

マップマッチングにおけるリンク選択の改善

内田 佳規¹ 鈴木 魁也¹ 西尾 信彦¹

概要: 本研究ではマップマッチングにおいて誤ったリンクを選択してしまう問題を改善する手法を提案する。マップマッチングはなどの屋内測位の測位誤差を補正する手法である。既存の手法では歩行空間ネットワークのリンク上に推定位置から射影するが、射影先のリンクの選択を誤ると実際の位置からは大きく外れてしまう。そこで本研究では、リンク選択に用いる距離スコアと角度スコアを滞在する空間の規模に応じて比率を調整し、また角度スコアを補正するためのバッファリンクを補填することでリンクの誤選択を防ぐ手法を提案する。研究室内の通路で歩行し、評価した結果、従来手法で誤選択される状況において、ほぼ解消されることが確認された。

Improving Link Selection in Map-matching

YOSHIKI UCHIDA¹ KAIYA SUZUKI¹ NOBUHIKO NISHIO¹

1. はじめに

近年、屋内測位の研究が盛んであり、ショッピングモール、駅や地下街などの大規模な屋内施設を対象としたナビゲーションサービスや、店舗内の客動線の把握やオフィスにおける社員の動態管理に活用されている。屋内では衛星からの信号が届きにくいいため、GPS (Global Positioning System) を用いた測位が困難である。よって、屋内に対応した測位技術が必要になる。

屋内で Wi-Fi や BLE (Bluetooth Low Energy) など無線技術を用いた絶対的な測位をする手法 [1][2] がある。しかし、これらの手法は、機器の設置や整備のためにコストがかかってしまう。そこでスマートフォンのみで実装可能である PDR (Pedestrian Dead Reckoning) [3] が注目を浴びている。PDR は加速度センサ・角速度センサなどを用いて歩行距離、進行方向を推定し、測位開始地点からの相対的な測位をする手法である。しかし、PDR はユーザの推定歩幅と実際の歩幅の誤差や角速度センサのドリフトによる誤差が発生し、これらが累積してしまう問題がある。そこで PDR の測位誤差を補正する必要がある。

PDR の測位誤差を補正する手法の一つにマップマッチングという技術 [4][5] がある。マップマッチングは交差点

をノードで、歩行可能な通路をリンクで表現した歩行空間ネットワークを事前に用意し活用する。マップマッチングの中にはスケルトンマッチングという手法 [4][6] があり、これは推定した位置からリンク上に補正する手法である。またスケルトンマッチングは推定した位置からリンクまでの距離 (以下、**距離スコア**)、進行方向とリンクの角度との類似度 (以下、**角度スコア**) の二つの観点からマッチングするリンクを選択する。しかし、この二つのスコアに設定されるパラメータは空間の規模が考慮されておらず、マッチングするリンクの選択を誤り、選択すべきリンクとは異なるリンク上に補正してしまった場合、その軌跡は実際に歩行した軌跡とは異なるものになってしまう。例えば、地下街のような大規模な屋内空間とスーパーマーケットのような屋内空間とでは通路幅や単位面積当たりの交差点の数が異なっているにもかかわらず、マッチングリングの判定にどの場合でも同じパラメータを利用すると誤ったリンクを選択してしまう可能性が高くなる。これは地下街のような大規模な屋内空間とスーパーマーケットのような屋内空間とでは通路幅や単位面積当たりの交差点の数が異なるからである。また U ターンをしたり、歩行距離の推定誤差により推定位置がリンクの端点を越えた場合、推定位置付近に適切なリンクがなく、マッチングすべきリンクとは異なるリンクを選択してしまう。

¹ 立命館大学 情報理工学部

そこで本研究では、測位する空間の規模に適したパラメータを定義するため、距離スコアと角度スコアに関するパラメータと通路の関係を示す。空間の規模に適したパラメータは、交差点からどれだけ離れた位置にいるか、どの方向に歩いたかの2つの視点からどのリンクを選択するかを示すことで決定する。空間の規模に適したパラメータを用いることで正しいリンクを選択することを目指す。しかし、空間の規模に適したパラメータを用いても推定軌跡がリンクの端点を越えた場合に起きる問題を直接的に解決できない。

この問題を解決するために本研究ではさらに推定軌跡がリンクの端点を越える場合でも正しい軌跡に補正するための歩行空間ネットワークを提案する。通常の歩行空間ネットワークでは推定軌跡がリンクの端点を越えてしまった場合、正しいリンクがマッチングする候補から外れてしまうことがある。推定軌跡がリンクの端点を越えても適切なリンクの端点にリンクを加えることで他の誤ったリンクにマッチングすることを防ぐ。

本研究の貢献は、マップマッチングの際にリンクを誤って選択をする場合を分析したこととその対策としてパラメータの定義と歩行空間ネットワークの手直しで防げることを示したことである。

2. 関連研究

本節では、既存のマップマッチングに関する研究について紹介する。

2.1 スケルトンマッチング

スケルトンマッチングは、歩行可能な空間をノードとリンクで表現した歩行空間ネットワークに補正を行うマップマッチングの一種の手法である。スケルトンマッチングは元来カーナビなどで利用されている技術で車道をリンクとノードで表現し、車の測位地点をリンク上に補正する。アルゴリズムはBrakatsoulsら[6]が開発した手法で、推定した位置とリンクがどれだけ離れているかを示す距離スコアとリンクの角度と進行方向がどれだけ一致しているかを示す角度スコアがあり、2つのスコアの合計が最も大きいリンクにマッチングされるというものである。

2.2 スケルトンマッチングの屋内測位への活用

田川ら[4]はBrakatsoulsらの自動車のために作成されたマップマッチングアルゴリズムが歩行者にも適応できるかを検証している。その結果、歩行者の移動軌跡がリンク上に補正され、累積した誤差を除去することができている。Kamiyaら[7]は大型ショッピングモールに向けたコンテキスト認識を用いたスケルトンマッチングを提案している。大型ショッピングモールでの歩行において店舗内の歩行は買い物をするため、通路歩行時に比べて歩き方が不規

則になる。そこでこの研究では加速度センサ・角速度センサの値から通路での歩行か、店舗内での歩行かを推定する。通路での位置推定において店舗内の歩行はノイズになるため、店舗内の歩行を位置推定への入力からは除外する。その結果、店舗への入退室を含む歩行でも通路でのスケルトンマッチングは平均して2.21mの測位誤差となった。しかし、この研究においては通路での歩行のみに着目しているため、店舗内で測位することはできない。

2.3 壁情報を用いたマップマッチング

吉見らは[5]は壁情報を用いたマップマッチングを提案している。広い通路においてリンク上に補正した場合、通路の左右どちらに寄って歩いていたかのような実際の歩行の軌跡の特徴をなくしてしまう。よって、ショッピングモールや地下街では、通路の左右にある店舗どちらに興味あるかを推定することが困難になる。そこで、この研究ではPDRの軌跡を可能な限り残し、壁と交差するような軌跡を推定しまった場合、推定を誤ったとし、歩幅・進行方向を調整することで補正する。しかし、店舗のような通路幅が狭い空間の場合、リンク上に補正するのみで事足りてしまう。

3. 事前実験と問題意識

本節では、3.1項にて事前実験についてとその結果からわかった2つのマップマッチングの問題点に関して3.2項と3.3項で述べる。

3.1 事前実験

場所は大学の研究室内で図1(a)の経路を5回歩行し、Google Pixel 3を手に保持し、加速度センサと角速度センサの値を取得し、スケルトンマッチングをした。研究室内には机や本棚が並んでおり、その間の通路が図1(b)のような歩行空間ネットワークとなっている。ノードを通るたびに時間を記録し、測位ログと照らし合わせることで推定位置がどのリンクに滞在すべきだったかを把握する。マッチングスコアに関するパラメータは立命館大学研究棟5階廊下用の値を用いている。

結果として図2のような場合を観測できた。図2の(a)は歩行経路が通った歩行空間ネットワークを示す。図2の(b)はスケルトンマッチング結果例を示し、推定位置の色はマッチングすべきリンクの色を示している。誤ったリンクを選択した箇所はUターンをする時とUターンから帰ってきたT字路である。

3.2 空間の規模に適していないパラメータの問題点

図3は図2の(b)のマッチング結果の中でUターンから戻ってくるT字路に付近のステップを示している。また表1は21歩目のマッチングスコアである。マッチングす

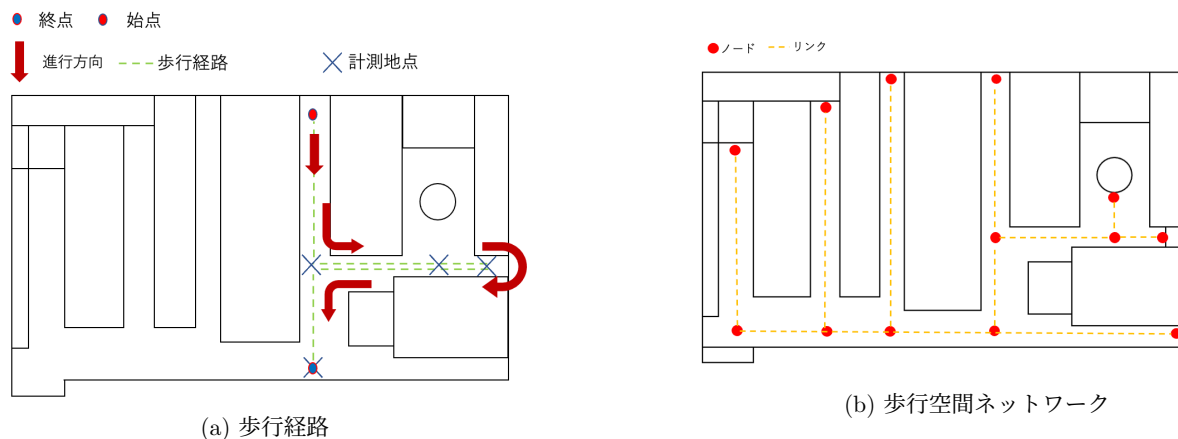


図 1: 大学の研究室

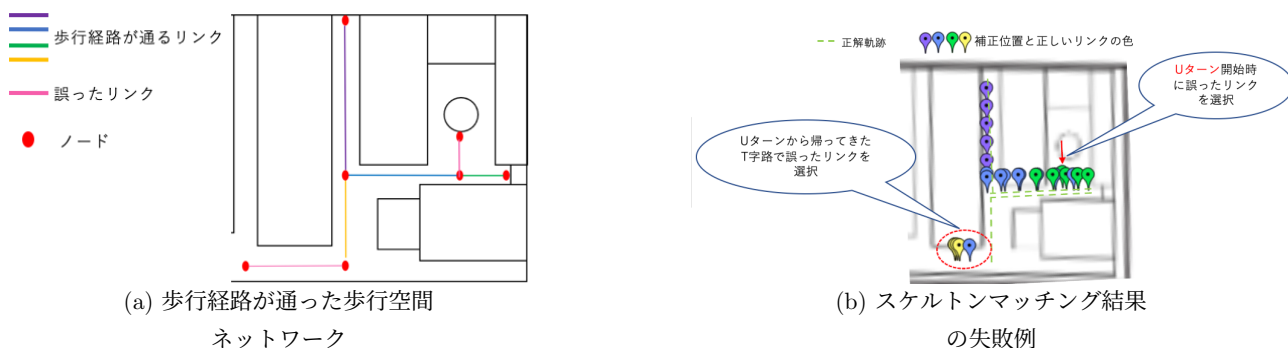


図 2: スケルトンマッチング結果

るリンクは距離スコアと角度スコアの合計が最大となるリンクである。この結果から、距離スコアより角度スコアの方がマッチングに関して強い影響を与えてしまっていることがわかる。

空間の規模によっては通路幅であったり、単位面積当たりの交差点の数が異なってくる。図 4 は研究棟 5 階のフロアマップと大学の研究室内図である。廊下と研究室内の通路では同じ屋内でも通路幅や交差点の距離が異なることがわかる。特に通路幅が狭く、単位面積当たりの交差点の数が多研究室のような空間ではマップマッチングは困難になってくる。なぜなら、マッチングするリンクを選択する際は距離スコアと角度スコアを用いるが、通路が密であると各リンクに対して距離スコアの差異を出すことができないからである。その結果、角度スコアがマッチングするリンクを選択において強い重みを持ってしまう。よって、空間の規模に適したパラメータを定義する必要がある。

3.3 推定軌跡がリンクの端点を越えた場合の問題点

図 5 は図 2(b) のマッチング結果の中で誤ったリンクを選択した時のステップを示す。図 5(b) は推定軌跡がリンクの端点を越えたため、マッチングするリンクの候補群に



図 3: T 字路において誤ったリンクを選定した時

表 1: 21 歩目のマッチングスコア
(研究棟 5 階廊下向け)

リンク	距離スコア	角度スコア	合計スコア
リンク 1	8.88	0	8.88
リンク 2	2.97	9.78	12.65

マッチングすべきリンクが除外されてしまっている場合がある。U ターンし始める 11 歩目の時にリンク③の端点から超過してしまっているため、推定位置からリンク③に対して射影することができず、リンク③はマッチングするリ

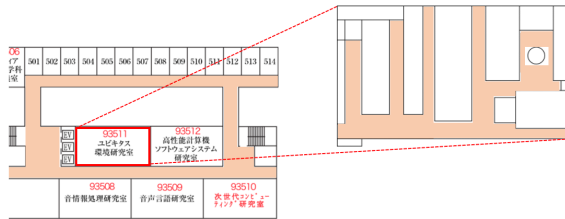


図 4: 研究棟 5 階のフロアマップと
大学の研究室内図

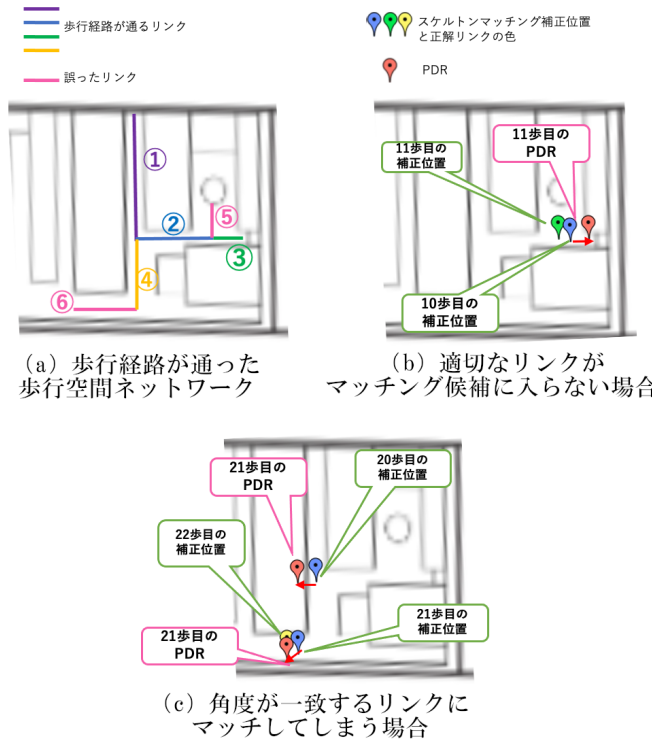


図 5: 歩行空間ネットワークと誤ったリンクを選択する時のステップ

リンクの候補群から外れてしまう。また、リンク⑤に対しては射影することができるため、マッチングするリンクの候補群に残ってしまっている。これによってリンク⑤がマッチングするリンクに選択されている。つまり、リンク③をマッチング候補群に残す必要がある。

図 5(c) は推定軌跡がリンクの端点を超過したため、マッチング候補群にマッチングすべきリンクがあるが、別のリンクが選択されている場合である。20 歩目はリンク④にマッチングしており、推定位置から射影可能であるリンク④とリンク⑥がマッチングするリンクの候補群となる。ここで歩行距離の推定誤差により角度が一致するリンク⑥に射影されてしまっている。またリンク⑥に補正したため、21 歩目以降は誤ったリンクに射影をしてしまっている。

図 6 は PDR で推定した位置からリンク上に補正するま

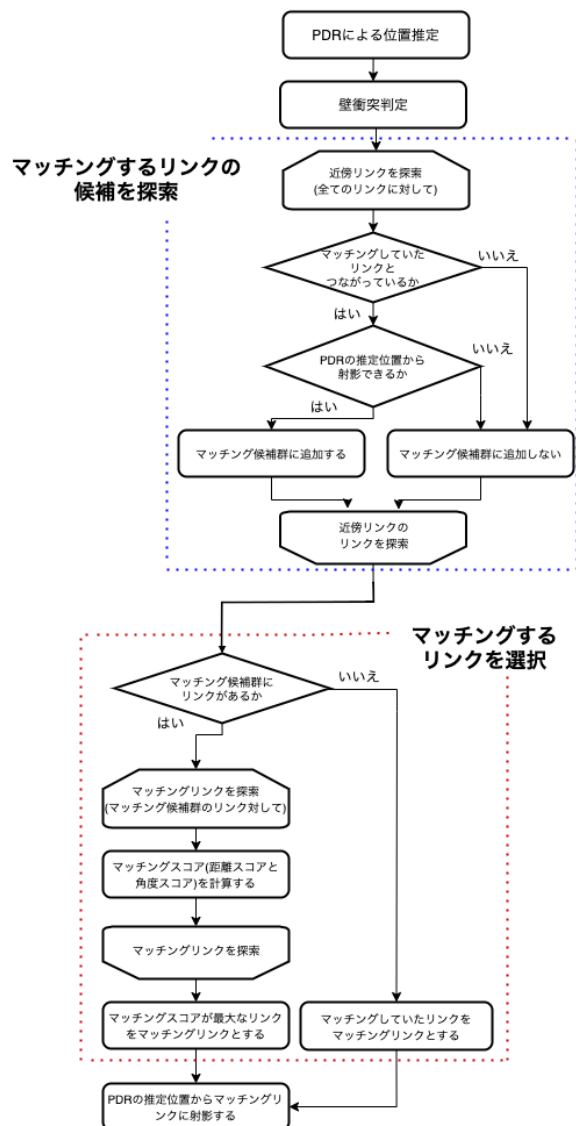


図 6: リンクに射影するまでの流れ

での流れを示す。PDR の位置推定をし、壁衝突判定をし、マッチング候補となるリンクを探索する。次に探索したリンクの中からマッチングスコアを計算し、マッチングリンクを選択し、PDR の推定位置から射影するという流れである。パラメータを定義することで解決される箇所はマッチングスコアの計算をしてマッチングするリンクを選択する箇所である。つまり、マッチング候補のリンクを探索する場所にパラメータは関わっていないため、直接的には解決できない。

4. 提案手法

本節では第 3 節で述べた問題点を解決する提案手法について説明する。4.1 項にて空間の規模に適したパラメータの定義について述べ、4.2 項にてバッファリンクを補填す

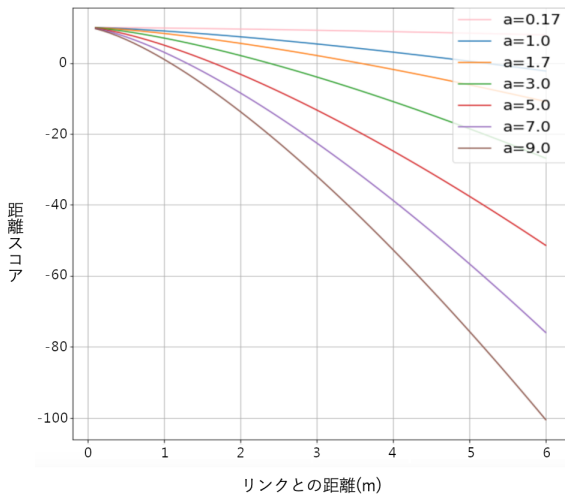


図 7: パラメータ a と距離スコアの関係

ることに関して述べる。

4.1 空間の規模に適したパラメータを決定する手法

本項では空間の規模に適したパラメータの定義とパラメータと空間の規模の関係について述べる。

マッチングリンク選定に使用される式

田川ら [4] は距離スコアと角度スコアを用いて、マッチングするリンクを選択している。式 (4.1) は距離スコアを表し、式 (4.2) は角度スコアを表している。それぞれのスコアの最大値を 10 と設定し、 p_i は i 歩目の推定位置であり、 e_j は j 番目のリンクを指す。 $d(p_i, e_j)$ は p_i から e_j に対する距離を示し、 $\alpha_{i,j}$ は p_{i-1} , p_i の進行方向と e_j との角度を示す。図 7 は式 (4.1) 中の a と距離スコアの関係を示すグラフである。田川らが用いた車道向け ($a=0.17$) の場合、交差点から 6m 離れても距離スコアに大きな差異が見られないことがわかる。また、 a の値が大きいくほど、距離があるリンクに対して距離スコアを低減させていることがわかる。よって、距離スコアと角度スコアの比率を決めるパラメータとして a を用いる。

$$S_d(p_i, e_j) = 10 - a \cdot d(p_i, e_j)^{1.4} \quad (1)$$

$$S_a(p_i, e_j) = 10 \cdot d(\cos \alpha_{i,j})^4 \quad (2)$$

パラメータ a と空間の関係

図 8 と図 9 はパラメータ a と通路幅の関係を示している。ここではパラメータ $a=1.7$ としている。図 8(a) のような交差点で緑の枠で囲った一角のみを想定環境とする。図 8(b) は位置と進行方向を与えたときに赤のリンクか青のリンクのどちらが選択されるかを示すものである。図 9 は図 8(a) の緑枠のエリアにおいて、歩行空間ネットワークの青いリンクと赤いリンク、壁が黒い実線として示されている。このときに現在位置がグリッドで示す 9 箇所であって、それぞれ 12 方向の進行方向であった場合に、赤青どちらのリンクにマッチするかを示している。この図では空

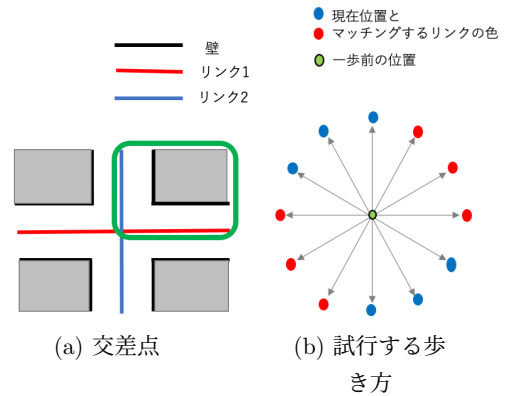


図 8: 想定環境

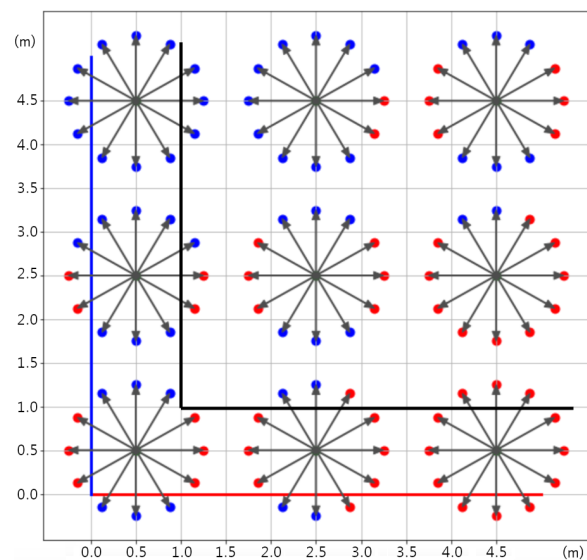


図 9: マッチング選択図

間の規模を通路幅によって表しており、左下角から実線の壁が右上方向に離れるほど通路が広い空間となる。このときそれぞれのグリッドでのリンク選択をパラメータ a を変えることによってどのようになされるかが実感できる。通路幅が広くなれば、交差点領域が広がりそこを含むグリッドが多くなり、それらは赤青半々とすべきで、交差点領域に含まれないグリッドは赤青どちらかになるよう適切にパラメータ a を調整する。図 9 において (0.5, 4.5) の位置や (4.5, 0.5) の位置ではグリッドが赤青どちらかで表されているが、(0.5, 2.5) の位置や (2.5, 0.5) の位置では赤と青が半々に近づいている。よって、このパラメータ $a=1.7$ のときの交差点領域の境界は 2.5m ~ 4.5m の間にあるべきで、さらに、グリッドの色の推移の具合から 2.5m ~ 3.5m の間あたりが適切と考えられる。従って、パラメータ $a=1.7$ では通路幅 6m 程度の空間の規模に適していることがわかる。

4.2 バッファリンクの補填

歩行空間ネットワークに対して推定軌跡がリンクから超

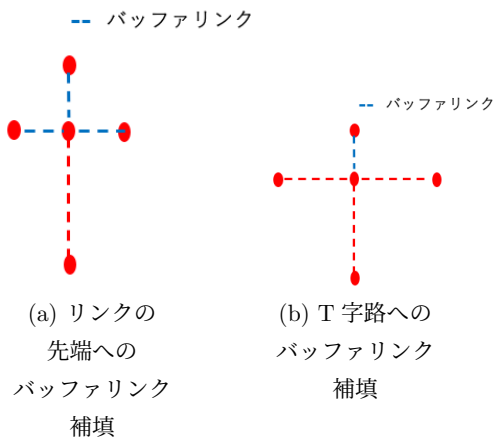


図 10: バッファリンクの補填の仕方

過する可能性のある箇所にリンクを補填する。この補填するリンクをバッファリンクとする。補填箇所は本論文ではリンクの先端と T 字路とする。図 10 は補填の仕方を示す。リンクの先端は図 10(a) のように 3 方向に分かれるように補填する。T 字路には図 10(b) のように十字になるように補填する。またバッファリンクの長さに関して緩衝を優先した長さとして壁を優先した長さの 2 つを提案する。

緩衝を優先した長さ

バッファリンクは推定した軌跡がリンクの端点を越えた場合に対応できるように補填するリンクである。つまり、推定位置からバッファリンクに対して射影できるような長さにしなければいけない。よって、図 11(a) のように全てのバッファリンクに対して壁と交差したとしても 1 歩分 (0.7m~0.8m) の長さで統一する。

壁を優先した長さ

4.2 項で述べたとおり、全てのバッファリンクに対して同じ長さで統一すると空間の規模によってはバッファリンクは壁と交差してしまう。マップマッチングは実際にありえない軌跡を推定した場合にそれを補正する手法である。しかし、壁と交差するようなバッファリンクを補填した場合、壁にめり込むような軌跡に補正してしまう可能性がある。よって、基本的にバッファリンクの長さを 1 歩分 (0.7m~0.8m) の長さとするが、図 11(b) のように壁と交差した場合は壁までの長さとする。

5. 評価

本節では第 4 節で述べた提案手法の有用性を評価する。5.1 項では実験内容について述べ、5.2 項ではパラメータとバッファリンクに関して誤ったリンクを選んでしまうことを避けられているかを評価する。

5.1 評価方法

使用端末、評価した経路は 3.1 項にて述べた実験環境と

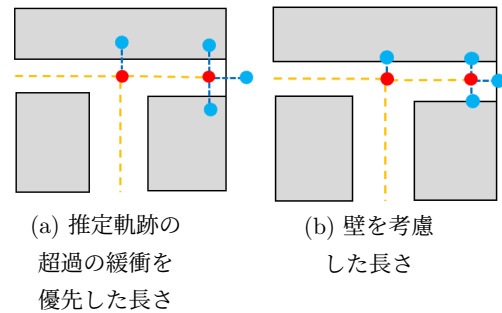


図 11: バッファリンクの長さ

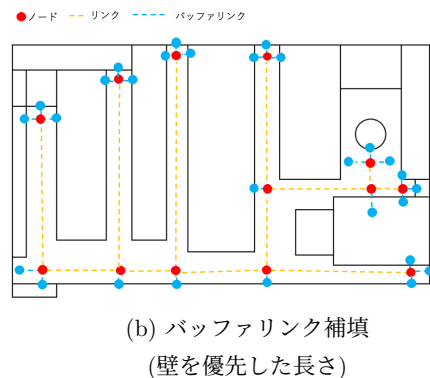
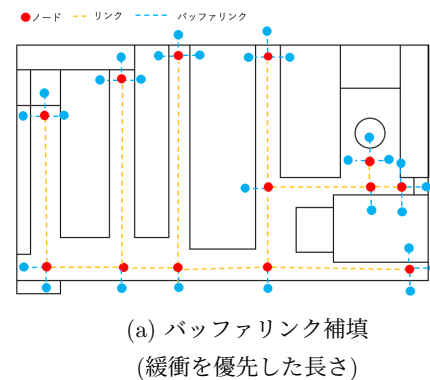


図 12: 使用した歩行空間ネットワーク

同じである。使用するパラメータ a の値は研究棟廊下向け ($a=1.7$) と環境情報研究室向け ($a=7.0$) の二つである。使用した歩行空間ネットワークは図 12(a) と図 12(b) である。事前実験で誤ったリンクを選択した U ターンと T 字路ににおいてリンクの誤選択の回数を評価する。

5.2 提案手法の評価

表 2 は U ターン、T 字路での誤ったリンクの選択回数である。研究室に向けたパラメータを用いた方は廊下に向けたパラメータに比べて誤ったリンクを選択回数が少なくなったことがわかる。同様に、バッファリンクを補填したことで誤ったリンクを選択することを防いでいることがわかる。

表 2: リンクを誤選択した回数

パラメータとバッファリンク	U ターンによる	T 字路での
	誤ったリンク選択	誤ったリンク選択
廊下向け	3	4
研究室向け	1	0
廊下向け + 緩衝を優先した長さ	0	0
研究室向け + 緩衝を優先した長さ	0	0
廊下向け + 壁を優先した長さ	0	2
研究室向け + 壁を優先した長さ	0	0

表 3: 21 歩目のマッチングスコア (研究室室内向け)

リンク	距離スコア	角度スコア	合計スコア
リンク 1	5.39	0	5.39
リンク 2	-18.97	9.78	-9.18

パラメータに対する評価

表 3 は研究室室内向けのパラメータを用いた場合の 21 歩目のマッチングスコアである。表 1 と比べて、距離スコアに差異が生まれていることがわかる。その結果、正しいリンクを選んでいく。

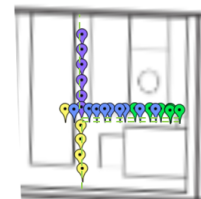
バッファリンクの評価

図 13 は緩衝を優先した長さのバッファリンクを補填した場合のマッチング結果である。リンクの端点を超えるような位置を推定してもバッファリンクに射影されることで誤ったリンクを選択することを防いでいる。図 14 は壁を優先した長さのバッファリンクを補填した場合のマッチング結果である。T 字路にて壁を超えてしまうような推定位置には対応できていないことがわかる。通路幅が短いと壁を考慮した長さも伴って短くなるため、推定位置がリンクの端点を超える場合、補填するバッファリンクの長さは一步以上の長さが必要だとわかる。

6. 結論

本研究では、マップマッチングにおいて誤ったリンクを選択してしまう問題を二つ取り上げて改善策を提案した。1 つ目の問題は通路幅や交差点の間隔が異なる空間では距離スコアと角度スコアの比率が同じにしてマッチングすると誤ったリンクを選択してしまうことである。そこで距離スコアの重みを表すパラメータに着目し、パラメータが切り替わることでマッチングするリンクがどう変わるかを示した。その様子から空間の規模に適したパラメータを定義した。2 つ目の問題は推定軌跡がリンクの端点を越えた場合に対応できず、誤ったリンクを選択をしてしまう問題である。これはパラメータを定義しても直接的には解決できない。そこでリンクの端点にバッファリンクを補填することで改善を目指した。結果として空間の規模に適したパラメータを用いることで誤ったリンクの選択回数を減らし、バッファリンクを補填することで推定位置が端点を越えて

補正位置と正しいリンクの色 ← PDRの推定位置 -- 正解軌跡



(a) マッチング結果



(b) 10 歩目から 13 歩目の補正位置

図 13: バッファリンク (緩衝優先) の場合スケルトンマッチング結果

も対応できることがわかった。

一方で以下のような今後の課題が挙げられる。

異なる空間の規模に遷移した場合の対応

本研究では空間ごとに適したマップマッチングのパラメータを定義した。しかし、測位中に空間が変わることを考慮できていない。通路幅や単位面積当たりの交差点の数で空間を定義し、空間が切り替わるたびに、パラメータの切り替えにより推定軌跡の最適化の実現の可能性がある。また今回は空間ごとに変更する内容として、マッチングスコアに関するパラメータのみを考えた。しかし、このパラメータ以外に切り替えなくてはならないパラメータに関して考慮できていないため、調査する必要がある。さらに広場や通路が直交していないような空間では歩行空間ネットワークの構成やマップマッチングのアルゴリズムから考え直さなくてはならない。

バッファリンクの長さ

本研究では、壁までの長さであれば推定位置がリンクの端点をこえた際に完全には対応できないことはわかった。しかし、推定軌跡がリンクの端点を越えた場合に必要

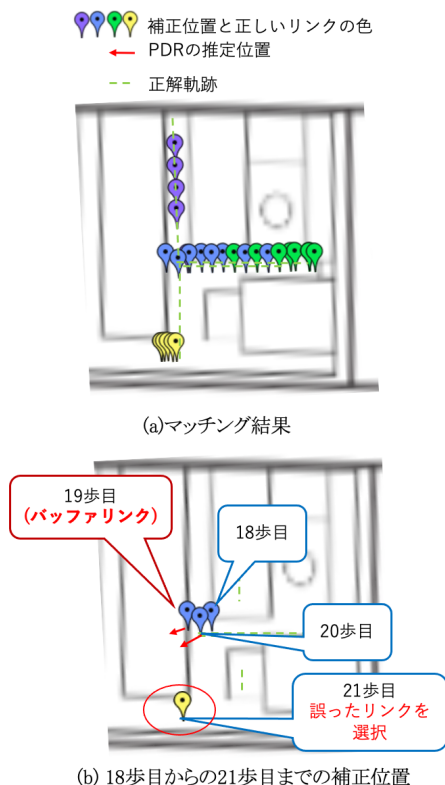


図 14: バッファリンク (壁優先) の場合スケルトンマッチング結果

バッファリンクの長さはどれくらいであるかを検証できていない。

リンクに射影するアルゴリズムの見直し

スケルトンマッチングは推定位置からリンク上に射影して補正する。今回はバッファリンクに射影した場合、通行不能エリア (壁内など) に補正される場合も許容してしまっている。これは実際ではありえない歩行である。そこで、通行不能エリア内にあるバッファリンクに射影される場合は、近傍の交差点 (バッファリンクの端点) に射影することで改善されることが考えられる。

参考文献

- [1] Bai, Y. B., Wu, S., Ren, Y., Ong, K., Retscher, G., Kealy, A., Tomko, M., Sanderson, M., Wu, H. and Zhang, K.: A new approach for indoor customer tracking based on a single wi-fi connection, *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, pp. 239–245 (2014).
- [2] Correa, A., Barcelo, M., Morell, A. and Vicario, J. L.: A review of pedestrian indoor positioning systems for mass market applications, *Sensors*, Vol. 17, No. 8, p. 1927 (2017).
- [3] Hassen, W. F., Najjar, F., Brunie, L., Kosch, H. and Slimani, Y.: Smart PDR integration for ubiquitous pedestrian navigation service, *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, pp. 1558–1563 (2017).
- [4] 田川達司, 内匠逸, 打矢隆弘ほか: カルマンフィルタと

マップマッチングを用いた歩行者経路の推定精度向上に関する研究, 第 75 回全国大会講演論文集, Vol. 2013, No. 1, pp. 207–208 (2013).

- [5] 吉見駿, 村尾和哉, 望月祐洋, 西尾信彦ほか: マップマッチングを用いた PDR 軌跡補正, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2014, No. 20, pp. 1–8 (2014).
- [6] Brakatsoulas, S., Pfoser, D., Salas, R. and Wenk, C.: On map-matching vehicle tracking data, *Proceedings of the 31st international conference on Very large data bases*, pp. 853–864 (2005).