段であり、ノード i からノード j に向かう方向が上りである時、平均歩行速度 $\bar{v_{ij}}$ と $\bar{v_{ji}}$ には次の関係が成り立つ。

$$\bar{v_{ij}} < \bar{v_{ji}} \tag{4.5}$$

この $\bar{v_{ij}}$ と $\bar{v_{ji}}$ の差が大きい場合、そのリンクが坂もしくは階段であると推測する。

4.2.3 最適経路の導出

第 4.2.2 節で計算した、通りやすさの指標値より最適経路の導出を行う。また、最適経路の導出はリアルタイムに行い、ユーザに提供する。混雑度などが変化した場合、導出される経路も変化する。経路の導出は以下のように行う。

最速経路

求められた各リンクの平均所要時間 $\bar{t_{ij}}$ を各リンクの重み係数 g_{ij} として経路導出を行うことにより、最速経路の導出を行う。

$$g_{ij} = \bar{t_{ij}} \tag{4.6}$$

混雑度を考慮した経路

求められた各リンクの混雑度 d_{ij} を用いて経路の導出を行う。しかし、混雑度をそのまま経路の重み係数として用いた場合、目的地までの距離が短い経路が混雑している場合、導出される経路が非常に長くなってしまう可能性がある。

そこで、本システムでは混雑度を考慮した経路の場合、用いる重み係数 g_{ij} を各

リンクの混雑度 d_{ij} とリンク長 l_{ij} から以下のようにおく。

$$g_{ij} = d_{ij} \times l_{ij} \tag{4.7}$$

道路工事、障害

道路工事や、障害が生じているリンクは、混雑度が低い場合でも歩行速度が遅くなると考えられる。ユーザが最速経路を要求した場合、道路工事や障害が生じているリンクは、歩行速度が遅くなるために経路として選択されない。

しかし、ユーザが混雑度を避ける経路を要求した場合、道路工事や障害が生じているリンクは、混雑度が低い場合、経路として選択してしまうおそれがある。このような場合、その道路工事や障害が生じているリンクの重み係数を重く設定することにより、そのようなリンクを避けた経路を導出する。

坂、階段を考慮した経路

ノード i と ノード j の間のリンク e_{ij} が坂もしくは階段であるとする。このとき、ノード i からノード j に向かう場合の重み係数 g_{ij} と、ノード j からノード i に向かう場合の重み係数 g_{ji} の重みを変化させる。つまり、ノード i からノード j に向かう場合が上り、ノード j から、ノード i に向かう場合が下りである場合、

$$g_{ij} > g_{ji} \tag{4.8}$$

の関係が成り立つとする。このときの、ノード i からノード j に向かう歩行者の平均歩行速度 $\bar{v_{ij}}$ とノード j からノード j に向かう歩行者の平均歩行速度 $\bar{v_{ji}}$ によって、その坂や、階段の傾斜の度合いを数値で表すことができる。この時、g_{ij} は以下の式で置き換えられる。

$$g_{ij} = \frac{\bar{v_{ji}}}{\bar{v_{ij}}} \times g_{ji} \tag{4.9}$$

この重み係数を経路導出に用いることにより、坂を避ける経路、あるいは上り坂だけを避ける経路の導出を可能にする。また、この重み係数をユーザが設定するこ

とにより、坂や傾斜の度合いによりそのリンクを避けるかあるいは通ってもよいかを選択できる。

第 5 章

シミュレーション

本研究システムの評価のために、歩行者シミュレータを作成した。作成したシミュレータが実世界環境の歩行者のシミュレーションが行えるか確認するため、基礎実験として歩行速度と混雑度の関係、幅員と平均歩行速度の関係を測定した。

5.1 シミュレータの設計

シミュレータは以下のような前提条件をもとに作成した。

5.1.1 パラメータ

シミュレーションを行うために、以下のパラメータをシミュレータに与える。

エリア属性

- エリアの大きさ (x 方向、y 方向)

シミュレーションを行うエリアの大きさを定義する。ノードおよびリンクはエリア内に配置される。また、歩行者およびユーザはエリア内のリンク上を歩行する。

ノード属性

- ノード ID

  各ノードに順に番号を付ける。導出される経路の順路は、ノード ID によっ

て表現される。

- ノード座標

  ノードの座標 (x 座標、y 座標) を与える。

リンク属性

- リンク ID

  各リンクに順に番号を付ける。

- 幅員

  各リンクの幅員を与える。

- 両端のノード ID

  各リンクの両端のノード ID を与える。リンクがどのノードとどのノードを結んでいるかを表現する。

歩行者属性

- 現在位置座標

  歩行者の現在位置の座標 (x 座標、y 座標) を与える。歩行者が移動した場合、歩行者の移動した位置の座標を与える。

- 目的地ノード ID

  歩行者の目的地のノード ID を与える。

- 自由歩行速度

  歩行者の周囲に別の歩行者あるいはユーザがおらず、別の歩行者あるいはユーザから影響を受けない場合の歩行速度、つまり歩行者の最高歩行速度を表す。歩行者は自由歩行速度以上の速度で歩行することはないものとする。

- 加速度

  歩行者が混雑などの何らかの要因で減速し、その後、減速の要因がなくなった場合、歩行者は与えられた加速度で加速する。ただし、歩行速度は自由歩行速度以上にはならないものとする。

ユーザ属性

- 現在位置座標

  ユーザの現在位置の座標 (x 座標、y 座標) を与える。

- 目的地ノード ID

  ユーザの目的地のノード ID を与える。

- 自由歩行速度

  ユーザの周囲に別の歩行者あるいはユーザがおらず、別の歩行者あるいはユーザから影響を受けない場合の歩行速度、つまりユーザの最高歩行速度を表す。ユーザは自由歩行速度以上の速度で歩行することはないものとする。

- 加速度

  ユーザが混雑などの何らかの原因で減速し、その後、減速の要因がなくなった場合、ユーザは与えられた加速度で加速する。ただし、歩行速度は自由歩行速度以上にはならないものとする。

- 導出経路に対する要求

  ユーザが混雑を避けたいか、目的地に早く到着したいかなどの経路に対する要求を与える。

5.1.2 歩行速度の変化

ある歩行者の周囲に別の歩行者がいる場合、その歩行者は別の歩行者に影響を受け、歩行速度が遅くなる。歩行速度が遅くなる割合は、歩行者同士の距離によっ

て変化する。歩行速度が周囲の別の歩行者によってどの程度変化するかは、次節で詳細に述べる。

5.2 シミュレータの実装

5.2.1 シミュレータの詳細

本シミュレータは、以下の機構を実装した。

- 属性データファイルの読み込み
- 歩行速度の算出
- 経路導出
- 歩行者およびユーザの移動

それぞれの機構について詳細に述べる。

属性データファイルの読み込み

5.1.1 節で述べた、各属性データを記述したファイルを読み込む。図 5.1 に読み込まれる属性データファイルの一部を示す。“#” で始まる行はコメント行として読み込まない。歩行者およびユーザの属性データについては、出発地のノード ID および目的地のノード ID をランダムに与える。また、自由歩行速度も 1.0m/sec、1.5m/sec、2.0m/sec よりランダムに与える。

歩行速度の算出

ある歩行者の周囲に別の歩行者がいる場合、その歩行者は別の歩行者に影響を受け歩行速度が遅くなる。歩行者の周囲、半径 1.5m 未満に別の歩行者がいる場合、歩行速度が 50% 遅くなる。半径 1.5m 以上 2.0m 未満に別の歩行者がいる場

```
# エリア属性
# width(x方向) height(y方向)
500 500

# ノード属性データ
# ノードID(番号) ノード座標(x) ノード座標(y)
1 0 0
2 100 0
3 200 0
4 300 0
5 400 0
```

図 5.1: 属性データファイル

合、歩行速度は 30% 遅くなる。半径 2.0m 以上 2.5m 未満に別の歩行者がいる場合、歩行速度は 10% 減少する (図 5.2)。混雑度が高い場合でも、歩行速度はある一定の歩行速度 (最低歩行速度) を下回らないものとする。本シミュレータでは最低歩行速度を 0.5m/sec とした。また、周囲の歩行者がいなくなった場合、その歩行者は与えられた加速度で加速する。加速度は $0.25\mathrm{m/sec}^2$ とした。ただし、歩行速度は自由歩行速度以上には速くならないものとする。

経路導出

歩行者およびユーザの経路を導出する。歩行者は、出発地から目的地まで最短経路を歩行する。ユーザに対しては、4.2.2 節で定義した、通りやすさの指標値を用いて最適経路を導出し提供する。また、ユーザに対してはリアルタイムに経路の導出を行う。そのため、混雑度などの変化によって導出経路も変化する。ユーザが次のノードに到達するまでに次のノードから目的地までの最適経路を導出する。

歩行者およびユーザの移動

歩行者、ユーザは、算出された歩行速度で導出された経路上を歩行する。移動先に別の歩行者がいる場合、別の歩行者の後ろに移動する。

シミュレーションの前提条件を、表 5.1 にまとめた。

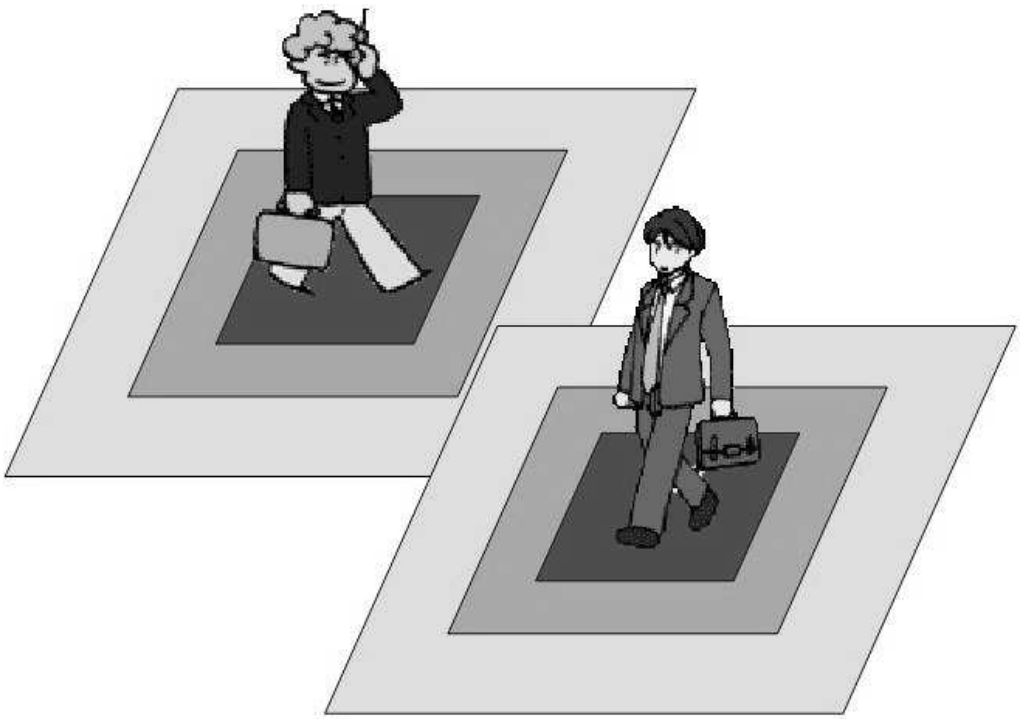

図 5.2: 歩行速度が変化する場合

表 5.1: シミュレーションの前提条件

実験エリア	$500 \times 500m^2$	
経路の幅員	$2m$ から $10m$	
歩行者		
歩行者面積	$1.0 \times 1.0m^2$	
自由歩行速度	$v_f = 1.0m/sec, 1.5m/sec, 2.0m/sec$	
最低歩行速度	$v_l = 0.5m/sec$	
加速度	$a = 0.25m/sec^2$	
歩行速度の減少	他の歩行者が半径 $1m$ 未満にいる場合	$v = 0.5 \times v_f$
	他の歩行者が半径 $1m$ 以上 $1.5m$ 未満にいる場合	$v = 0.7 \times v_f$
	他の歩行者が半径 $1.5m$ 以上 $2m$ 未満にいる場合	$v = 0.9 \times v_f$

5.3 シミュレーション結果

本システムにより導出された経路の評価のために、シミュレータを作成した。シミュレータは、C 言語で作成した。行数は約 2000 行である。シミュレーションの様子を図 5.3 に示した。

5.4 基礎実験

本システムの評価実験の前に、シミュレータの基礎実験を行った。

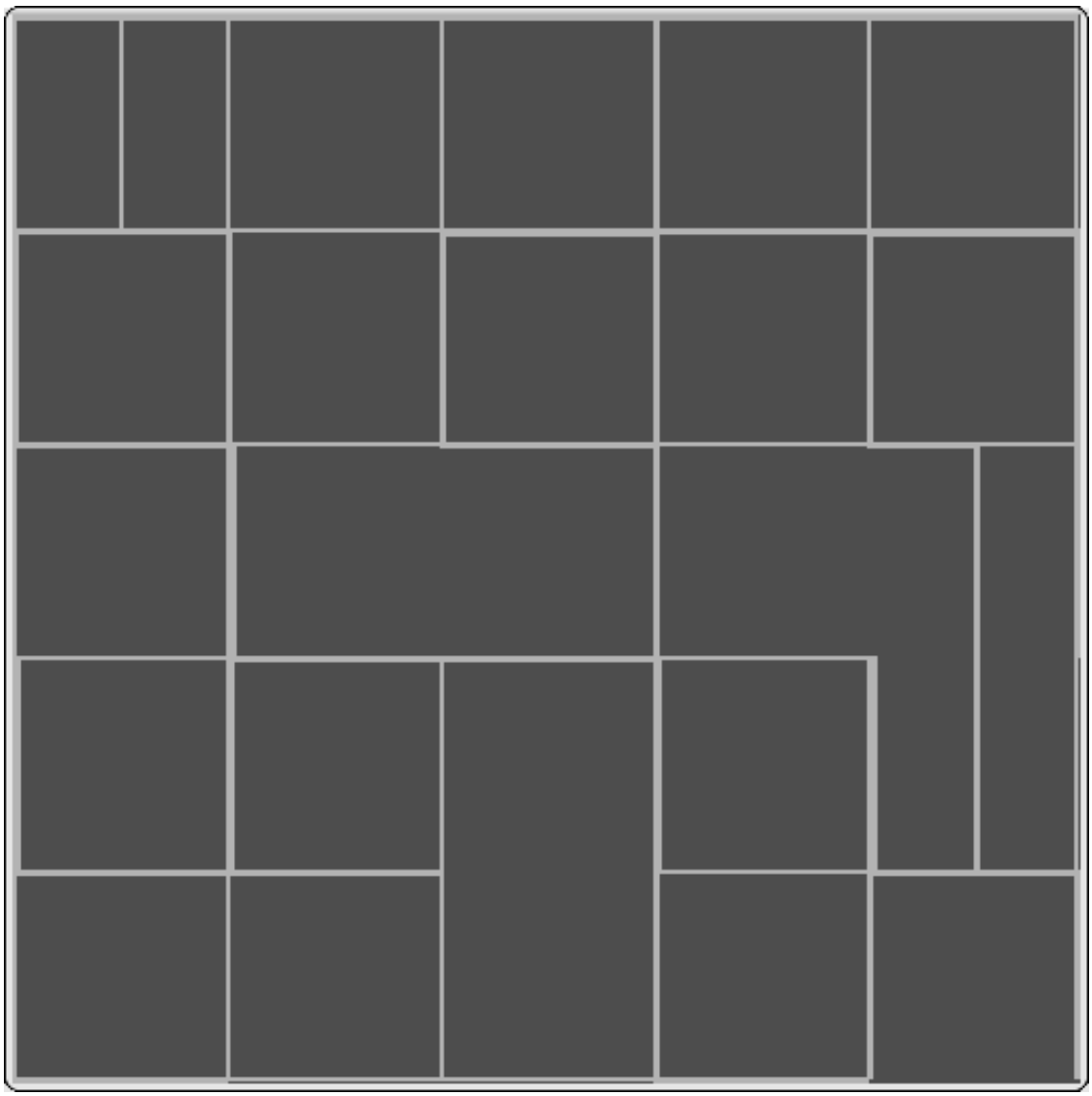

図 5.3: シミュレータ

5.4.1 混雑度と歩行速度の関係

まず、実験エリア $500 \times 500m^2$、歩行者 200 人の時の、各リンクの歩行者速度と、平均混雑度を測定した。第 3.5 節の、図 3.3 より、混雑度が大きくなると歩行速度が小さくなると考えられる。また、混雑度に比例して歩行速度が遅くなると考えられる。基礎実験は、表 5.2 のような条件で行った。実験結果を図 5.4 に示した。

表 5.2: 基礎実験 (1) 条件

歩行者数	200 人
自由歩行速度	$1.0m/sec$、$1.5m/sec$、$2.0m/sec$
最低歩行速度	$0.5m/sec$
加速度	$0.25m/sec^2$
実験エリア	$500 \times 500m^2$
ノード数	40
リンク数	62
リンク長	$50 \sim 200m$
幅員	$2.0 \sim 5.0m$

5.4.2 歩行速度と幅員の関係

次に、歩行速度と幅員の関係を測定した。1 つのリンクで、幅員を変えた時の全歩行者の平均歩行速度を測定した。実験条件を表 5.3 に示す。実験結果は、10 回測定した結果を図 5.5、その平均値を図 5.6 に示す。

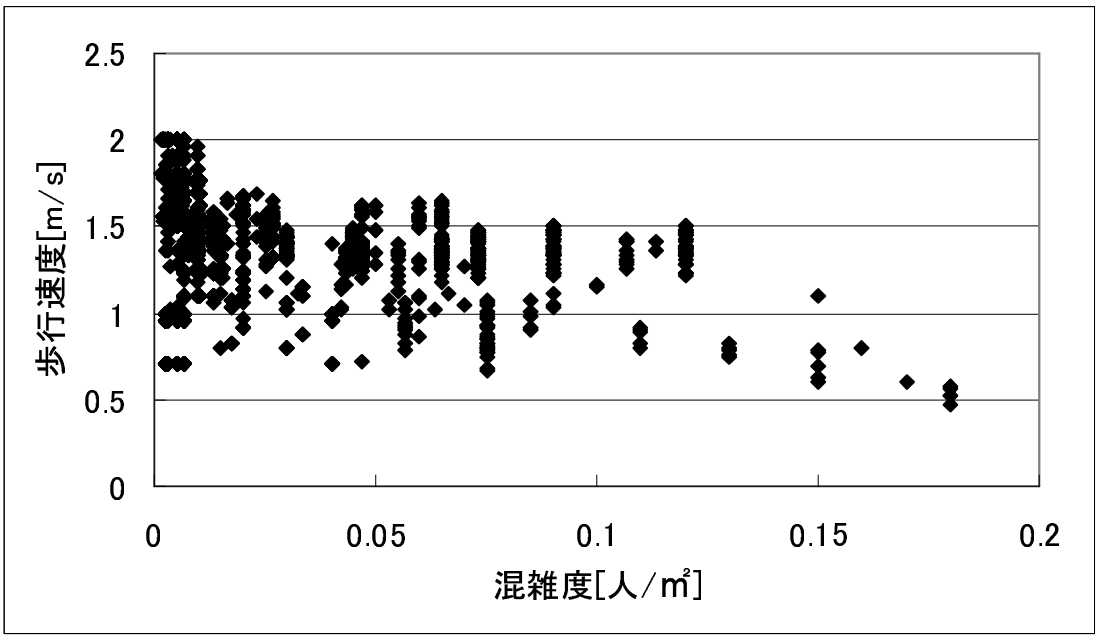

図 5.4: 歩行速度と混雑度の関係

表 5.3: 基礎実験 (2) 条件

歩行者数	99[人]
自由歩行速度	1.0, 1.5, 2.0 [m/s] (各 33 人)
最低歩行速度	0.5[m/s]
加速度	0.25[m/s^2]
リンク長	100[m]
幅員	$2 \sim 5$[m]

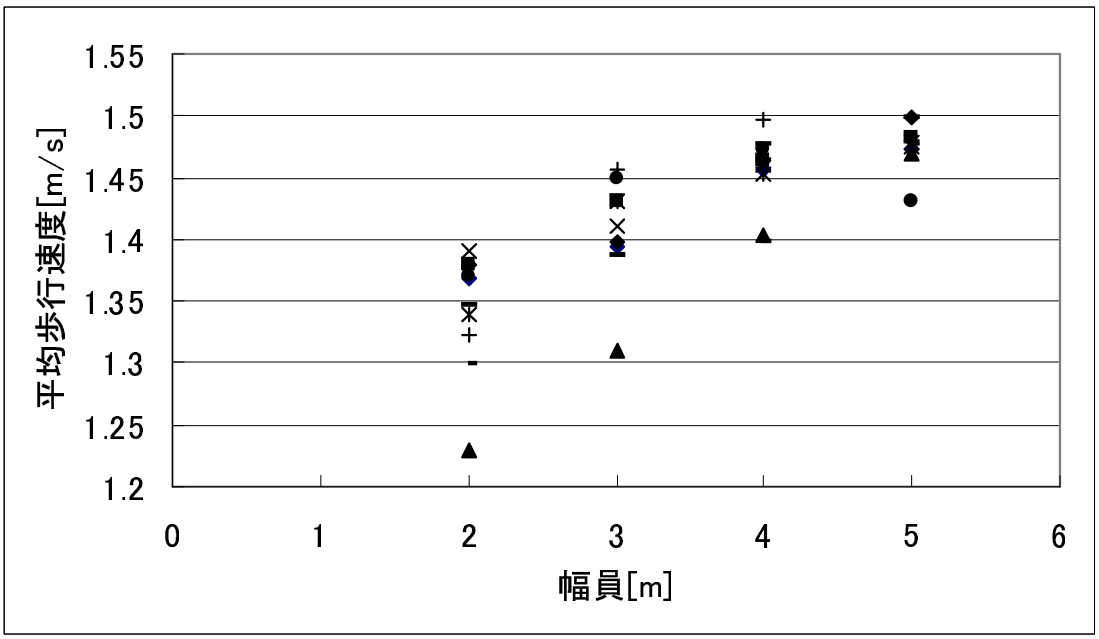

図 5.5: 歩行速度と幅員の関係 (10 回)

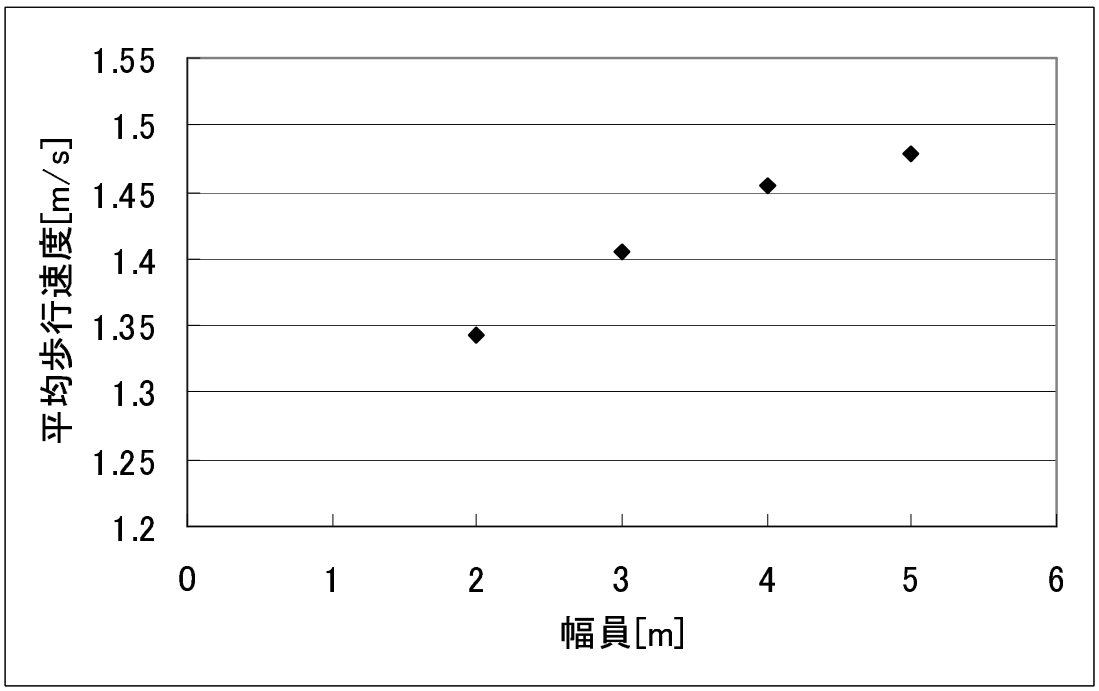

図 5.6: 歩行速度と幅員の関係 (平均値)

5.4.3 考察

本研究システムの導出経路評価のためにシミュレータを作成した。また、シミュレータが実世界環境の歩行者をシミュレーションできるか実証するため、基礎実験を行った。実験結果より、混雑度にほぼ比例して、歩行速度が遅くなっているのがわかる。また、幅員にほぼ比例して、歩行速度が速くなっているのわかる。

本シミュレータにより、前提条件に基づき、実世界環境の群集の移動のシミュレーションが、出来たものと考えられる。よって、本シミュレータを用いて、本システムの導出経路の、評価を行うこととする。

第 6 章

評価

6.1 評価方法

作成したシミュレータ上でシミュレーションを行い、本システムにより経路を導出し、導出経路の評価を以下のように行った。

6.1.1 ユーザの要求の反映

本評価実験では、ユーザの要求を考慮した経路を導出した時、本システムによりどの程度ユーザの要求を反映できるかを明らかにする。

本システムでは、群集の移動情報からユーザの要求を反映させた最適経路の導出を行う。既存システムでは、単純に距離が短い経路を導出しているため、導出される経路は所要時間が長い、あるいは混雑度が高い場合がある。

本評価実験では、最適経路がどの程度所要時間を短縮できるか、あるいはどの程度混雑を避けることができるかを既存システムの導出経路である最短経路と所要時間や混雑度を比較することにより示す。

また、本システムにより道路工事や障害を避けることができるかを示す。

所要時間を考慮した経路

本システムによって所要時間がどの程度短縮できるかを明らかにする。既存システムでは、単純に距離が短い経路を導出しているため、導出される経路は所要

時間が長い場合がある。本システムでは、各リンクの所要時間を重み係数とすることにより、所要時間を考慮した経路を導出できる。本評価実験では、各リンクの重み係数を所要時間とした最適経路 (最速経路) を導出し、導出された経路と、既存システムの導出経路である最短経路の所要時間を比較し、本システムによってどの程度所要時間を短縮する効果が見られるかを示す。また、目的地までの距離によって所要時間を短縮する効果がどのように変化するかを示す。

混雑度を考慮した経路

本システムによって混雑をどの程度避けることができるかを明らかにする。既存システムでは、単純に距離が短い経路を導出しているため、導出される経路は混雑している場合がある。本システムでは、各リンクの混雑度とリンク長をかけた値を重み係数とすることにより、混雑度を考慮し、比較的距離の短い経路を導出できる。本評価実験では、経路導出に用いる各リンクの重み係数を混雑度とリンク長をかけた値とした最適経路を導出し、導出された経路と、既存システムの導出経路である最短経路の混雑度を比較し、本システムによってどの程度混雑を避ける効果が見られるかを示す。また、目的地までの距離によって混雑を避ける効果がどのように変化するかを示す。

本システムでは、経路導出に用いる各リンクの重み係数を混雑度とリンク長をかけた値とした。混雑度のみを重み係数とした場合、目的地までの距離が短い経路が混雑しているときに、導出される経路が長くなることが考えられる。そのため、重み係数に混雑度だけでなくリンク長も考慮に入れることにより、混雑度を避け、なおかつ比較的距離も短い経路を導出する。本評価実験では、導出された経路と最短経路の経路長を比較し、本システムによってどの程度経路の距離が長くなるのかを示す。

道路工事、障害の検出

本システムによって道路工事や障害を避けた経路を導出できることを示す。既存システムでは、単純に距離が短い本評価実験では、あるリンクに道路工事や障害が生じたと仮定し、経路の導出を行い評価を行った。評価実験に用いる閾値は、第 5.4.1 節の基礎実験の結果から設定した。

6.1.2 混雑度の変化に伴う最適経路の変化

本システムにより導出される経路が、ユーザが目的地まで歩行する間に、他の歩行者の移動によってどのように変化するかを示す。各リンクの混雑度は、歩行者の移動に伴いリアルタイムに変化する。本システムは、各リンクの混雑度などをリアルタイムに計算し経路を導出する。そのため、ユーザが目的地まで歩行する間にシステムが導出する経路が変化する。導出経路の変化を、各リンクの混雑度と共に示した。

6.2 実験結果

6.2.1 ユーザの要求の反映

本システムを用いて、所要時間を考慮した経路、混雑度を考慮した経路、道路工事・障害を考慮した経路をそれぞれ導出し、最短経路と比較した。歩行者を 200 人とし、実験を行った。

所要時間を考慮した経路

図 6.1 に所要時間を考慮した、最速経路を示す。最短経路との所要時間との比較は、表 6.1 に示す。

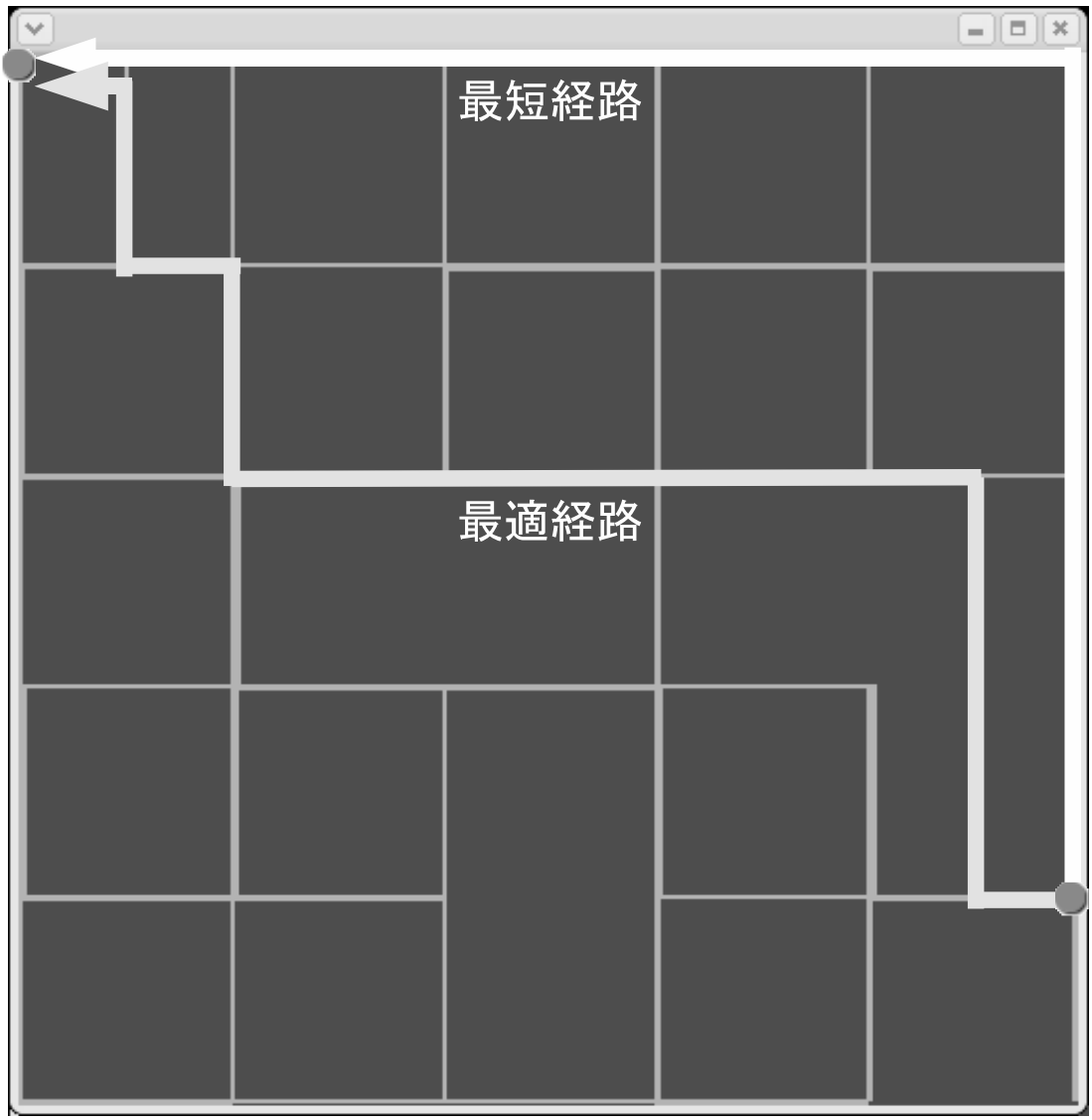

図 6.1: 所要時間を考慮した経路

表 6.1: 最速経路と最短経路の所要時間

	最適経路 (最速経路)	最短経路
距離	900[m]	900[m]
所要時間	494[sec]	627[sec]

次に、最短経路と、最速経路の所要時間と経路の距離の関係を図 6.2 に示した。また、最短経路の所要時間に対する最短経路の所要時間の割合を図 6.3 に示した。

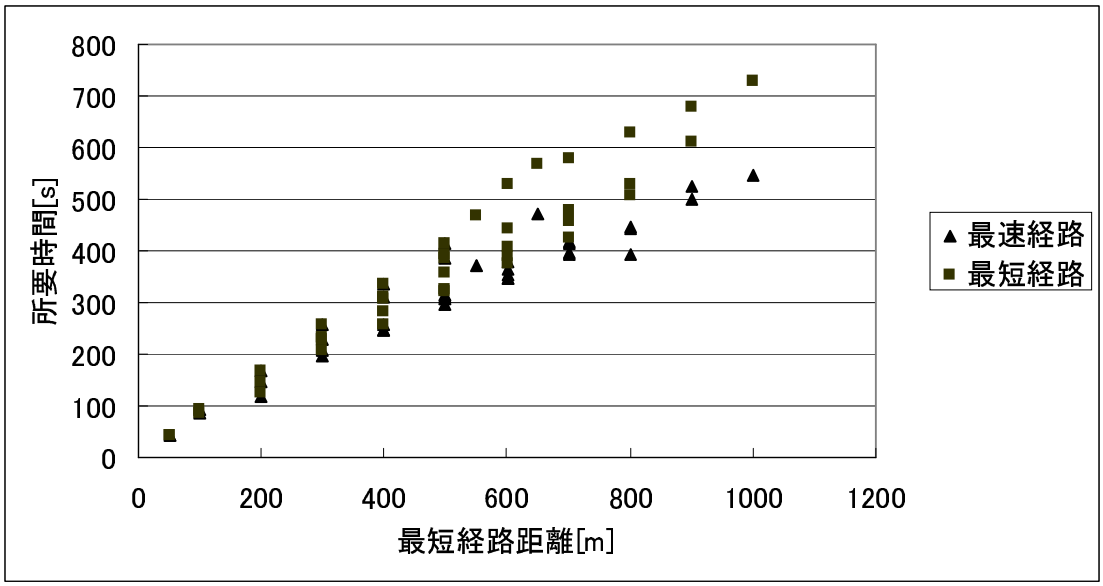

図 6.2: 最速経路と最短経路の所要時間

混雑度を考慮した経路

歩行者が混雑度を考慮した経路を要求した場合の、本システムにより導出された経路と、その出発地と目的地が同一の最短経路を図 6.4 に示す。

混雑度などの結果は、表 6.2 のようになった。

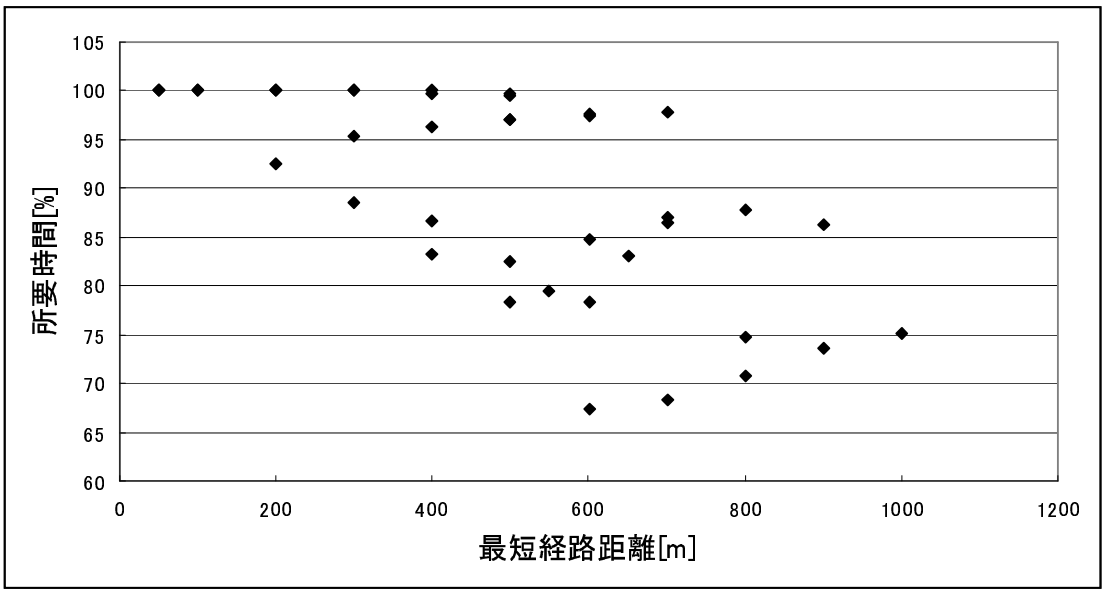

図 6.3: 最速経路と最短経路の所要時間の割合

表 6.2: 混雑度を考慮した経路の混雑度

	最適経路 (混雑度)	最短経路
距離	1100[m]	900[m]
混雑度	0.026[人/m^2]	0.040[人/m^2]

次に、最短経路と混雑度を考慮した最適経路の距離と混雑度の関係を、図 6.5 に示した。また、最短経路と最適経路の混雑度の比較を図 6.6 に示した。最短経路の混雑度に対する最適経路の混雑度の割合を示した。

最短経路と混雑度を考慮した最適経路の距離を、図 6.7 に示した。また、最短経路の距離に対する最適経路の距離の割合を図 6.8 に示した。

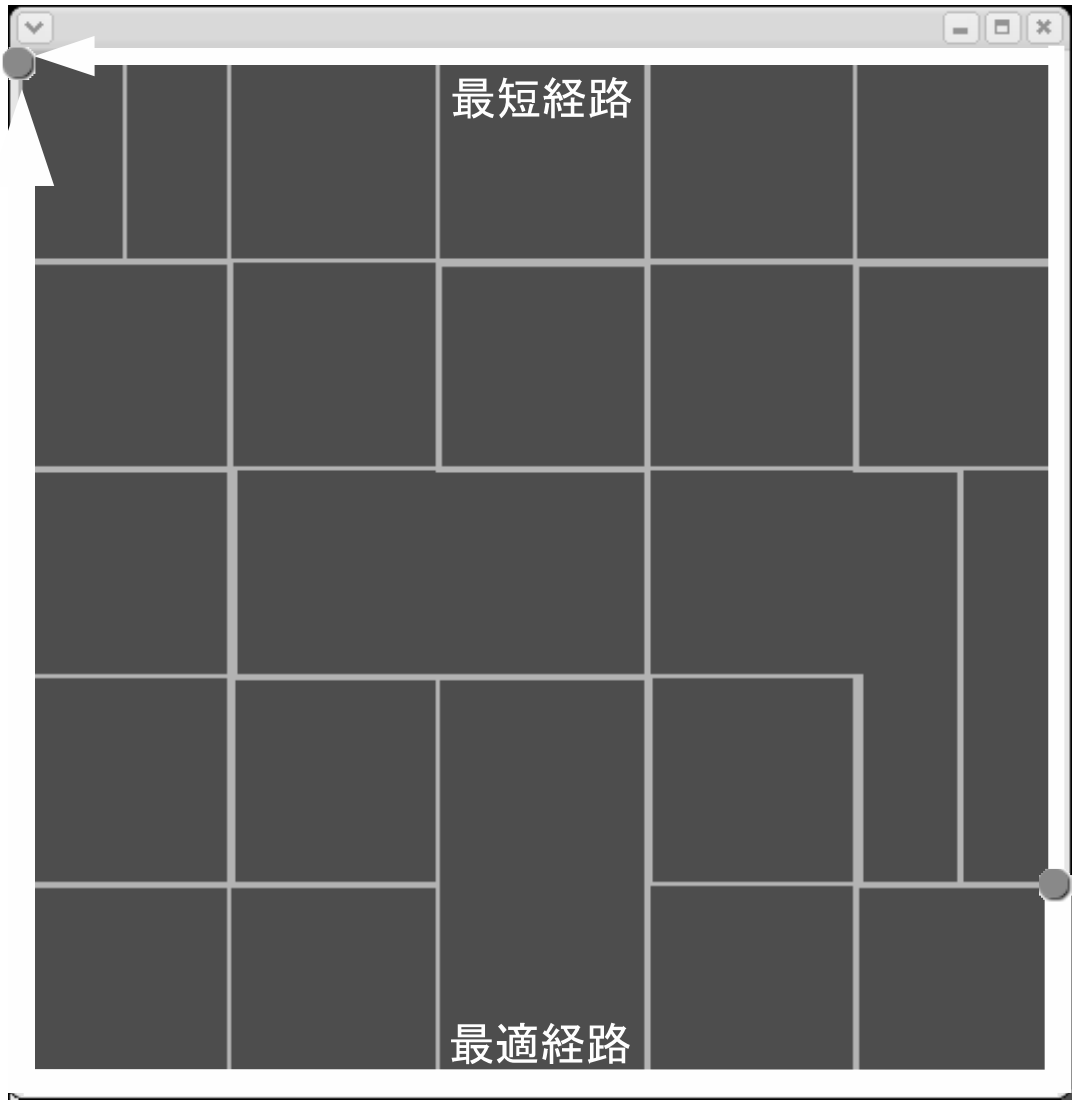

図 6.4: 混雑度を考慮した経路

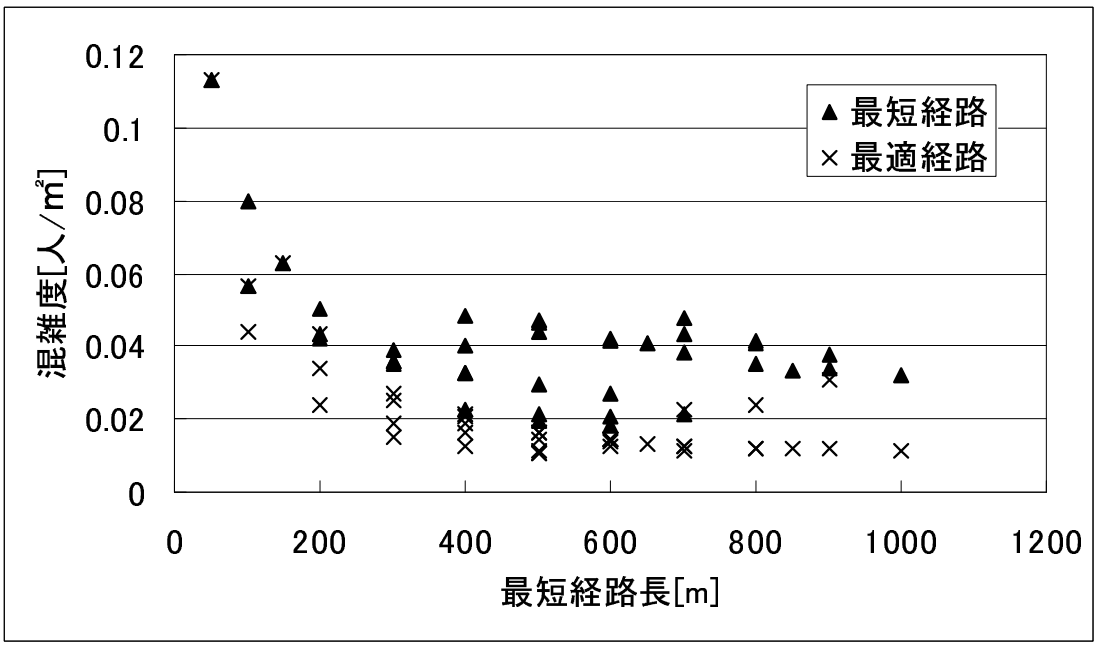

図 6.5: 距離と混雑度の関係

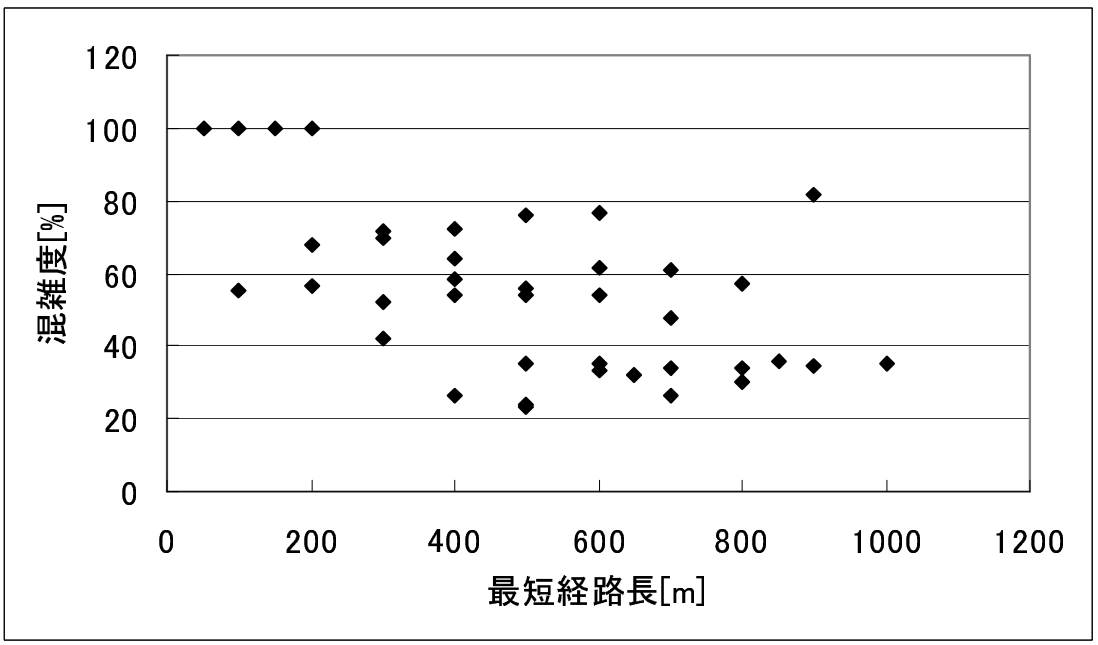

図 6.6: 最短経路と最適経路との混雑度の比較

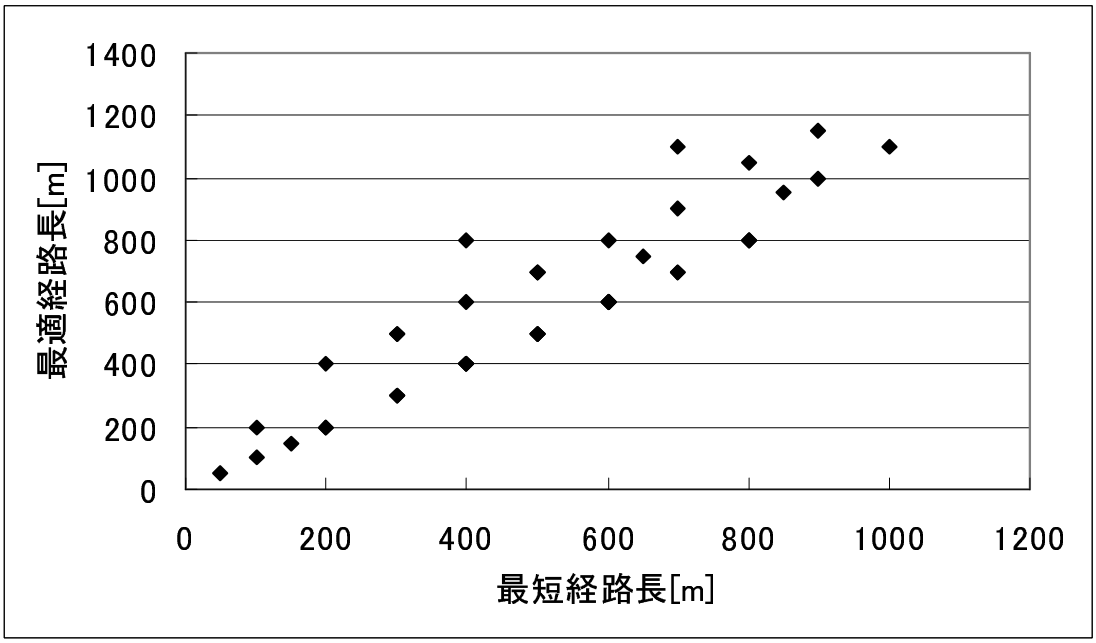

図 6.7: 最短経路と最適経路の距離

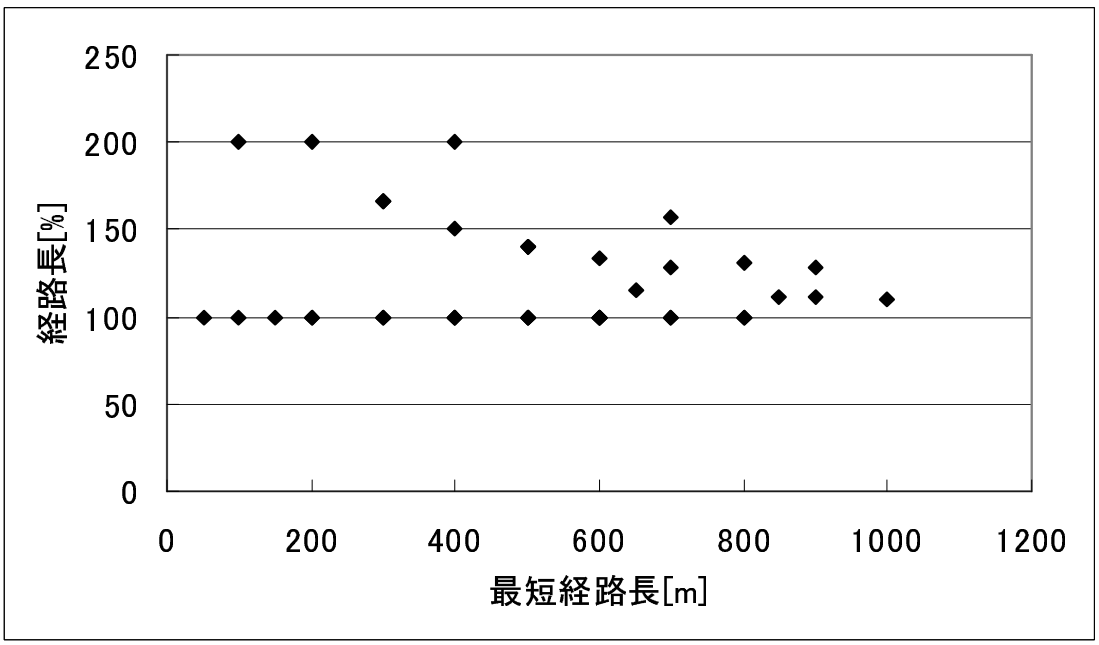

図 6.8: 最短経路と最適経路の距離の比較

道路工事、障害、坂、階段を考慮した経路

第 5.4 節の基礎実験結果 (図 5.4) より、混雑度が 0.05[人/m^2] 以下の場合、歩行速度は 0.7[m/s] 以上であることから、混雑度の閾値 th_d を 0.05[人/m^2] 、歩行速度の閾値 th_v を 0.7[m/s] とおく。図 6.2 に示した混雑度を考慮した経路上に、道路工事などが生じたとし、経路の再探索を行った。再探索により導出された経路は、図 6.9 に示した。また、そのときの経路の混雑度を表 6.3 に示した。

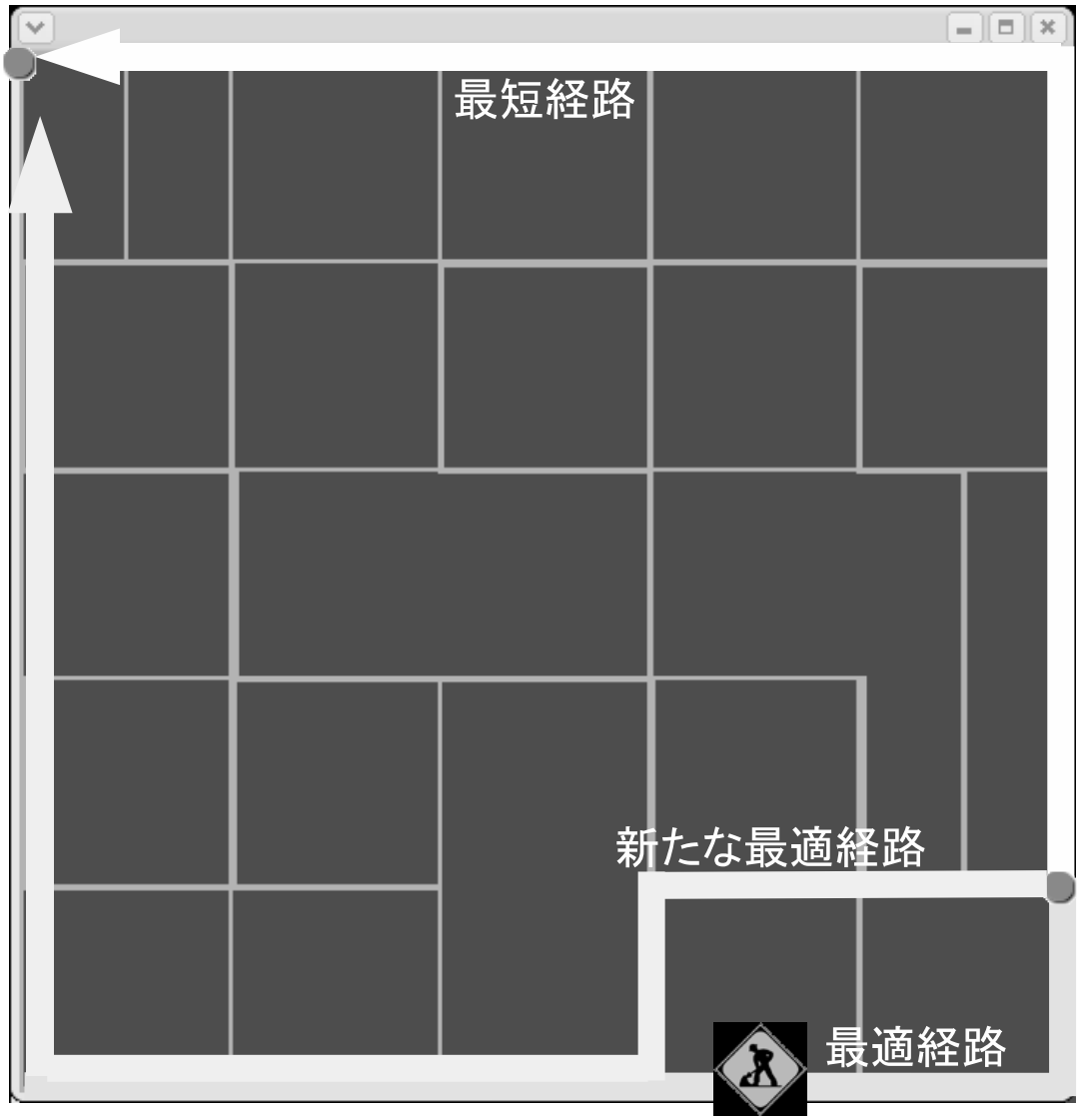

図 6.9: 道路工事を考慮した経路

表 6.3: 道路工事を考慮した経路の混雑度

	最適経路 (混雑度)	最適経路 (道路工事)
距離	1100[m]	1100[m]
混雑度	0.026[人/m^2]	0.031[人/m^2]

6.2.2 混雑度の変化に伴う最適経路の変化

各リンクの混雑度は、歩行者の移動に伴いリアルタイムに変化する。導出経路の変化を、各リンクの混雑度と共に示した。実験は、図 6.10 の経路で行った。図中の数字はノード ID を示す。本評価実験は、ノード 5 からノード 37 までをユーザが通行するとして行った。このとき、ノード 5、12、18、25、30、37 を結んだ経路が最短経路である。最短経路が混雑しているものとして、ノード 5 とノード 37 の間を歩行者 100 人が歩行するものとした。また、最短経路以外を歩行者 200 人が歩行するものとし、ユーザがノード 5 からノード 37 まで歩行した時の導出経路の変化を示した。

まず、ユーザがノード 5 にいるとき、導出された経路は、$5 \rightarrow 6 \rightarrow 13 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 32 \rightarrow 32 \rightarrow 31 \rightarrow 38 \rightarrow 37$ となった (図 6.11) 。

本システムでは、ユーザが次のノードに到達するまでに次のノードから目的地までの経路を導出する。歩行者の移動により、各リンクの混雑度が変化した場合、導出される経路も変化する。ユーザがノード 19 に到達するとき、導出される経路が変化し、導出された経路は、$19 \rightarrow 18 \rightarrow 25 \rightarrow 26 \rightarrow 31 \rightarrow 38 \rightarrow 37$ となった (図 6.12) 。ユーザがノード 5 を出発するときに導出された経路と、 19 に到達したとき導出された経路で経路が異なる区間は、ノード 19 からノード 31 の間である。この区間の、それぞれの混雑度と距離、重み係数について表 6.14 に示した。

ユーザがノード 25 に到達するときにも導出される経路が変化し、導出された経

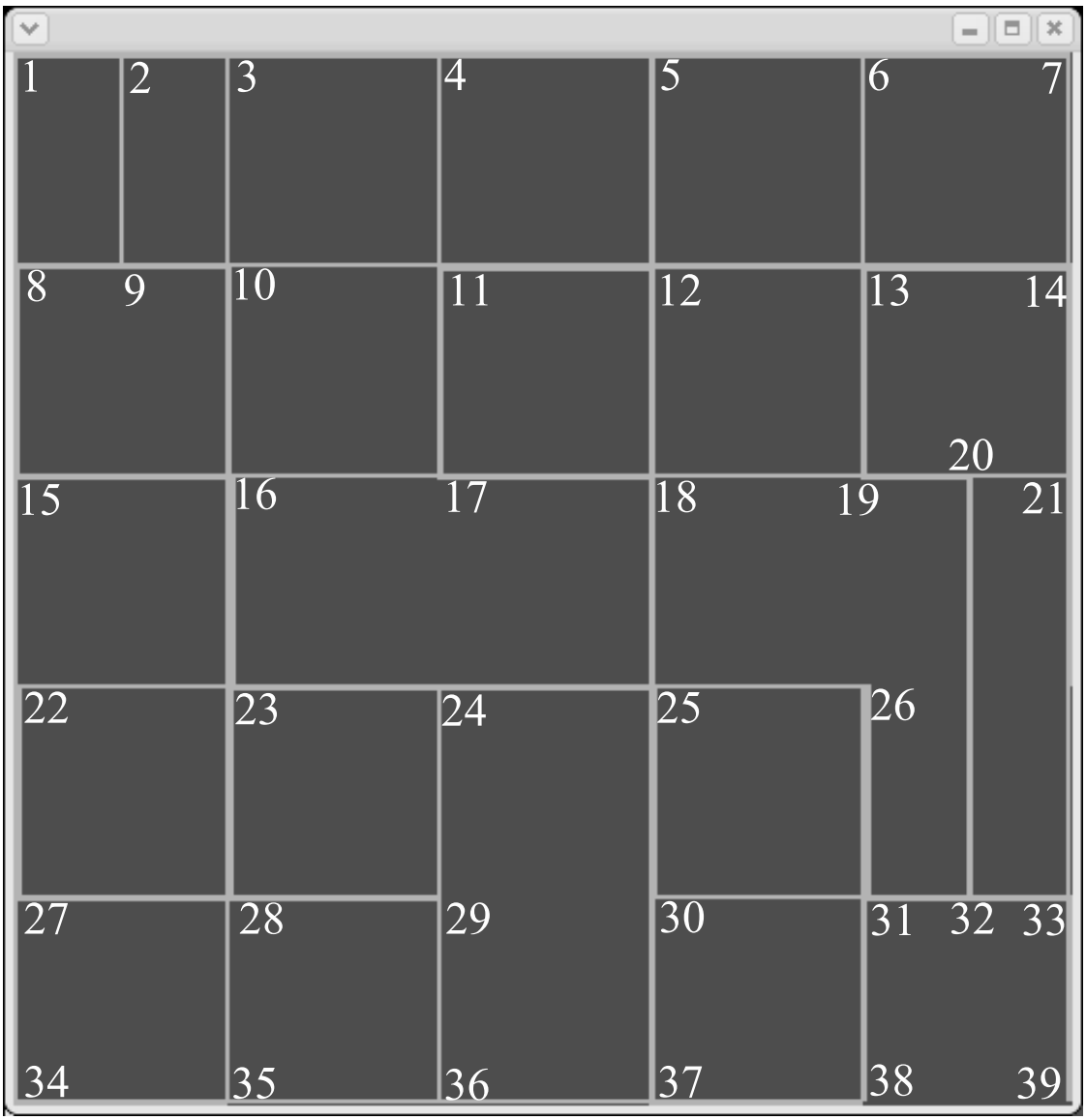
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
20
15
16
17
18
19
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39

図 6.10: 実験環境

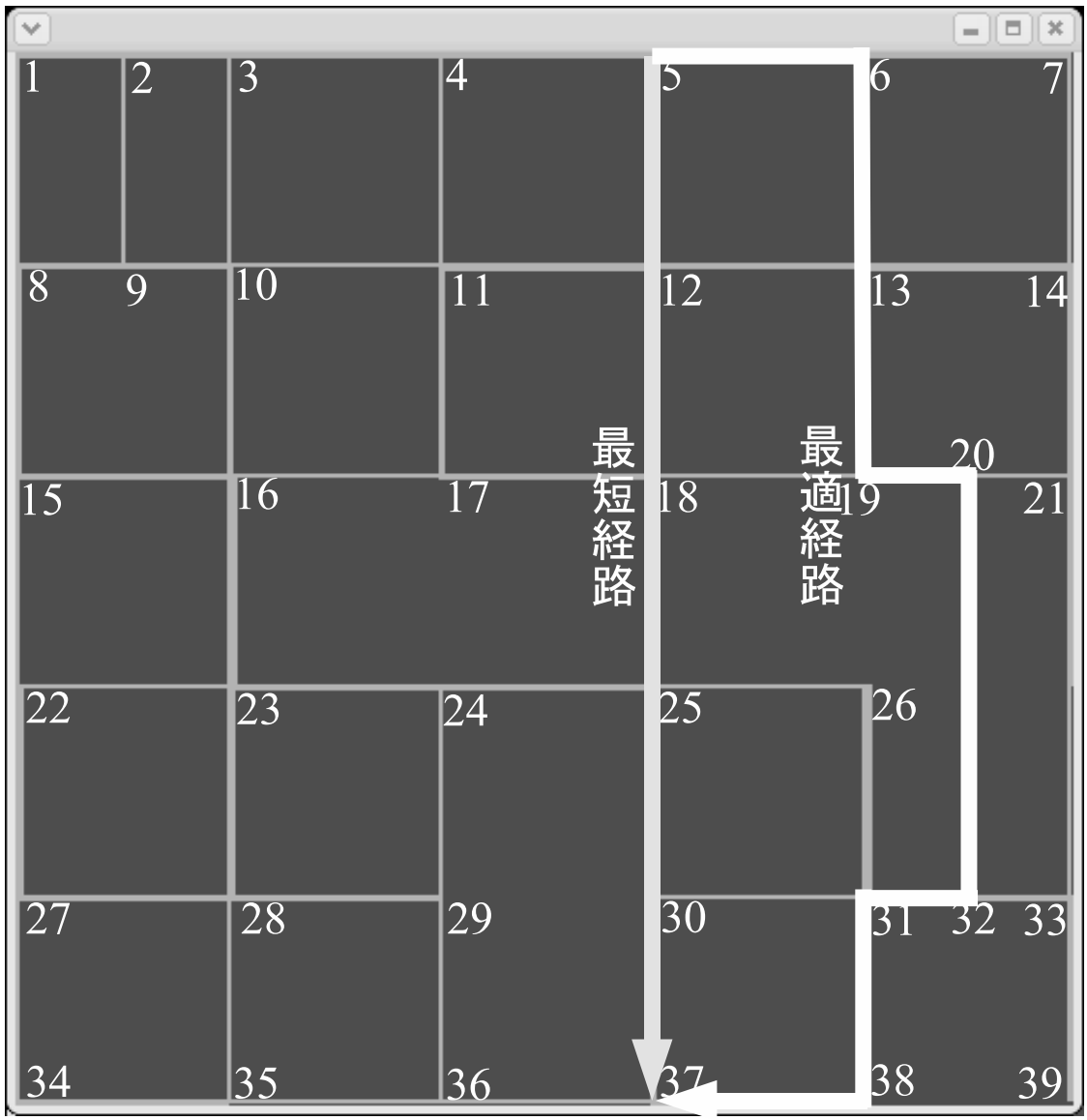

図 6.11: ノード 5 → 37 の最適経路

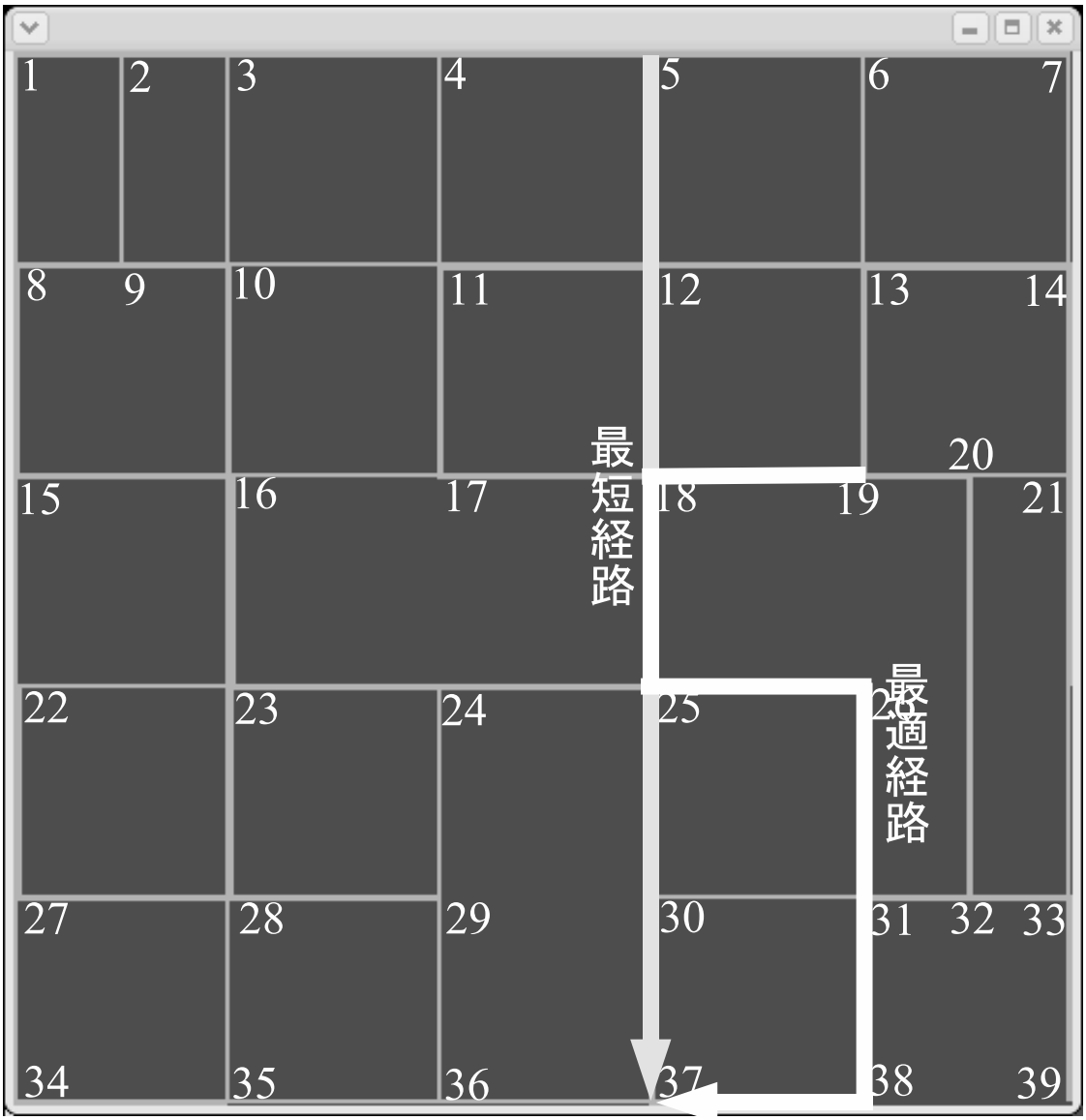

図 6.12: ノード 19 → 37 の最適経路

表 6.4: 最適経路の比較 (ノード 19 → 31)

ノード	19 → 18 → 25 → 26 → 31	19 → 20 → 32 → 31
混雑度 [人/m^2]	0.0183	0.0266
距離 [m]	400	300
重み係数 (距離 × 混雑度)	7.33	8.00

路は、25 → 24 → 29 → 36 → 37 となった (図 6.13) 。ユーザがノード 19 に到達するときに導出された経路とノード 25 に到達するときに導出された経路の、それぞれの混雑度と距離、重み係数について表 6.5 に示した。

表 6.5: 最適経路の比較 (ノード 25 → 37)

ノード	25 → 24 → 29 → 36 → 37	25 → 26 → 31 → 38 → 37
混雑度 [人/m^2]	0.0122	0.0193
距離 [m]	400	400
重み係数 (距離 × 混雑度)	4.88	7.73

つまり、ユーザが歩行している間に経路が変化し、最終的にユーザが歩行した経路は図 6.14 のようになった。

また、ユーザが歩行した経路と最短経路の混雑度は、表 6.6 のようになった。

図 6.13: ノード 25 → 37 の最適経路

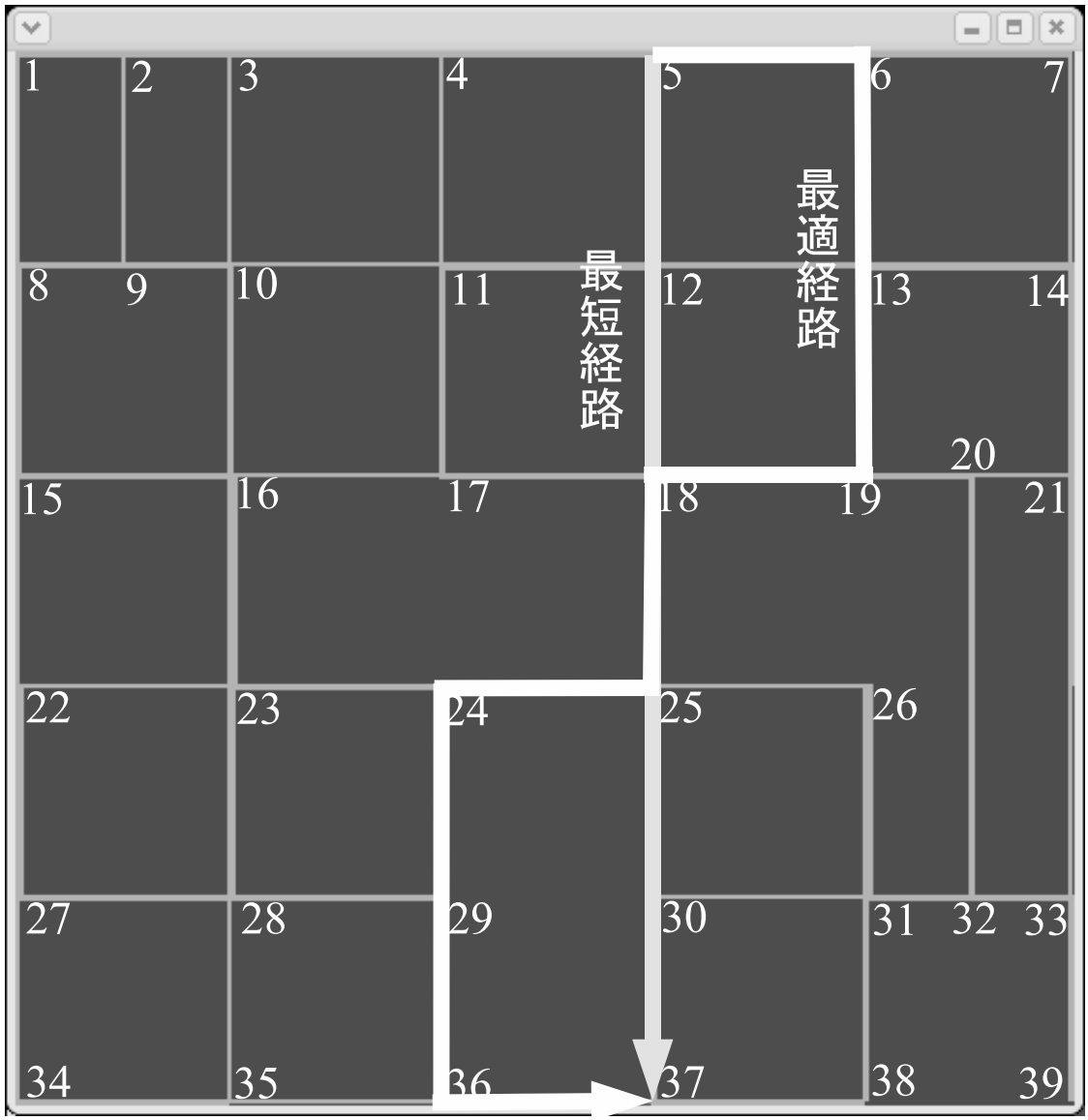

図 6.14: ユーザが歩行した最適経路

表 6.6: ユーザが歩行した経路と最短経路の混雑度

	最適経路	最短経路
混雑度 [人/m^2]	0.0268	0.0625
距離 [m]	500	900

6.3 考察

6.3.1 所要時間を考慮した経路

本評価実験では、所要時間を考慮した最適経路 (最速経路) を導出し、導出された経路と、最短経路の所要時間を比較した。

経路の所要時間は、経路の混雑度や道路工事などの有無、坂や階段によって変化する。また、既存システムの導出経路である最短経路では、経路が混雑している、あるいは道路工事が行われている、坂や階段であるような場合、所要時間が長くなると考えられる。また、既存システムでは、これらを避けた経路を導出することができない。本システムでは、各リンクの所要時間を各リンク上にいる歩行者の平均歩行速度とそのリンク長によって求め、各リンクの重み係数として用いることにより最速経路を導出することができる。

本評価実験では、各リンクの所要時間を重み係数として最速経路を導出し、最速経路と最短経路の所要時間を比較した。図 6.1 の実験では、表 6.1 より、経路の距離は変わらないが、およそ 21% 所要時間を短縮することができた。図 6.1 の実験では、最速経路も最短経路と同じ距離、つまり、最短経路である。しかし、既存の歩行者ナビゲーションシステムでは、同じ距離の経路がある場合でも、最速経路の方を導出することができない。

また、図 6.2 、図 6.3 より、距離が長くなるほど最短経路に比べ、所要時間を短

縮することができ、最大で約 32% 所要時間を短縮できた。これは、距離が長くなるほどリンク数が増えるため、経路の選択肢が増え、最短経路以外の経路が多く存在するためであると考えられる。逆に、距離が短い場合、選択肢が少ないために、所要時間の短縮があまりできないと考えられる。

本結果より、目的地に早く到着したいユーザに対して、本システムを用いて有用な経路が導出できると考えられる。

6.3.2 混雑度を考慮した経路

本評価実験では、混雑度を考慮した最適経路を導出し、導出された経路と、最短経路の混雑度を比較した。

既存システムの導出経路である最短経路では、経路が混雑することが考えられる。また、既存システムでは、混雑を避けた経路を導出することができない。本システムでは、各リンクの混雑度を各リンク上にいる歩行者数とリンク長、幅員によって求め、混雑度とリンク長をかけた値を各リンクの重み係数として用いることにより、混雑度を考慮した最適経路を導出することができる。また混雑度だけでなくリンク長をかけることにより、混雑を避けるとともに比較的距離の短い経路を導出できる。

本評価実験では、各リンクの混雑度とリンク長をかけた値を重み係数として、混雑度を考慮した最適経路を導出し、最適経路と最短経路の混雑度を比較した。表 6.2 より、最短経路と比較し、経路全体で混雑度を約 35% 低くした経路を導出できた。また、経路長は約 22% 長くなった。混雑度とリンク長をかけた値を重み係数として用いることで、混雑を避け、なおかつ距離が長くなるのを抑えることができたと考えられる。

また、図 6.5 、図 6.6 より、距離が長くなるほど最短経路に比べ混雑度を低くすることができ、最大で約 78% 混雑度が低い経路を導出できた。これは最速経路の場合と同様、距離が長くなるほど選択肢が増え、最短経路以外の経路が多く存在す

るためであると考えられる。逆に経路の距離が短い場合、選択肢が少ないために、混雑度を低くすることができないと考えられる。

図 6.7、図 6.8 より、経路の距離が長くなるほど最短経路と最速経路の距離はあまり変わらないことが分かる。これも距離が長くなると経路の選択肢が増え、最短経路とさほど距離が変わらない経路でも混雑度の低い経路を導出できるためであると考えられる。また、混雑度と距離をかけた値を各リンクの重みとして用いることにより、最短経路に比べ混雑度が低くなおかつ距離があまり長くない経路を導出できたと考えられる。

混雑を避けたいユーザに対して、本システムを用いて有用な経路が導出できたと考えられる。

6.3.3 道路工事を考慮した経路

基礎実験の結果、図 5.4 より、混雑度が低い場合 (0.05[人/m^2] 以下) 、歩行速度は 0.7[m/s] 以上であった。この結果から、混雑度の閾値 th_d を 0.05[人/m^2] 、歩行速度の閾値 th_v を 0.7[m/s] とおき、道路工事を検出し、それを避けた経路の導出を行った。リンクの混雑度が 0.05[人/m^2] 以下であるにも関わらず、歩行速度が th_v を 0.7[m/s] を下回った時、そのリンクが道路工事あるいは障害が生じたものと推測し、そのリンクを避けた経路を導出した。この場合、混雑度の最も低い経路に比べ、混雑度は約 19% 高くなった。しかし、最短経路と比較すると約 22% 混雑度が低く、十分有用な経路であると考えられる。

6.3.4 所要時間・混雑度の変化に伴う最適経路の変化

実験では、各リンクの混雑度をリンク長とかけた値を各リンクの重み係数として、ノード 5 からノード 37 までユーザが歩行したときの導出された経路を示した。ユーザがノード 19 とノード 25 に到達したとき、混雑度の変化により導出される経路も変化した。

本システムでは、リアルタイムに歩行者の移動情報を収集し、それらを用いて経路導出を行う。歩行者が移動すると各リンクの混雑度や所要時間も変化する。つまり、歩行者の移動によって本システムが導出する経路も変化する。また、実験結果のように、最初に導出された経路よりも実際に歩行した経路は距離が長くなってしまう場合がある。本システムでは、その時点での最適経路を導出することができるが、最終的にはその経路が最適な経路とならない場合がある。しかし、表 6.6 より、最短経路に比べ、混雑を避けることができ、十分有用な経路が導出できると考えられる。最終的に最適である経路を最初に導出することは困難である。また、最速経路の場合も同様のことが言えると考えられる。

第 7 章

問題点と課題

7.1 本システムのユーザ数の影響

本システムでは、経路の混雑度に着目し、混雑を避けた最適経路を導出した。そのため歩行者中のユーザの占める割合が高い場合、多数のユーザが混雑を避けようとし、本来混雑していないはずの経路がユーザによって混雑してしまう可能性がある。

このように、多数のユーザが同一の経路を通行し、混雑が生じてしまう場合への対処法としてユーザを複数の経路へ誘導することが考えられる。ユーザが多数存在する場合、最適経路から順にいくつかの経路を用意し、経路の通りやすさを一定に保つようなことができると考えられる。

7.2 移動情報の誤差

本システムでは、歩行者から送信される位置座標と時刻の誤差については考慮していない。しかし、実際には歩行者から得られる位置座標にはある程度の誤差が含まれると考えられる。現在、GPS の位置精度は誤差 10m 程度である。また、歩行者と通信を行うときの通信速度も、時刻の誤差が発生する原因になると考えられる。また、本システムでは、歩行者の位置座標から経路を導出するために高い精度の位置座標と時刻が要求される。

既存の技術で本システムを実装するには、これらの誤差を何らかの方法で補正する必要があると考えられる。また、現在 DGPS (Differential GPS) や RFID 、無線 LAN などによる、高精度な位置同定技術の開発が進んでいる。近い将来、これらの新たな技術が普及すれば、より精度の高い移動情報が利用できるものと考えられる。

7.3 複数の要求への対応

本研究では、さまざまな要求を考慮した経路の導出を行い、最速経路、混雑を避けた経路、坂や階段を避けた経路、道路工事や障害を避けた経路の導出手法について提案を行った。しかし、ユーザは、さまざまな要求を複数持っていると考えられ、これらの要求が組み合わされた複雑な要求に対応する必要がある。たとえば、早く目的地に着きたいが坂や階段は避けたいなどといった要求に対応する必要がある。

このような場合、それぞれの経路属性を組み合わせた重み係数を用いることにより複雑な要求に対応することが可能であると考えられる。

7.4 歩行速度の変化要因の検出

本研究では、道路工事や障害の検出を混雑度と平均歩行速度により、閾値 th_d と th_v をおき、th_d が低いにも関わらず th_v が低くなった場合に、そのリンクに道路工事や障害が生じたと推測した。しかし、歩行速度が変化する要因としては、他にも信号待ちなどにより歩行速度が変化すると考えられる。

ユーザの細かな要求に対応するためには、これらの歩行速度が変化する要因が何であるのかを検出する必要がある。

7.5 動的な閾値の設定

本研究では、閾値 th_d と th_v を基礎実験の結果から求め、閾値を固定し、道路工事などの検出を行った。

この閾値を、動的にユーザが設定可能とすることで、ユーザが自分の嗜好により近い経路を取得することができるようになると考えられる。たとえば、それほど急な坂や工事で通りにくいような状況でない場合、閾値を下げることでそのリンクを経路として探索することができると考えられる。

7.6 その他の要求を考慮した経路導出

本研究では、経路の所要時間を考慮した経路、混雑度を考慮した経路の導出を行った。また、混雑以外の要因による歩行速度の低下を道路工事や障害が生じた、あるいは階段や坂であると推測し、それらを避けた経路を導出した。そして、シミュレーションによる評価を行い、所要時間の短い経路が導出できること、混雑を避けた経路が導出できること、道路工事や障害、階段、坂を避けた経路が導出できることを実証した。しかし、第 1 章で述べたように、歩行者のさまざまな経路に関する要求があり、それらの要求を今後考慮していく必要がある。

本システムで考慮に入れた経路属性以外の属性も、移動情報やそれ以外の何らかの方法で取得することができれば、その他のユーザの要求を考慮した経路の導出は可能であると考えられる。

7.7 所要時間・混雑度の変化に伴う最適経路の変化

本研究では、経路の所要時間を考慮した経路、混雑度を考慮した経路の導出を行った。本システムでは、リアルタイムに歩行者の移動情報を収集し、それらを用いて経路導出を行う。歩行者が移動すると各リンクの混雑度や所要時間も変化し、

それに伴い導出される経路も変化する。6.2.2 の実験結果のように、最初に導出された経路よりも実際に歩行する経路は距離が長くなってしまう場合がある。本システムで導出可能な経路は、その時点での最適経路であり、最終的にその経路が最適な経路とはならない場合があると考えられる。

このような場合に対して、移動情報を統計的に分析することにより対応できると考えられる。実際の環境では、決まった時間帯、あるいは周期的に混雑度が高くなることが考えられる。例えば、通勤・通学の時間帯にはある経路が混雑度が高くなり、信号待ちや電車の到着などにより周期的に混雑度が高くなる状況が考えられる。これらの状況に対し、移動情報を統計的に分析することにより対応できると考えられる。

7.8 実環境への適応

本研究では、シミュレータを作成し、シミュレーションにより、本システムによる導出経路の評価を行った。今後、システムを実環境での経路導出に適応させ、導出経路が適当であるかどうか評価をする必要があると考えられる。例えば、本システムによって導出された経路を実際に歩行してもらい、ユーザにとって実際に有効な経路であるかどうか調査を行う必要があると考えられる。

第 8 章

終わりに

本研究では、既存の歩行者ナビゲーションシステムで導出されている最短経路に代わる、最適経路の導出法を提案した。「空いた道を通りたい」、「目的地に早く到着したい」、「道路工事や障害を避けて通りたい」、「坂や階段を避けて通りたい」など、さまざまなユーザの経路に対する要求に着目し、混雑度を考慮した経路、目的地に最も早く到着する経路 (最速経路) 、道路工事や障害を考慮した経路、坂や階段を考慮した経路の導出法を提案した。

これらの経路導出には、経路の所要時間や歩行速度、混雑度といった情報が必要である。これらの情報は既存の歩行者ナビゲーションシステムで用いられている地図データから取得することができなかった。本研究では、歩行者の位置座標とその位置座標を通過した時間から歩行速度などの移動情報を計算し、移動情報からこれらの経路導出に必要な情報が得られるとして、これらの情報を用いた経路導出を行った。

本研究で作成した歩行者シミュレータで歩行者の動きをシミュレーションし、本システムにより導出された経路の評価を行った。評価実験の結果では、約 21% の所要時間の短縮した経路、約 35% の混雑度の低下した経路、道路工事や障害を考慮した経路を導出することができた。

また、所要時間を考慮した経路、混雑度を考慮した経路に関して、経路の距離が長くなるほど所要時間を短くする、混雑度を低くする効果が見られた。距離が長くなるほどリンク数が増えるため、経路の選択肢が増え、より所要時間の短い経路、

混雑度の低い経路が導出できた。

本システムでは、移動情報からその時点での最適な経路を導出する。そのため、最終的に本システムで導出された経路が最適経路ではない場合がある。しかし、経路の所要時間や混雑度はリアルタイムに変化するため、最終的に最適な経路を最初に導出することは困難である。評価実験の結果では、本システムで導出した経路により、経路の混雑度を低くする効果が見られた。本システムで導出される経路が十分有用であるという結果が得られた。

本システムにて、既存の最短経路に代わる最適経路が導出できたと言える。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、いろいろな方々にお世話になりました。

まず、指導教官の多田好克先生には日頃から熱心なご指導、そしてご鞭撻を賜わりました。また、ご多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり、大変貴重なご助言をいただきました。

また、安田絹子助手、佐藤喬助手には日頃から研究方針や研究方法に多くのご指導を頂きました。皆さんには、ご多忙にも関わらず、論文の草稿を丁寧に読んでくださり、大変貴重なご助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

そして、本研究が行なえたことは、研究方針や方法論について議論をし、共に研究生活をおくってきた多田研、そしてV.Reklaitis研の学生諸氏おかげでもあります。最後に、これらの皆さんに感謝いたします。

参考文献

[1] Jörg Baus, Antonio Krüger and Wolfgang Wahlster: "A Resource-Adaptive Mobile Navigation System," *Proceedings of the 2002 International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI'02)*, pp. 15-22, 2002.

[2] Abdelsalam (Sumi) Helal, Steven Edwin Moore and Balaji Ramachandran: "Drishti: An Integrated Navigation System for Visually Impaired and Disabled," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*, pp. 149-158, 2001.

[3] 菊池 聡敏, 八木 啓介, 屋代 智之: "PROBER —歩行者版プローブ情報システムの提案—", 情報処理学会第 13 回高度交通システム研究会 (2003-ITS-13), pp. 47-54. 2003.

[4] 白川 洋, 歌川 由香, 福井 良太郎, 重野 寛, 岡田 謙一: "歩行者ナビゲーションのための歩行履歴情報の分析手法", 情報処理学会第 25 回モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 (2003-MBL-25), pp.69-76. 2003.

[5] 山本 友理, 白川 洋, 屋代 智之, 重野 寛, 岡田 謙一: "歩行履歴情報を用いた混雑度の取得法", 情報処理学会第 66 回全国大会, Vol.3. pp. 261-262. 2004.

[6] 松田 三恵子, 杉山 博史, 土井 美和子: "歩行者の経路への嗜好を反映した経路生成", 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J87-A No.1, pp. 132-139, 2004.

[7] Celine Loscos, David Marchal and Alexandre Meyer: "Intuitive Crowd Behaviour in Dense Urban Environments using Local Laws," *Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG'03)*, pp. 122-129, 2003.

[8] 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 緊急通報機能等高度化委員会: “携帯電話からの緊急通報における発信者位置情報通知機能に係る技術的条件”, 2004.
http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/pdf/040517_3_b1.pdf.

[9] 総務省 情報通信政策局: “平成 15 年 通信利用動向調査報告書”, 2004.

[10] 株式会社三菱総合研究所: “移動体端末の GPS 利用に関する一般生活者の意識”, 2004.
http://www.mri.co.jp/PRESS/2004/pr041102_ipd01.html.

[11] E.W.Dijkstra: “A note on two problems in connection with graphs,” Numerische Math., vol.1, pp.269-271,1959.