

定性空間表現上での位置の高低を考慮した経路探索システム

Route Searching System Considering the Heights of the Positions on a Qualitative Spatial Representation

榎本 真也 高橋 和子
Shinya Enomoto Kazuko Takahashi

関西学院大学大学院 理工学研究科
School of Science & Technology, Kwansai Gakuin University

This paper describes qualitative spatial representation for a land with height information. This representation is an extension of PLCA representation by adding height information. For each pair of areas sharing a line, we represent their connection patterns. In this representation, we can determine whether these areas are inclined or not, direction of a slope, or whether there is a gap between the areas. We also propose algorithms to find a route without a gap or a route with less number of up-downs. We implement the system based on these algorithms and show an application of this reasoning for an actual landscape. It can provide a suitable navigation for the people with strollers or wheelchairs.

1. はじめに

目的地に初めて向かう場合や周辺の地形に対する知識が薄い場合等、目的地まで確実に到達するか不安に思う時に、経路探索システムを使う場面がある。現在、NAVITIME[NAVITIME]やMapFan Web (マップファン) [MAPFAN WEB] 等、多くの経路探索システムが存在する。しかし、経路の途中にある傾斜や段差等を考慮して探索するシステムは少ない。傾斜や段差等の高さを考慮しないと、段差が多い経路やアップダウンの多い経路が発見されることがあり、ユーザにとって非常に負担が大きい経路となってしまう可能性がある。特に車椅子やベビーカーを押して移動する人にとって、このような経路は負担が大きい。これらを考慮し、ユーザにとって最適な経路を探索する方が望ましい。しかし、傾斜や段差の高さを考慮して地形を表現すると、データ量が大幅に増大してしまい、さらに探索にかかる時間も大幅に増大してしまう。

そこで、本研究では定性空間推論の枠組を利用して、データ量を減らした表現の上での探索方法を提案する。定性空間推論とは、図形や画像などの空間データに対して、ユーザにとって必要な情報のみを取り出して定性的に記号で表現し、その上で推論を行うものである。

定性空間推論の枠組には、RCC[Randell 92]、9-intersection[Egenhofer 90]、PLCA 表現 [Takahashi 12] 等がある。しかし、これらは主に二次元平面を対象としている。地形を表現するためには、二次元平面に対して高さを加えた表現に拡張する必要がある。二次元上の物体の重なりに関する研究としては、三次元を二次元に投影して、物体同士が手前や後ろに存在するかに注目していき、表現を行う研究がある [Sabharwal 11][Bennett 00]。しかし、これらの研究も二次元平面に対して高さを加えたという概念ではなく、また、段差に着目した表現ではない。

本研究では、PLCA 表現を基に高さの概念を加えた表現を提案する。PLCA 表現は、領域の接続状況に着目したものである。本研究では、これを拡張して、二次元平面をベースとして面と面の接続に着目し、2つの面に共有する辺を中心に2つ

の面がどの方向に傾いているか、2つの面が段差になっているかを区別できるようにする。これにより、斜面や段差も表現することが可能となる。

次に、この表現の上で傾斜や段差を考慮した経路の推論方法を定式化する。具体的には2種類の条件を満たす経路の探索方法を示す。1つは地形の中で階段等できる限り通りたくない場所を、どれだけ避けるかという点に着目した探索である。もう1つは通る経路のアップダウンの数をできる限り少なくするという点に着目した探索である。

これらの定式化を行った後、この推論方法に基づくシステムを実装して、実際の地形に本手法を適用し、有効性を確認した。

本発表の構成は以下の通りである。第2節では、本論文で対象とする図形について述べる。第3節では、高さを考慮した定性的表現について述べる。第4節では、経路の探索の概要について述べる。第5節では、実際に応用した例を述べる。第6節では、結論と今後の課題について述べる。

2. 対象とする図形

本研究で対象とする図形は、 x, y 軸から成る2次元の平面に、高さ z 軸を加えたものである。

図形の x, y 軸方向にはそれぞれ境界があり、図形全体を上から見下ろすとその境界は矩形となる。また、その矩形の外側には限りなく高い平面がある。矩形である境界内の空間は、上

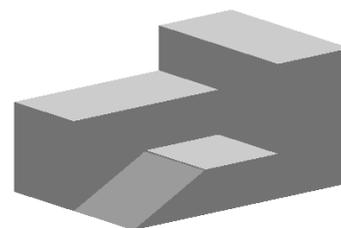


図 1: 地形の例

から見下ろすと有限個の面に分かれる。ただし、それらの全ての面は上から見下ろすと、 x か y 軸に平行な直線で囲まれる矩

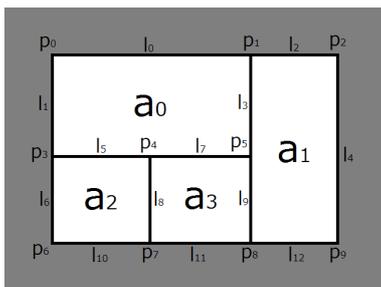


図 2: 図 1 を上から見下ろした図

形となる。その矩形の 4 つの角となる位置に点があり、その矩形の外周に沿って点同士を直線で結ぶ。ただし、上から見下ろして点や線が重なる場合は 1 つの点、線と考える。例えば図 1 のような地形全体を上から見下ろすと図 2 になる。図 2 において黒い線を境界とすると、灰色の部分は限りなく高い平面である。また、黒い線上では垂直な面で図形の内部と外部を接続する。上から見下ろすと、この例では図形全体の境界内部は 4 つの面 (a_0, a_1, a_2, a_3) に分かれる。点はそれぞれの面の 4 つの角となる位置にあるが、上から見下ろすと $p_1, p_3, p_4, p_5, p_7, p_8$ は 2 つ以上の点が重なって 1 つの点としているので、この例では 10 個の点 (p_0, p_1, \dots, p_9) がある。さらに、それぞれの面の外周に沿って点同士を直線で結ぶが、上から見下ろすと線が重なる場合は 1 つの線としてみなすので、この例では 13 個の線 (l_0, l_1, \dots, l_{12}) がある。

面は上向きの面 (直観的には、上から見下ろすと見える面) と垂直な面を認めるが、下向きの面 (直観的には、下から見上げると見える面) は認めない。上向きの面については、斜面も認める。ただし、上から見下ろして見える 4 つの角の点を左上、右上、右下、左下の順にそれぞれ p_0, p_1, p_2, p_3 とし、 p_0 と p_1 、 p_1 と p_2 、 p_2 と p_3 、 p_3 と p_0 を結ぶ線をそれぞれ l_0, l_1, l_2, l_3 とするとき、全ての線が水平、もしくは l_0, l_2 が水平で l_1, l_3 が斜辺、もしくは l_1, l_3 が水平で l_0, l_2 が斜辺である。直観的には、全ての線が水平もしくは、1 組の対辺が水平線、他の 2 辺は同じ傾きの斜辺となる。例として、図 2 の面 a_0 で説明する。この面における左上、右上、右下、左下の点はそれぞれ、 p_0, p_1, p_5, p_3 と対応する。 p_0 と p_1 、 p_1 と p_5 、 p_5 と p_3 、 p_3 と p_0 を結ぶ線をそれぞれ $l_{a_0-0}, l_{a_0-1}, l_{a_0-2}, l_{a_0-3}$ とすると、4 つの線全てが水平線、もしくは l_{a_0-0}, l_{a_0-2} が水平線、 l_{a_0-1}, l_{a_0-3} が斜辺、もしくは l_{a_0-1}, l_{a_0-3} が水平線、 l_{a_0-0}, l_{a_0-2} が斜辺となる。ただし、2 辺が斜辺となるならば、その 2 辺は同じ傾きの斜辺となる。

上から見下ろすと、ある 2 つの面 a_0, a_1 が共有しているように見える辺 l_0 について、3 次元的に見ると接続していない可能性もある。この場合は、辺 l_0 上に垂直な面があり、その面は少なくとも a_0, a_1 の 2 面に接続している。例として、図 2 の面 a_0, a_1 で説明する。 a_0, a_1 が共に平面で、 a_1 よりも a_0 の方が高い位置にあるならば、上から見下ろした場合は l_3 は共有しているように見えるが、実際は l_3 上に垂直な面がある。

3. 高さを考慮した定性的表現

3.1 点・線・面の定義

前節で対象とする図形を扱うための定性的表現を定義する。

- 点 p については、 $point(p)$ と定義する。ただし、3 次元の図形を真上から見下ろして、重なる点は 1 つの点とみなす。

- 線 l は、ある 2 点 p_1, p_2 を結んででき、 $line(l) = (p_1, p_2)$ と定義する。ただし、真上から見下ろして、重なる線は 1 つの線とみなす。

- $l_1, l_2, \dots, l_n (n \geq 4)$ を、この順番に囲む事によってできる面 a について、 $area(a) = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ と定義する。ただし、垂直な面については記述しない。

3 次元で見ると重なっていない 2 つの点は上から図形を見下ろした図では 1 つの点に重なることがある。これらの点を区別する必要がある場合、重なる点を p_0 とすると、 $p_{0_{a_0}}$ (a_0 は p_0 を含んでいる面) と記述する。

3 次元で見ると重なっていない 2 つの線は上から図形を見下ろした図では 1 つの線に重なることがある。これらの線を区別する必要がある場合、重なる線を l_0 とすると、 $l_{0_{a_0}}$ (a_0 は l_0 を含んでいる面) と記述する。

- 図形全体を上から見下ろした時に隣り合わせになる 2 面 a_0, a_1 の接続関係として、次の 2 種類のうちどちらかの表現が与えられる。2 面 a_0, a_1 が共有している辺 l_0 について、 $l_{0_{a_0}}$ と $l_{0_{a_1}}$ がどちらも水平 (線の端点がどちらも同じ高さにある) ならば l 接続、そうでなければ p 接続とする。ただし、以下において a を面とすると、 a_{-} は $a_{low}, a_{same}, a_{high}$ のいずれかを表す。

境界の外側の面は限りなく高い位置にある面 a_{out} とし、上から見下ろした時に a_{out} と接している 2 面についても記述する。

1. [l 接続]

$l(a_{0-} * \Re a_{1-} *)$ と記述する。ただし、 a_{0-} は $l_{0_{a_0}}$ が

- 面 a_0 の他のある辺よりも低いならば $a_{0_{low}}$ 、
- 面 a_0 の他のある辺よりも高いならば $a_{0_{high}}$ 、
- 面 a_0 の他の任意の辺と高さが同じならば $a_{0_{same}}$

と記述する。 a_{1-} についても同様に記述する。

\Re は $<, =, >$ のいずれかとする。ただし、辺 l_0 について、

- $l_{0_{a_0}}$ よりも $l_{0_{a_1}}$ が高い位置にあるならば $<$ 、
- $l_{0_{a_0}}$ と $l_{0_{a_1}}$ が同じ高さにあるならば $=$ 、
- $l_{0_{a_0}}$ よりも $l_{0_{a_1}}$ が低い位置にあるならば $>$

と記述する。図 3 を例とすると、この図の a_0, a_1 の接続関係は $l(a_{0_{high}} > a_{1_{same}})$ となる。ただし、 $l_{0_{a_0}}, l_{0_{a_1}}$ はどちらも水平線である。

2. [p 接続]

$p(a_{0-} * \Re a_{1-} *)$ と記述する。ただし、 a_{0-} は次のように決まる。まず、 $l_{0_{a_0}}$ の 2 つの端点を $p_{0_{a_0}}, p_{1_{a_0}}$ 、 $l_{0_{a_1}}$ の 2 つの端点を $p_{0_{a_1}}, p_{1_{a_1}}$ とする。(ただし、 $i = 0, 1$ として $p_{i_{a_0}}$ と $p_{i_{a_1}}$ は図形全体を上から見下ろすと重なる。) 次に、 $p_{0_{a_0}}$ と $p_{0_{a_1}}$ の高さの差と $p_{1_{a_0}}$ と $p_{1_{a_1}}$ の高さの差を比べて、 $p_{0_{a_0}}$ と $p_{0_{a_1}}$ の方が小さいならば、 $i = 0, j = 1$ とする。そうでなければ、 $i = 1, j = 0$ とする。

このとき、面 a_0 について、

- $p_{i_{a_0}}$ が $p_{j_{a_0}}$ よりも低い位置にあるならば $a_{0_{low}}$ 、

- $p_{i_{a_0}}$ が $p_{j_{a_0}}$ よりも高い位置にあるならば a_{0_high} ,
- $p_{i_{a_0}}$ と $p_{j_{a_0}}$ が同じ高さの位置にあるならば a_{0_same}

と記述する。 a_{1_*} についても同様に記述する。

\mathcal{R} は $<, \leq, =, \geq, >$ のいずれかとする。

- $p_{0_{a_0}}$ が $p_{0_{a_1}}$ よりも高い位置にあり、 $p_{1_{a_0}}$ が $p_{1_{a_1}}$ よりも高い位置にあるならば $>$
- $p_{0_{a_0}}$ が $p_{0_{a_1}}$ よりも高い位置にあって $p_{1_{a_0}}$ と $p_{1_{a_1}}$ が同じ高さの位置にあるか、 $p_{0_{a_0}}$ と $p_{0_{a_1}}$ が同じ高さの位置にあって $p_{1_{a_0}}$ が $p_{1_{a_1}}$ よりも高い位置にあるならば \geq
- $p_{0_{a_0}}$ と $p_{0_{a_1}}$ が同じ高さの位置にあり、 $p_{1_{a_0}}$ が $p_{1_{a_1}}$ が同じ高さの位置にあるならば $=$
- $p_{0_{a_1}}$ が $p_{0_{a_0}}$ よりも高い位置にあって $p_{1_{a_1}}$ と $p_{1_{a_0}}$ が同じ高さの位置にあるか、 $p_{0_{a_1}}$ と $p_{0_{a_0}}$ が同じ高さの位置にあって $p_{1_{a_1}}$ が $p_{1_{a_0}}$ よりも高い位置にあるならば \leq
- $p_{0_{a_1}}$ が $p_{0_{a_0}}$ よりも高い位置にあり、 $p_{1_{a_1}}$ が $p_{1_{a_0}}$ よりも高い位置にあるならば $<$

図 4 を例とすると、この図の a_0, a_1 の接続関係は $p(a_{0_low} \leq a_{1_low})$ となる。ただし、 $l_{0_{a_0}}, l_{0_{a_1}}$ はいずれも水平でない。

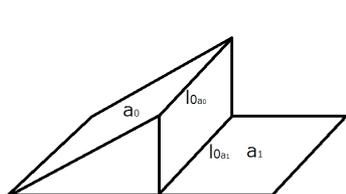


図 3: l 接続の例

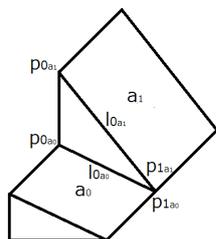


図 4: p 接続の例

3.2 図形の制限

与えられた図形が現実の地形として存在するために、制約条件を付加する。ある 2 面 (a_0, a_1) について、以下のどれかが定義されていれば、

- $p(a_{0_low} > a_{1_low})$
- $p(a_{0_low} \geq a_{1_low})$
- $p(a_{0_high} < a_{1_high})$
- $p(a_{0_high} \leq a_{1_high})$

傾斜は $a_0 > a_1$ の関係とする。直観的には a_0 の方が a_1 よりも傾斜が急であることを表す。ただし、2 面が同じ向きに傾いているときのみ定義される。次に制約条件を示す。例えば、ある 3 面 a_0, a_1, a_2 について、傾斜の関係が $a_0 < a_1 \wedge a_1 < a_2$ ならば、 $a_0 < a_2$ でなければならない。

同様に、傾斜の関係を $=, <$ として制約条件を付加する。

4. 経路の探索

前節で与えた記述の上で高さを考慮した経路の探索を行う。面と面の間に段差がある部分は通らないものとする。面 a_0 から a_1 への移動は、 a_0 と a_1 の接続関係が $lp(a_{0_*} = a_{1_*})$ で記述される時のみ、段差がないと考えられる。ただし、 lp とは l 接続もしくは p 接続という意味である。

以下では、この中でさらに特定の斜面をできる限り通らないようにする経路 (4.1 参照)、坂の上り下りが最も少ない経路 (4.2 参照) の 2 つについて考える。

4.1 特定の斜面をできる限り通らない経路の推論

実際の地形を定性的に表現する場合、階段を斜面に近似すると表現は単純になるが、階段を通りたくない場合の推論ができない。そのため、面と面の接続を表す表現のうち $l(a_{0_*} = a_{1_*})$ と定義されるものについて、面 a_0 と a_1 のいずれかが階段ならば、 $=$ を $!$ に変更して経路を探索する。

$lp(a_{0_*} ! a_{1_*})$ が出現すれば、階段を通る回数としてカウントアップする。始点 (出発する面) から終点 (目的地とする面) まで通る順に面を要素としてリスト構造に追加していき、解として出力し、各解に対して階段を通る回数を出力する。ただし、1 度通った面は通らないようにしているため、探索アルゴリズムは必ず停止する。複数の経路がある場合は全ての解を出力する。経路の途中で通る階段の数をカウントしているため、この数を比較することで、できる限り階段を通らない経路が求められる。

4.2 坂の上り下りができるだけ少ない経路の推論

実際に移動する際、上り下りが多い経路より少ない経路をできる限り通りたいという場面が考えられる。そこで、坂の上り下りが最も少ない経路を導き出す方法を示す。

前節のアルゴリズムによって、経路を全て求める。ただし、階段のカウントアップを行わない。

得られた各解に対して、上り下りの数をカウントするアルゴリズムを簡単に述べる。解である各リストを順番に辿っていき、上り坂の後に下り坂となった場合と、下り坂の後に上り坂となった場合に、その数をカウントアップする。リストにおける注目している面を A 、その次の面を B とするとき、 $l(A_* = B_*)$ と記述されているものについて、面 A が A_low ならば下り坂で A_high ならば上り坂である。また、面 B が B_high ならば下り坂で B_low ならば上り坂である。

各解に対する上り下りの数を比較し、坂の上り下りができるだけ少ない経路を導き出すことができる。

5. 応用例

図 5 は関西学院大学神戸三田キャンパスの地図である。これをモデル化したものを図 6 に示す。図 6 で矢印が書かれた面は、矢印の元から先に向かって下っている斜面を表す。矢印が書かれていない面は平面である。太く表示されている線については、その辺で接続する 2 つの面の間には段差があり、普通の線の間には段差がない。点線は、その辺で接続する 2 つの面のうち 1 つが階段である。前節で述べた探索アルゴリズムを実装し、この例に応用した。図 6 について、面 a_0 の駐車場入り口の奥から a_{25} のコンビニまで行く場合の経路探索を示す。

実行すると、全部で 28 通りの経路が出力された。解の 1 つである $a_0, a_1, a_6, a_{16}, a_{19}, a_{20}, a_{12}, a_{21}, a_{24}, a_{25}$ をこの順に通る経路は、 a_{16}, a_{19}, a_{20} で 1 回、 a_{12}, a_{21}, a_{24}

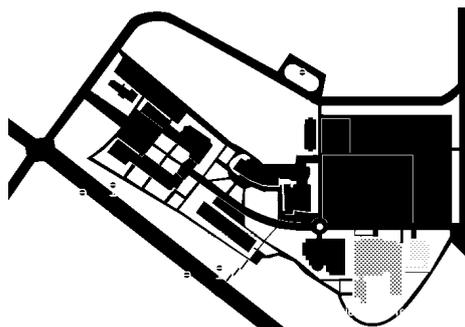


図 5: 関西学院大学神戸三田キャンパスの地図

で 1 回、合計で階段を 2 回通っているが、別解である $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_{10}, a_{15}, a_{18}, a_{25}$ をこの順に通る経路は、階段を通らずに目的地に到達できることが分かった。

得られた 28 通りの経路に対して、4.2 節で述べたアルゴリズムを実行した。解の 1 つである $a_0, a_1, a_6, a_{16}, a_{19}, a_{20}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_9, a_8, a_7, a_3, a_4, a_5, a_{10}, a_{15}, a_{18}, a_{25}$ をこの順に通る経路は、 a_0 で上って平面をいくつか辿った後、再び a_{19} で登る。その後は平面を辿った後 a_{14} で下るため、ここでアップダウンを 1 回カウントする。次に a_9 で上るため、更に 1 回アップダウンをカウントする。その後は平面を辿った後 a_4 で下るため、更に 1 回アップダウンをカウントする。その後は平面である a_5 や a_{15} を挟み、 a_{10}, a_{18} で下る。そのため、アップダウンは合計 4 回になる。また、別解である $a_0, a_1, a_{11}, a_{17}, a_{12}, a_{21}, a_{24}, a_{25}$ をこの順に通る経路は、 a_0, a_{11} で登った後 a_{21} で下る。そのため、アップダウンは合計 1 回になる。以上により、後者の経路ならばアップダウンが少ないことが分かった。

6. おわりに

本研究では、定性空間推論を利用して、相対的な位置の高さの概念を加えた表現を提案し、表現された図形に対する経路の推論方法を定式化した。地形の中で階段等できる限り通りたくない場所をどれだけ避けるかという点に着目した経路、通る経路のアップダウンの数をできる限り少なくするという点に着目した経路の 2 つについて定式化し、具体的な地形に対して応用例を示した。

ただし、応用例で適用したのは単純な地形であった。今後の課題は、より複雑な地形に対して表現・推論を行うこと、また、推論結果がより現実的なものになるよう推論方法を改善していくことである。

参考文献

- [Bennett 00] Bennett, B., Cohn, G. A., Torrini, P. and Hazarika, M. S.: "Describing Rigid Body Motions in a Qualitative Theory of Spatial Regions", in *Proceedings of AAAI-2000*, pp. 503-509, (2000).
- [Cohn 08] Cohn, G. A. and Renz, J.: "Qualitative spatial representation and reasoning", in *Handbook of Knowledge Representation*, Chapt. 13, pp. 551-596, Harmelen Harmelen, V. F., Lifschitz, V. and Porter, B, Eds., Elsevier, (2008).

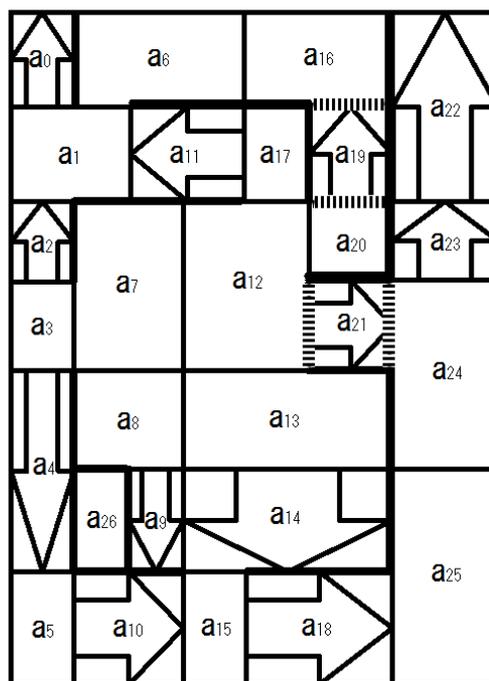


図 6: 図 5 のモデル化

- [Egenhofer 90] Egenhofer, M. and Herring, J.: "Categorizing Binary Topological Relations Between Regions, Lines, and Points in Geographic Databases", in *Department of Surveying Engineering*, University of Maine, (1990).

[MAPFAN WEB] <http://www.mapfan.com/routemap/>

[NAVITIME] <http://www.navitime.co.jp/>

- [Randell 92] Randell, A. D., Cui, Z. and Cohn, G. A.: "A Spatial Logic Based on Regions and Connection", in *KR'92. Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Third International Conference*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, pp. 165-176, (1992).

- [Sabharwal 11] Sabharwal, C., Leopold, J. and Elow, N.: "A more expressive 3D region connection calculus", in *Proc. of the 2011 International Workshop on Visual Languages and Computing*, pp. 307-311, (2011).

- [Takahashi 12] Takahashi, K.: "PLCA: A Framework for Qualitative Spatial Reasoning Based on Connection Patterns of Regions, Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning", *Trends and Future Directions*, Chapt. 2, pp. 63-96, Hazarika, S., Ed., IGI Publishers, (2012).