

位置・方向情報付写真群を用いた空間を要約する経路の生成

相楽 翔太[†] 藤田 秀之[†] 大森 匡[†] 新谷 隆彦[†]

[†] 電気通信大学大学院情報システム学研究所 〒182-8585 東京都調布市 調布ヶ丘 1 丁目 5-1

E-mail: [†]{sagara.s, fujita, omori, shintani}@hol.is.uec.ac.jp

あらまし: 地理空間情報を扱う SNS 等のデータから高価値な空間情報の抽出や可視化を行う研究は、今日のデータ工学にとって重要な課題の一つである。本研究では、対象とする地理空間における位置・方向情報のついた写真データ群を入力として、それらから、当該空間の情報を要約する経路を自動抽出し表示する技法を提案する。具体的には、i) 多数の写真の撮影対象となっている/そこから多数の写真が撮影されている、特徴的な authority/hub 領域、および、walk-through と呼ぶ断片的な経路、の 2 種類の情報を写真群の配置パターンに基づいて自動抽出し、ii) それらを組み合わせて、対象空間を要約する経路（空間要約経路と呼ぶ）を生成する、という枠組みを採用する。本稿では、特に、walk-through と呼ぶ経路抽出のため、位置・方向情報付写真をノードにした近接グラフを提案し、それを用いた空間要約経路の生成までを述べる。

キーワード データストーリーテリング、可視化、位置情報付写真、方向情報、地理情報システム

1. 研究背景と目的

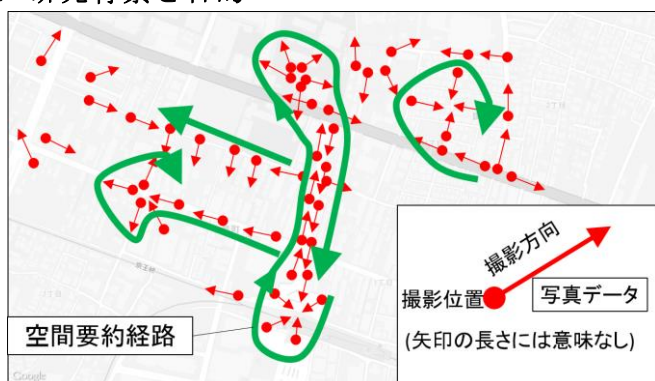


図 1 空間要約経路の概念図

地理空間情報を扱う SNS 等のデータから高価値な空間情報の抽出や可視化を行う研究は今日のデータ工学にとって重要な課題の一つである。なかでも、写真データ集合を用いて重要な地域を求めたり、経路を生成したりする事例は多い[1,2,3,4,5,6]。一方で、cartography（地図学）の分野で扱う地図の作成や経路地図作成の水準には及ばないのが実情である。具体的には、写真データ集合を用いて抽出した領域や経路を組み合わせて、対象空間の概要を総合的に提示することを目的とした研究は我々の知る限り存在しない。

そこで本稿では、位置（撮影時のカメラの位置）および、方向（撮影時のカメラの方向）の情報を持つ写真（位置・方向情報付写真と呼ぶ）群を用い、空間を要約する経路を生成し、略地図に相当する水準でユーザに理解しやすく提示する手法を提案する。

我々の提案する枠組みは、次の通りである。

はじめに、多数の写真の撮影対象となっている領域（Authority spot と呼ぶ）、そこから多くの写真が撮影されている領域（Hub spot と呼ぶ）といった特徴的な領域を抽出しておく。次に、対象空間内の断片的な経

路で利用者から見た視点に連続性を与えるようなもの（Walk-through と呼ぶ）を写真群の配置パターンに基づいて抽出する。そして、両者を統合したグラフ構造を作成し、そこから、対象空間を要約する経路（空間要約経路と呼ぶ）を生成する。生成した経路に沿って、写真を順番に提示することで、視覚的な連続性（写真同士の位置や方向の連続性）をできるだけ保ちながら、逐次的な情報提示を行うことが可能になる。authority spot や hub spot の抽出手法は、文献[9]にまとめた。本稿では主にグラフの生成手法について論じる。

例として、図 1 に空間要約経路の概念図を示す。図 1 の入力データでは、道路に沿っていくつかの経路状に連続した写真群が存在し、authority spot や hub spot が点在している。空間要約経路の例として、中央下側の authority spot を提示し、図の上方に向かう walk-through をたどり、中央上側の hub spot を提示し、図の下方に向かう walk-through をたどる、といった経路が考えられる。

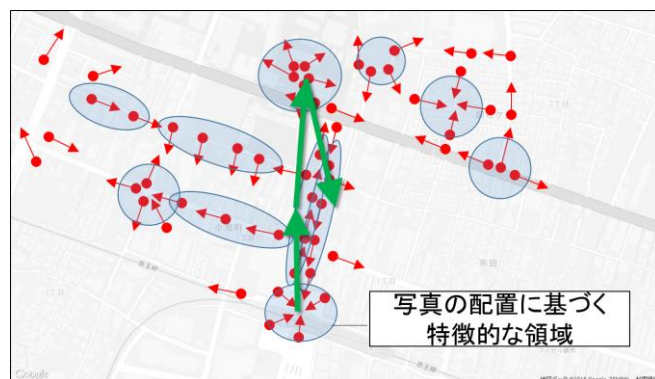


図 2 空間要約経路の作成方針

本稿の構成は以下の通りである。2 章で、抽出すべき領域や経路のパターンを挙げ、それらを使った問題の定義と解き方の全体構造を概説する。併せて関連す

る研究との位置づけ比較を述べる．3 章では位置・方向つき近接グラフと呼ぶグラフ構造を提案し，これを用いた経路生成手法と authority/hub spot の埋め込み手法を述べる．4 章では実データを用いて検証を行い，5 章で提案手法の評価を行う．最後に，6 章で本稿の要約を行う．

2. 問題の定義と関連研究

2.1 問題の定義

本研究で用いる概念の定義を次に示す．

位置・方向情報付き写真：撮影位置，撮影方向の情報を持つ写真

撮影位置：写真を撮影した時のカメラの位置

撮影方向：写真を撮影した時のカメラの方向

視線：撮影位置から撮影方向への半直線

進行方向：2 件の写真データについて，一方を始点とし，他方を終点として両者の撮影位置を結んだ直線

空間要約経路：入力された空間データ(位置情報を持つデータ)による対象空間の要約を，対象空間内の経路上のデータ列として表現したもの．本研究では，位置・方向情報付写真データを入力とし，特定の空間配置を持つクラスターや，断片的な経路群を組み合わせた経路として，空間要約経路を生成する．ひとつの入力データに対し，複数の空間要約経路を想定する．

視覚的連続性のある経路：写真の撮影位置を結んだ経路であり，経路上の連続する写真どうしの空間関係(例えば，前進した・横を向いたなど)を人間が理解できるようなもの．本研究では，連続する写真に画像としての重なりがなくても，撮影位置や撮影方向の変化が，3 章で指定する条件を満たす場合，視覚的連続性を持つと定義する．

ストーリー形式の情報提示[7][8]：対象データから選択した複数の要素に提示順序を決定し，逐次的に提示すること．本研究では，生成した情報要約経路に沿って，写真を順番に提示することで，ストーリー形式の情報提示を実現する．

撮影位置は緯度・経度で与え，撮影方向と進行方向は東を 0 度とした角度で与える．本稿では，撮影位置，撮影方向とも二次元平面上での値とし，高さ方向の値を考慮しない．

以上を用いて本研究の目的を次のように定める．

- ・ 位置・方向情報付き写真群を用い，指定された領域についての，視覚的連続性のある空間要約経路を生成し，ストーリー形式の情報提示を実現する

2.2 問題の解き方の方針

写真群の配置パターンに基づき特徴的な領域を抽

出し，それらを組み込んで空間要約経路を作成する．図 2 に空間要約経路の作成例を示す．円や楕円で囲まれた領域は，特徴的な領域を示す．図 3 に本研究が対象とする特徴的な領域の例を示す．

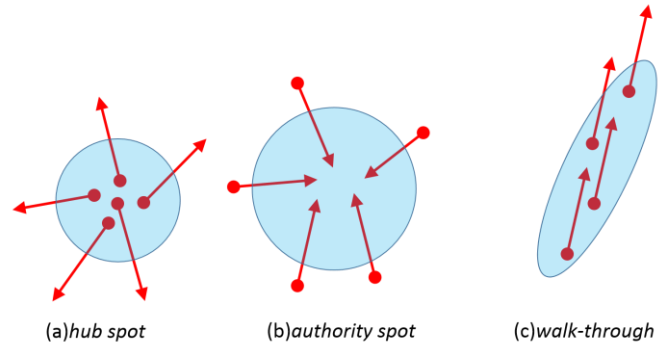


図 3 特徴的な領域

写真群の配置パターンに基づく特徴的な領域には，そこから多くの写真が撮影されている領域(図 3(a))や，多数の写真に写っている領域(図 3(b))，断片的な経路状の領域(図 3(c))などが知られている[1,6]．本研究では(a)を *hub spot*，(b)を *authority spot*，(c)を *walk-through* と呼ぶ．また，(a),(b)をまとめてスポットと呼ぶ．

本研究では，まず，対象の写真データ群から(a),(b)のスポットを抽出する．続いて，対象の写真データ群から，各写真をノードとして，その位置・方向情報を考慮した近接グラフを作成する．この近接グラフ上の断片的な経路群は(c)に対応する．さらに抽出したスポットを構成する写真群を，近接グラフに部分グラフとして組み込む．最終的に，近接グラフ上の経路として，空間要約経路を生成する．この近接グラフのことを本研究では**位置・方向情報近接グラフ**と呼ぶ．

スポットの抽出方法については文献[9]にまとめた．本稿では主に位置・方向情報近接グラフの生成について述べる．

2.3 関連研究と本研究の位置付け

大量の軌跡データから，経路を始めとするさまざまな要素を抽出する手法が，軌跡パターンマイニング[10]として体系化されている．しかし，対象データの性質が異なるため，本研究に直接適用することはできない．具体的には，軌跡パターンマイニングの対象データは軌跡データであり，軌跡を構成する点列は，位置・方向を持つと言えるが，その方向は，点と点を結ぶ方向(進行方向)である．また，各点は軌跡上の点列という構造を持つ．他方で，本研究の対象データの場合，各点(位置・方向情報付写真)は，進行方向に加え，進行方向とは異なる方向(撮影方向)を持っている．また，各点は，軌跡上の点列という構造を持た

ない。

方向を持った点群を扱う研究は多くはない。クラスタリング手法の提案[11]の他、位置・方向情報付写真群を対象とする研究として、空間検索、場所抽出、撮影対象の位置や形状の推定手法などが提案されている[1,2,3,5,6]。特に、文献[6]は、画像情報を用いて画像の合成を行うことで、映像に近い、非常に視覚的連続性の高い情報提示を実現する。そのため、入力データとして、互いに重なりのある画像群を必要とする点が本研究と異なる。

位置情報付写真群を用いた経路生成に関しては、旅行計画問題としてとらえた提案[4]がある。

情報可視化の分野において、対象となるデータをストーリー形式で提示する、ナラティブ・ビジュアライゼーション[10]やデータストーリーテリング[11]と呼ばれる手法が提案され、適用分野を広げている。人間が理解・把握することが困難な大規模データに適用[12,13]し、データの理解を支援する手法も提案されている。本研究は、位置・方向情報付写真データに対する、データストーリーテリング手法の提案とも位置付けられる。

3. 位置・方向情報近接グラフ

3.1 概要

本章では、位置・方向情報を考慮した近接グラフを提案する。提案するグラフを、位置・方向情報近接グラフと呼ぶ。位置・方向情報付写真を、位置・方向情報を持つ空間上の点として扱い、グラフのノードとする。グラフは有向グラフとする。グラフ作成のための入力情報は次の通りである。

- ・ 対象領域（地図上の矩形領域として与える）
- ・ 対象領域内の位置・方向情報付写真群（撮影位置と撮影方向を利用する）

目的は、グラフ上のノードをたどる際に、写真の撮影方向や、ノード間の方向（進行方向）と撮影方向が、なだらかに変化するようなグラフである。グラフの要件を以下にまとめる。

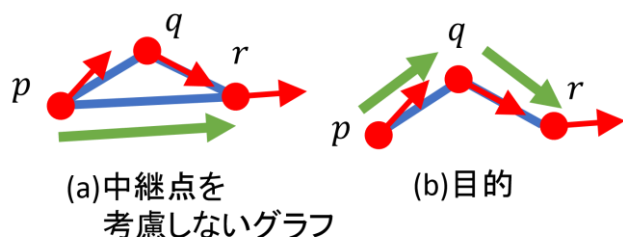


図 4 位置・方向情報近接グラフの概念図

位置関係に関する要件

- ・ ノードの位置関係や方向関係を考慮して、2 ノード間に中継点となるようなノードが存在する場合、2 ノードを直接接続せず、中継点を経由するように接続する

方向関係に関する要件

- ・ グラフ上で接続された 2 ノードの方向（撮影方向）が変化しすぎないようにする
- ・ グラフ上で接続された 2 ノード間をエッジに沿って移動する際に、始点ノードの方向と大きく変わらない方向に進む（後ろ向きに進まない）ようにする

位置関係に関する要件を図 4 で説明する。赤色の矢印 p , q , r が位置・方向情報付写真（撮影位置から撮影方向への矢印）であり、これらをグラフのノードとする。青色の線をグラフのエッジ、緑の矢印を経路とする。図 4(a)は、対象とする 3 ノード間すべてにエッジを生成したグラフであり、図 4(b)は目的とするグラフである。今、ノード p からノード r への最短経路を考える。図 4(a)の場合、 p と r を直接結ぶ経路が生成される。しかし、 q を中継点として経由する方が、ノード間の距離が小さい、よりなだらかな経路となる。そこで本研究では、図 4(b)のように、 q を経由する経路を生成するグラフを目的とする。

以降、3.2 節で、位置関係に関する要件の実現に応用する関連技術として、ガブリエルグラフについて説明する。3.3 節で、方向関係に関する要件を、具体的な条件として定義する。3.4 節で、グラフの生成手法を、ノードの接続条件として定義する。

3.2 ガブリエルグラフ[14]

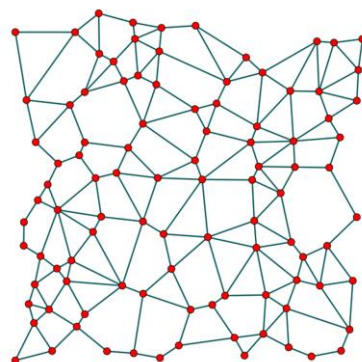


図 5 ランダムな 100 点によるガブリエルグラフ(出典：wikipedia)

近接グラフは、位置情報を持つ点群データを対象とし、各点をノードとし、点の位置の近接性に基づいてエッジを生成するグラフの総称である。近接グラフの一種として、ガブリエルグラフ[14]が存在する。例を図5に示す。ガブリエルグラフの構築方法は、任意の2ノード間のエッジの生成条件として定義される。すなわち、任意の2ノードを直径とした円内に他のノードが存在しない場合に2ノード間にエッジを生成する。

本研究では、ノードの位置関係に関する要件に対応するため、ガブリエルグラフの構築手法を参考にする。ただし、ガブリエルグラフは本来方向情報を考慮しないため、本研究では、後述のとおり、方向情報を考慮したエッジ生成条件を用いる。

3.3 方向情報に関する連続性の条件

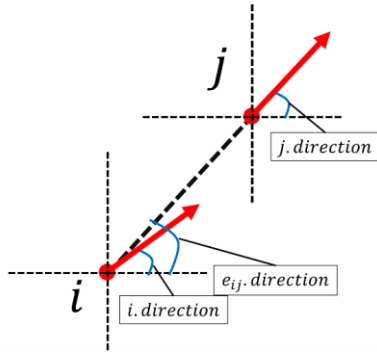


図 6 方向情報と進行方向の概念図

方向情報に関する接続条件を次のように定義する。図6に示すとおり、任意の2ノード*i, j*をそれぞれ始点、終点とし、それぞれの持つ方向情報を*i.direction, j.direction*とする。また、*i*から*j*に向かう直線のことを進行方向と呼び、*e_{ij}.direction*と表す。ここで、以下の条件を満たす時、始点ノード*i*と終点ノード*j*は「方向情報に関する連続性の条件を満たす」と定める。

- (1) *i.direction*と*j.direction*の差 $\leq \alpha$ かつ
- (2) *i.direction*と*e_{ij}.direction*の差 $\leq \alpha$

ここで、 α は角度の閾値である。

図7に例を示す。図7(a)は方向情報に関する連続性の条件を満たす。図7(b)は、条件(2)は満たしているが、条件(1)を満たしていないため、方向情報に関する連続性の条件を満たさない。図7(c)は条件(1)は満たしているが、条件(2)を満たしていないため、方向情報に関する連続性の条件を満たさない。

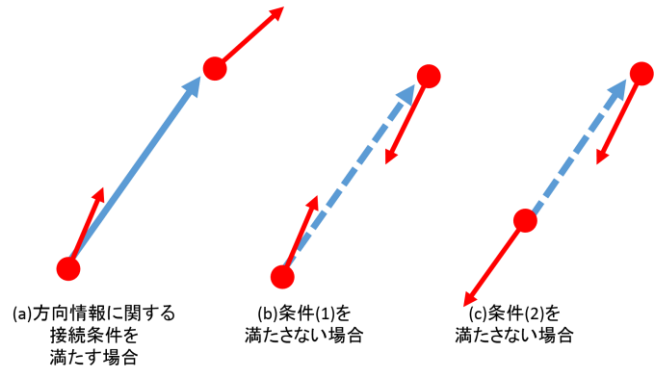


図 7 方向に関する連続性の条件の例

3.4 位置・方向近接グラフの構築手法

任意の異なる2ノード*i, j*(順序を考慮する)について、以下の条件(1)(2)の両者が成り立つ場合、*i*を始点、*j*を終点として接続し、エッジを生成する。

- (1) 始点*i*、終点*j*が、方向情報に関する接続条件を満たす。
- (2) *i, j*を直径とする円内に、以下いずれかを満たすノード*m*が存在しない
 - (2.1) 始点*i*、終点*m*が、方向情報に関する接続条件を満たす
 - (2.2) 始点*m*、終点*j*が、方向情報に関する接続条件を満たす

例を図8に示す。

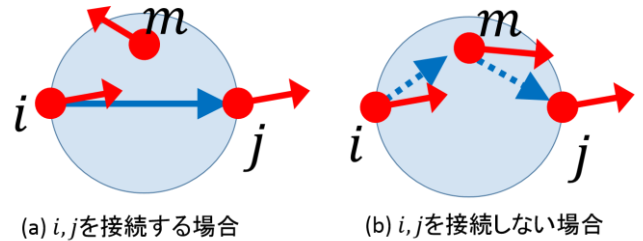


図 8 2ノードの接続条件

図8(a)のノード*i, j*は接続条件を満たす。一方、図8(b)の場合、条件(2-1)、(2-2)を満たすノード*m*が*i, j*を直径とする円内に存在するため、位置関係に関する接続条件を満たさない。

3.5 位置・方向近接グラフの作成事例

人工データを用いて位置・方向情報近接グラフの作成実験を行った。人工データは、位置・方向情報付写真データと同じく、位置情報、方向情報を持つ。ノードの接続条件における α の値は90度とした。

経路状にグラフを作成することができた例を図9に示す。

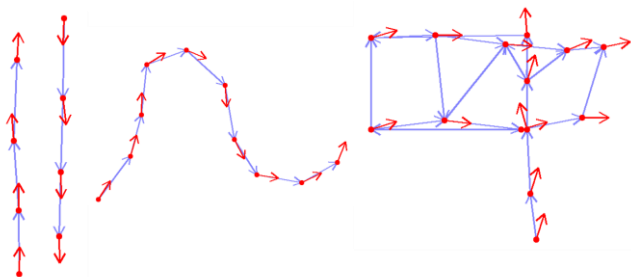


図 9 位置・方向情報近接グラフの成功例

経路状に配置されたデータ群の場合、2 つの接続条件によって位置・方向・進行方向に従ってなだらかな経路状のグラフが作成できている。この近接グラフを探索した場合、データの持つ位置・方向・進行方向について連続性を持つ経路を作成できる。一方、意図したとおりに作成できなかった例を図 10 に示す。

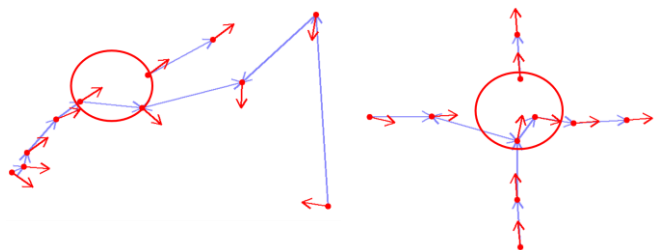


図 10 位置・方向情報近接グラフの失敗例

図 10 のように、分岐や交差が発生する場合、意図せずグラフのエッジが欠落する場合がある。

このエッジの欠落の原因として、次のような理由が考えられる。

あるノードからのエッジを形成する際は、撮影方向・進行方向の差異が閾値内の対象ノード群のうち、最も距離の近いものだけにエッジが形成される。そのため、条件を満たしてエッジを形成したノードの他に、そのノードと同様に撮影方向・進行方向の差異が小さく、そのノードと大きく変わらない距離にあるノードとのエッジが形成されない。概念図を図 11 に示す。

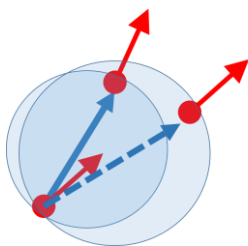


図 11 エッジ欠損の概念図

3.6 後ろ向き探索による再接続手法

エッジの欠落を改善するため、後ろ向き探索による再接続手法を提案する。他のノードから接続されていない(そのノードを終点としたエッジが生成されていない)終点ノードを k とし、各 k について後述の条件を満たす始点ノード i のうち、 k との距離が最短のものを接続する。 i の条件を次に示す。

- ・ i と k が方向に関する連続性の条件を満たす and
- ・ i と k の距離 $\leq i$ を始点とする全エッジの長さの平均 $\times 1.5$

概念図を図 12 に示す。

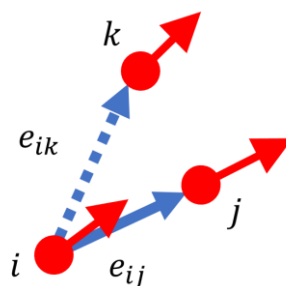


図 12 後ろ向き探索による再接続手法の概念図

提案する再接続手法を図 10 の例に対して適用した結果を図 13 に示す。

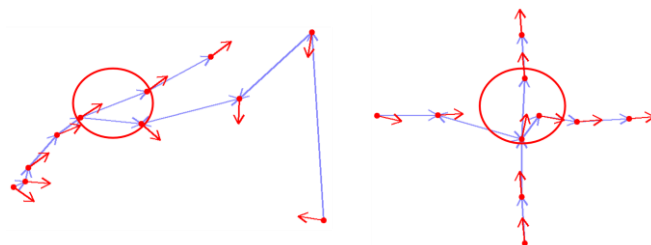


図 13 再接続の例

再接続の手続きを行った後では、分岐や交差においてエッジの欠落が起こらないことがわかる。

3.7 Authority/Hub spot のグラフへの組み込み

authority spot や hub spot を部分グラフとして位置・方向情報近接グラフに組み込む。

例として authority spot を対象とした組み込み手法の概念図を図 14 に示す。スポット内はガブリエルグラフの接続条件で双方向のエッジを生成する。スポット外の 1 ノードとスポット内の複数のノードが接続する場合、エッジは最短のエッジ以外は削除する。hub spot についても同様の方針でグラフに組み込む。

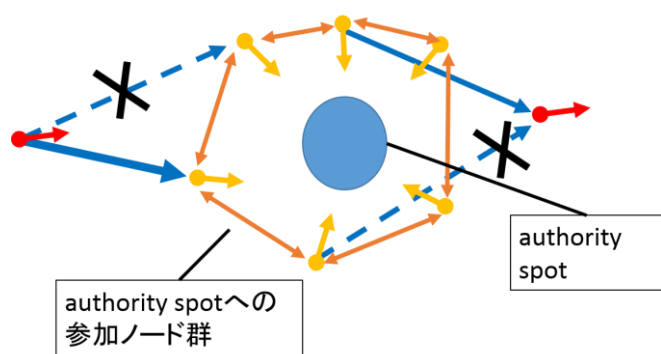


図 14 スポットの組み込み

4. 検証

実データによる検証を行った．入力データを次にまとめる．

- ・ 対象領域：柴又駅～帝釈天周辺
- ・ 写真データ：対象領域内の位置・方向情報付写真データ 72 件

図 15～18 に検証を行った図を示す．



図 15 位置・方向情報付写真データ群

図 15 は位置・方向情報付写真データを地図上に表示したものである．赤い点が各撮影位置，点から伸びる矢印が撮影方向である．

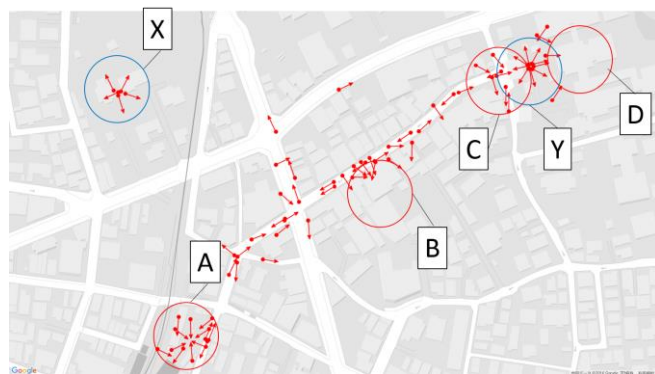


図 16 スポットの抽出

図 16 はスポットを抽出した図である．A,B,C,D は authority spot, X,Y は hub spot である．

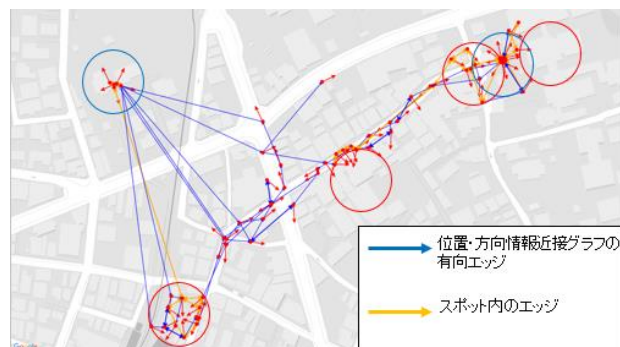


図 17 位置・方向情報近接グラフの作成

図 17 は対象のデータに対して，位置・方向情報近接グラフを作成し，スポットを組み込んだ図である．青い矢印がグラフの有向エッジ，橙色の線がスポット内のエッジを示す．

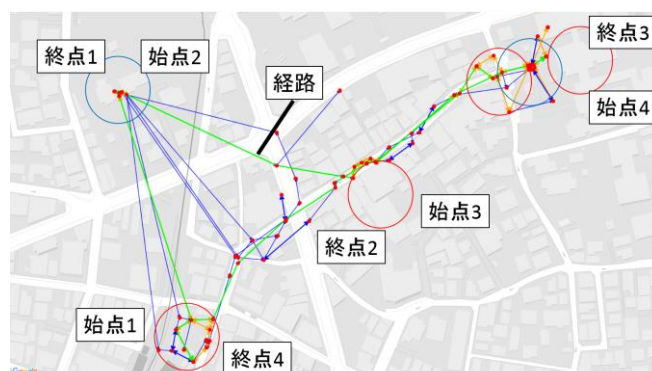


図 18 空間要約経路の例

図 18 は各スポットを始点・終点として指定し，最短経路探索を繰り返して作成した空間要約経路の例である．黄緑色の線が経路を示す．

5. 評価

生成したグラフから空間要約経路にあたる巡回路の自動生成を行う手法は今回の提案に含まない．そこで，提案手法の評価を，任意の 2 ノードを始点と終点とする最短経路群を対象とした定量的評価と，任意の 2 スポットを始点と終点とする最短経路群を対象とした定性的評価によって行った．

5.1 定量的評価

任意の 2 ノードを始点と終点として生成した各最短経路を対象とし，経路の視覚的連続性についての評価を行った．評価指標は連続する 2 ノードの撮影方向の差の平均とした．比較対象を以下にまとめる．

(a) 初等的手法

(b) 位置・方向情報近接グラフから作成した経路

ここで、初等的手法とは、入力データからガブリエルグラフを作成後、エッジが張られている2ノードについて、2ノード間の方向の差異が90度以上のエッジを切断する手法で作成したグラフである。図15の入力データに対して初等的手法で作成したグラフを図19に示す。

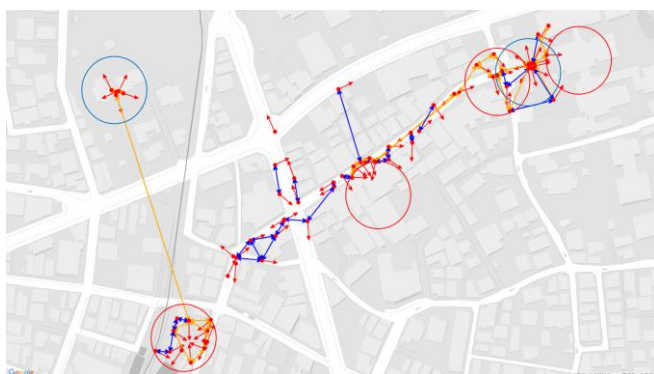


図 19 初等的手法によるグラフ

評価の結果をグラフにまとめて示す。x 軸は任意の2ノードを始点と終点として生成した各最短経路を経路の長さ(経路に含まれるノード数)ごとに集約したものである。また、y 軸は連続する2ノードの撮影方向の差の平均を示す。単位は rad である。

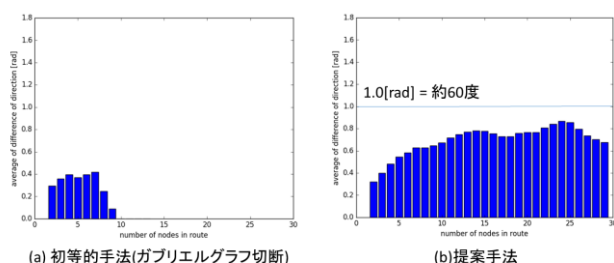


図 20 連続する2ノードの方向の差異の平均

図20は(a)初等的手法と(b)提案手法($\alpha = 90$)を比較したグラフである。(a)の初等的手法は(b)の提案手法から作成した経路に比べて長い経路が存在しない。また、提案手法は方向の差が約60度に収まる、より長い経路を生成できていると言える。

5.2 定性的評価

提案手法によるグラフ上のスポット間を結ぶ各経路を評価対象として、経路構造に対する定性的評価を行った。

図21に、入力データから提案手法で抽出されたスポットとグラフを示す。A,B,C,Dは authority spot であ

り、X,Yは hub spot である。ここから、地図などの情報を用いて目視で確認した、正解として想定される経路構造を図22に示す。



図 21 抽出されたスポットとグラフ

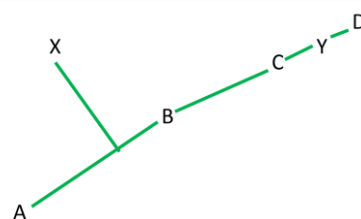


図 22 正解として想定される経路構造

提案手法が正解として想定される経路構造をどの程度再現するかについての評価を行った。評価項目を次にまとめる。

- (a) スポット間が到達可能
- (b) 正解として想定される経路において、スポット間の経路上に他のスポットが存在する場合、そのスポットを経由する(例えば、B から D に向かう経路の場合、C,Yを経由する)
- (c) スポット間の経路が他のスポットを迂回しない(例えば、A から B に向かう経路の場合、Xを経由せずに経路がつながる)

提案手法によるグラフからスポット間の経路構造を抽出した図を図23に示す。

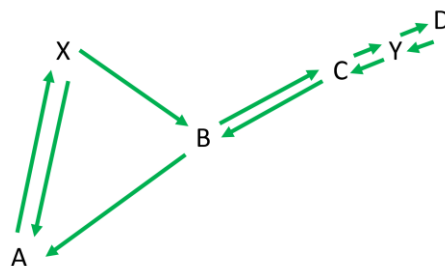


図 23 抽出されたスポット間の経路構造

図 23 は、始点スポットから終点スポットへの経路を作成した際に、評価項目を満たしていた場合に始点スポットから終点スポットへ向かう矢印をひいて作成した図である。

正解として想定される経路構造に対する、提案手法によるグラフから抽出したスポット間の経路構造の再現率を次のように定める。

$$\text{再現率} = \frac{\text{評価項目を満たす経路数}}{\text{全経路数}}$$

図 23 から、評価項目を満たす経路数は 22 であり、全経路数は 30 である。したがって、再現率は約 73% であり、任意の 2 スポットを始点・終点として入力する場合、約 73% の確率で妥当な経路を生成していることがわかった。

6. まとめ

本稿では、位置・方向情報付写真データを用いて、対象空間から特徴的な領域を抽出し、経路を作成して総合的に対象空間の概要を提示することを目的とし、空間要約経路を定義してその作成手法を提案した。

視覚的連続性の制約を満たす空間要約経路を作成するため、写真データをノードとし、ノードの位置情報と方向情報を考慮した近接グラフである、位置・方向情報近接グラフを提案した。具体的には、グラフの作成手法を、2 ノードの接続条件として定義し、2 ノードの間に中継点となるようなノードが存在するかを条件判定の基準とした。

実データにより提案手法を評価し、以下を確認した。

- ・ 提案したグラフは、任意のノードを始点・終点とする最短路として、視覚的連続性を持つ経路を生成可能である。
- ・ 提案したグラフは、写真データの存在する領域においては、実世界の経路構造に対して高い再現率を持つ。

本稿では、作成した近接グラフ上での巡回路生成手法等は提案していないが、以上の結果から、提案した近接グラフは、既存のさまざまな巡回路生成手法を適用可能であり、視覚的連続性の高い空間要約経路を生成すると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 藤田秀之, 有川正俊, “空間関係に基づく写真と注釈のデータ相補発展”, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.5, pp.63-76, 2006.
- [2] Hideyuki Fujita, Masatoshi Arikawa, “Animation of mapped photo collections for storytelling,” IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E91-D, No.6, pp.1681-1692, 2008.
- [3] Noah Snavely, Rahul Garg, Steven M. Seitz, Richard Szeliski, “Finding Paths through the World’s Photos,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2008), pp.11-21, 2008.
- [4] Xin Lu, Changhu Wang, Jiang-Ming Yang, Yanwei Pang, Lei Zhang, “Photo2Trip Generating Travel Routes from Geo-Tagged Photos for Trip Planning,” In Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia (MM 2010), pp.143-152, 2010.
- [5] Bart Thomee, “Localization of Points of Interest from Georeferenced and Oriented Photographs,” In Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Geotagging and its applications in multimedia (GeoMM 2013), pp.19-24, 2013.
- [6] 白井元浩, 廣田雅春, 石川博, 横山昌平, “ジオタグ付き写真を用いた関心領域と撮影スポットの発見”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J97-D, No.4, pp.835-844, 2014.
- [7] Edward Segel, Jeffrey Heer, “Narrative Visualization Telling Stories with Data,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (InfoVis 2010), pp.1139-1148, 2010.
- [8] Visualizing Data: A Harvard Business Review Insight Center Report, 2013.
- [9] 相楽翔太, 藤田秀之, 大森匡, 新谷隆彦, “位置・方向情報付写真群を用いた Data storytelling に向けた Storyline 構成手法”, 第 14 回情報科学技術フォーラム(FIT 2015), D-029, 2015.
- [10] Fosca Giannotti, Mirco Nanni, Fabio Pinelli, Dino Pedreschi, “Trajectory pattern mining,” In Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD 2007), pp.330-339, 2007.
- [11] Jing Wang, Xin Wang, “A Spatial Clustering Method for Points-with-Directions,” In Proceedings of the 7th international conference on Rough Sets and Knowledge Technology (RSKT 2012), pp.194-199, 2012.
- [12] M. Shahriar Hossain, Patrick Butler, Arnold P. Boedihardjo, Naren Ramakrishnan, “Storytelling in Entity Networks to Support Intelligence Analysts,” In Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD 2012), pp.1375-1383, 2012.
- [13] Gunhee Kim, Eric P. Xing, “Reconstructing Storyline Graphs for Image Recommendation from Web Community Photos,” In Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014), pp.3882-3889, 2014.
- [14] K. Ruben Gabriel, Robert R. Sokal. “A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis,” Systematic Zoology, Vol.18, No.3, pp.259-278, 1969.