

空間関係に基づく写真と注釈のデータ相補発展

藤田 秀之[†] 有川 正俊[†]

本論文は撮影位置や撮影方向等の情報を持つデジタル写真に対して、ラベルやコメントとして入力された実世界の対象や場所に関する情報を、空間的に組織化し共有する手法を提案する。写真が持つ地理座標に基づいて写真集合内でラベルを相互に伝播させる仕組みは有用であるが、同一地点から撮影した写真であっても、異なる方向を撮影していれば異なる対象が写っているため、一方の写真が持つラベルデータが他方の写真に適切であるとは限らない。そこで提案手法では、まず写真に入力されたラベルを収集し、それらの空間関係に基づいてラベル対象の地理座標を決定する。続いてラベル対象の地理座標と写真が切り取る空間の包含関係に基づき、ラベル対象が写っていると考えられる写真にそのラベルを伝播させる。提案手法をラベル共有システムとして実装し、ラベルの共有、ラベルを利用した写真の検索、および写真上の適切な位置へのラベルの配置を実現した。

Complementary Data Development of Photographs and Annotations Based on Spatial Relationships

HIDEYUKI FUJITA[†] and MASATOSHI ARIKAWA[†]

This paper proposes a new framework for sharing text labels among photograph collections. A simple method is propagating label data based on geographic proximity of positions where photographs were taken. However, even if two photographs were taken from the same position, they may show different directions, and quite different scenes, and a text label for one photograph may not be appropriate to the other photograph. We, therefore, suggest a label sharing system based on spatial relationships of photographs. The system (i) stores label data placed on photographs by users, and (ii) computes geographic locations of objects in the real world pointed by stored labels. When a photograph requires label data, the system (iii) selects and shares all label data which are judged to be seen in the photograph by considering its field of view (FOV). Our prototype system realizes sharing labels among photo collections, retrieving photographs by labels, and mapping labels on appropriate positions on photographs.

1. はじめに

カーナビや携帯電話でのヒューマンナビゲーションといった、一般利用者を対象とする位置情報サービスにおいて、実世界の位置キーを持つ情報コンテンツである空間コンテンツは非常に重要である。位置キーによる連携は自己組織的なコンテンツ空間の拡大や新たな空間関係の推論の枠組みとなる¹⁾。本論文では、撮影位置や撮影方向等の情報を持つデジタル写真、およびそれらに対してラベルやコメントとして入力された実世界の対象や場所に関する情報を、空間コンテンツとして活用することを念頭に、それらを Web 上での協調作業により空間的に組織化し共有する手法を提案する。本論文が撮影位置や撮影方向等の情報を持つデジ

タル写真に着目する背景は次のとおりである。携帯電話に搭載されたものを含めてデジタルカメラが普及しており、多くの利用者が日常的に写真を撮影している。また、同じく携帯電話に搭載されヒューマンナビゲーションに利用される例にみられるように、GPS や電子コンパス等の空間センサが個人向けのデバイスとして普及し始めている。加えて、2008 年以降販売されるすべての携帯電話に対して測位機能を搭載することが総務省の決定により義務付けられた。これらの空間センサを利用することで写真を撮影しながら同時にカメラの位置や方向を取得できる。また、デジタルカメラで撮影した写真ファイルのメタデータの業界標準として、日本電子工業振興協会が定める EXIF format²⁾ が国内外を問わず普及しており、国産の民生用デジタルカメラではほぼ 100% が対応している。対象となるメタデータには、基本的な撮影条件（撮影日時、シャッタースピード、絞り、ホワイトバランス等）に加え、空間

[†] 東京大学空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo

的なパラメータ（撮影位置，撮影高度，撮影方向，測地系，GPS 精度等）も含まれる．EXIF 情報は JPEG や TIFF といった一般的な写真ファイルのヘッダ部分に記録されるため，写真ファイルが空間メタデータと一体となって流通することになる．GPS，電子コンパスおよびカメラを搭載し，写真ファイルに空間的なメタデータを EXIF format で記録する携帯電話も販売されている．以上より，今後，撮影位置や撮影方向といった空間的なメタデータを埋め込まれたデジタル写真データが流通することが想定される．筆者らはこのような写真を空間スキーマ付き写真と名付け，撮影位置や撮影方向に基づく空間的な検索手法や，他の空間データとの重ね合わせの手法を提案してきた^{3),4)}．

一方で，デジタル写真の空間コンテンツとしての情報の豊かさを高めるには，利用者が入力するラベルやコメント等のテキスト情報が不可欠である．ラベルは撮影対象を明示し，テキストをキーとした写真データの組織化を実現する．画像検索サービス⁵⁾ や市販アルバムソフト⁶⁾ の多くがラベルテキストにより写真データを組織化している．一部のアルバムソフトは，ラベルやコメントも EXIF 情報として写真ファイルのヘッダに記録する．ラベルをキーとした写真の検索やコミュニティの生成を実現している大規模な Social Network Service もある⁷⁾．ラベルテキストにより大量の写真データを組織化する際，以下の問題点がある．

- 大量の写真に対してラベルをすべて人手で入力するのは負荷が高い

そこで本論文では，対象とする写真を空間スキーマ付き写真とし，また扱うラベルを新たに提案する空間ラベルとすることで，空間的に組織化し共有する手法を検討し，ラベル共有システムとして実装した．空間ラベルとは，対象を実世界の場所に直接的に関連するものに絞り，かつ空間的に拡張したラベルであり，利用者は写真上で対象の写る位置を指定してラベルを記入する．たとえば，「東京タワー」「忠犬八公」といったラベルを対象としており，「誕生日」「新製品」といったラベルは現時点では対象外である．ラベル共有システムの動作は次のとおりである．

- (1) 空間スキーマ付き写真に対して入力された空間ラベルデータを蓄積する．
- (2) 蓄積した空間ラベルの地理座標を算出する．
- (3) ラベル共有システムにラベルデータを要求した空間スキーマ付き写真に対して，蓄積したラベルデータのうち，対象がその写真に写っていると考えられるものすべてを提供する．ラベルは写真上の適切な位置に重ね合わせて表示される．

本論文で取り組んだより具体的な問題点は次のとおりである．

- GPS 等で取得した撮影位置の情報を持つ写真に対するラベルであっても，そのラベルの地理座標として写真の撮影位置が適切とは限らない．

たとえば，同一地点から撮影した写真であっても，異なる方向を撮影していれば異なる対象が写っているため，一方の写真に対するラベルが他方の写真に適切なものとは限らない．そこで本論文では，ラベルが指し示す実世界の対象の位置をそのラベルの地理座標とし，これを撮影時のカメラの位置である撮影位置と区別する．

提案手法に関して，次のような利用環境が想定される．「GPS と電子コンパスを搭載したデジタルカメラで，渋谷駅八公前交差点付近の空間スキーマ付き写真を撮影した．ラベル共有システムにアクセスし，『Q-FRONT』『センター街入口』というラベルデータを取得した．写真上に表示させると，白い建物とその脇のゲート上にそれぞれ『Q-FRONT』『センター街入口』というテキストが配置された．建物上に配置された『Q-FRONT』というテキストをクリックすると商業ビルである『Q-FRONT』の公式サイトが表示された．次に，写真上をクリックし『西村フルーツパーラー』というテキストラベルとコメントを入力し，ラベル共有システムに登録した．同一のラベルが登録済みであったため，このラベルの地理座標が算出され，他の空間スキーマ付き写真にも伝播することになる．

本論文の構成は次のとおりである．まず，対象データである空間スキーマ付き写真，および空間ラベルのデータ構造と，提案するラベル共有システムの構成をまとめる（2章）．これらを前提として，空間スキーマ付き写真に写っていると推定されるラベルをラベル集合から検索し提供する手法（3章）と，同一対象を指し示す複数のラベルから対象の地理座標を決定する手法（4章）を説明する．次に，提案手法を実装したプロトタイプシステムを紹介し（5章），関連研究と本研究の位置付けをまとめ（6章），提案手法における誤差伝播の考察を行い（7章），最後に結論と今後の課題をまとめる（8章）．

2. データおよびシステム構成

本章では，本論文が対象とする写真データである空間スキーマ付き写真データと，同じく本論文が対象とするラベルデータである空間ラベルデータに関して，データ構造と幾何学モデルを定義し，続いてラベル共有システムの構成と，処理手順を説明する．

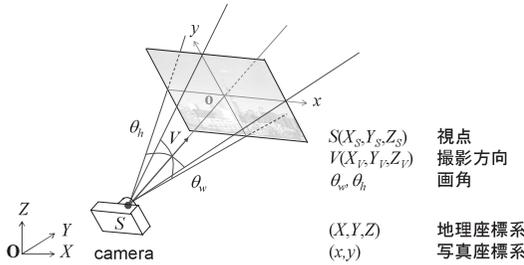


図 1 空間スキーマ付き写真
Fig. 1 Spatially schematized photograph.

まず、本論文が対象とする空間スキーマ付き写真データ p は次の構造を持つ。

$$p = (image, fov, L) :$$

空間スキーマ付き写真データ

ここで、写真イメージ $image$ は画像自体を、 fov は写真が持つ空間スキーマを示し、空間ラベル集合 $L = (l_1, l_2, l_3, \dots)$ は写真に対応付けられた空間ラベルデータ l_i の集合である。空間スキーマ fov は以下のように構成される。

$$fov = (S, V, \theta_w, \theta_h) : \text{空間スキーマ}$$

ここで視点 $S = (X_S, Y_S, Z_S)$ は写真撮影時のカメラの位置であり、撮影方向 $V = (X_V, Y_V, Z_V)$ は写真撮影時のカメラの撮影方向ベクトルである。それぞれ地理座標で表現する。画角 θ_w, θ_h は写真が切り取る空間の縦横の幅を決定する。異なるカメラ間でのレンズの焦点距離の違いや同一のカメラにおけるズーム値の変化が、画角の変化に対応する。なお、撮影位置および撮影方向は GPS や電子コンパス、ジャイロセンサといった空間センサで取得可能な値であり、現時点では GPS を搭載した携帯電話のデジタルカメラが、これらの値を画像ファイルのヘッダに EXIF 情報として記録する。画角は焦点距離と CCD サイズから算出可能であり、現時点でも前述の測位センサを搭載しない一般的なデジタルカメラが記録する EXIF 情報から算出可能である。各パラメータの空間的な関係を図 1 に示す。

次に、空間ラベルデータ l は次の構造を持つ。

$$l = (text, M, m) : \text{空間ラベルデータ}$$

ラベルテキスト $text$ はラベルが指し示す対象を表す文字列である。写真座標 $m = (x_m, y_m)$ はラベルが指し示す対象の写真上でのピクセル座標である。地理座標 $M = (X_M, Y_M, Z_M)$ はラベルが指し示す対象の実世界での位置である。各パラメータの関係を図 2 に示す。

本論文では、利用者が写真上をクリックして写真上位置 m を指定し、ラベルテキスト $text$ を入力してラ

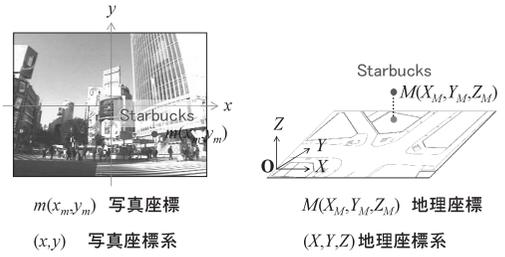


図 2 空間ラベル
Fig. 2 Spatial label.

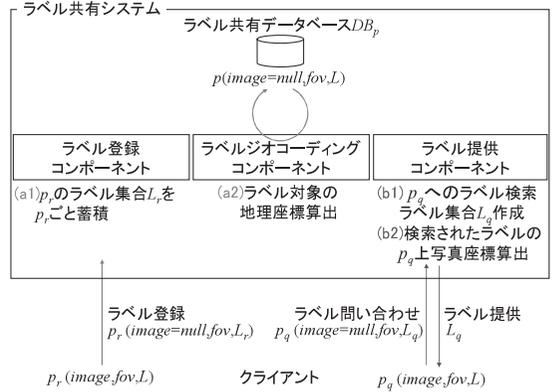


図 3 ラベル共有システム
Fig. 3 Label sharing system.

ベルデータを作成することを想定している。したがって、ラベル入力時に写真座標 m は定まるが、地理座標 M は未知である。また、1 枚の写真が複数のラベルデータを持つこととする。

次に、ラベル共有システムの構成は図 3 のとおりである。システムの動作を以降にまとめる。

空間ラベルデータ登録：ラベル l_r が入力された空間スキーマ付き写真 p_r を登録

(a1) 登録するラベル l_r を、ラベルが入力された空間スキーマ付き写真 $p_r = (image, fov, L_r | image = null, l_r \in L_r)$ ごと共有データベース DB_p に蓄積。

(a2) l_r の地理座標を算出。

空間ラベルデータ提供：空間スキーマ付き写真 p_q に対して適切なラベル集合 L_q を提供

(b1) DB_p 中の地理座標を持つラベルから、ラベルを要求した空間スキーマ付き写真 $p_q = (image, fov, L_{qold})$ に写っている空間ラベル集合 L_{qall} を検索。

(b2) p_q が持っていたラベル (L_{qold} 中のラベル) を L_{qall} から除いたラベル集合を L_{qnew} とする。 L_{qnew} 中の各ラベルについて、 p_q 上での写真座

標を算出し, $L_q = L_{qold} \cup L_{qnew}$ を p_q に対するラベル集合とし提供.

本システムにおいてクライアントとラベル共有システムの間で送受信されるデータは, 空間ラベルデータを含む空間スキーマ付き写真データ p であるが, 写真イメージ $image$ は送受信されない. つまり, (a1) で共有データベースに蓄積される p_r や, (b1) でラベルデータ問合せの際にシステムに渡す p_q に関して $image = null$ である. (a2) は空間ラベルジオコーディングコンポーネントが行う処理であり, 詳細を4章で説明する. (b1), (b2) は空間ラベル検索コンポーネントが行う処理であり, 詳細を3章で説明する.

3. ラベルデータ提供

ラベル共有システムに空間ラベルを要求した空間スキーマ付き写真に対して, 共有データベースから, その写真に写っている空間ラベルを検索し, 写真に写るラベル対象の位置に配置して提供する手法を示す. 以下に示す空間関係を利用した段階的な処理を行う.

- (1) 空間スキーマ付き写真の画角内に含まれる空間ラベル集合を共有データベースから検索する.
- (2) 検索された各空間ラベルの写真座標を算出する. それぞれ3.1節, 3.2節で説明する. 本章の提案手法は地理座標を持つラベルを対象としており, 写真座標のみを持つラベルは共有できない. そこで, ラベルの地理座標を算出する手法に関しては4章でまとめる.

3.1 ラベルデータ検索

空間ラベルの指し示す実世界の対象が, 空間スキーマ付き写真に写っているかどうかの判定を, 両者の空間的な包含関係を利用して行う. すなわち, 写真が切り取る空間内にラベル対象の地理座標が含まれる場合, ラベル対象が写真に写っていると判定する. たとえば, 図4は空間スキーマ付き写真 p と空間ラベル l_1, l_2, l_3 との関係を XY 平面上で表したものであり, S は p の視点, V は p の撮影方向ベクトル, θ_w は p の画角である. このとき l_2, l_3 が写真に写っている空間ラベルである.

以降で検索処理を具体的に記述する. 写真が切り取る空間と実空間の点の包含関係を次に示す関数 $InView$ を用いて表す.

$$InView(fov, Q) = \begin{cases} true & \text{if } Q \text{ is contained in } fov \\ false & \text{if } Q \text{ is not contained in } fov \end{cases} \quad (1)$$

$fov = (S, V, \theta_w, \theta_h)$ は, 写真 p の空間スキーマであり, $Q = (X, Y, Z)$ はある点の地理座標である.

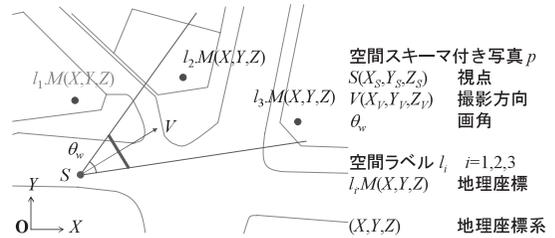


図4 空間スキーマ付き写真へ提供するラベルデータ

Fig. 4 Provided labels to a spatially schematized photograph.

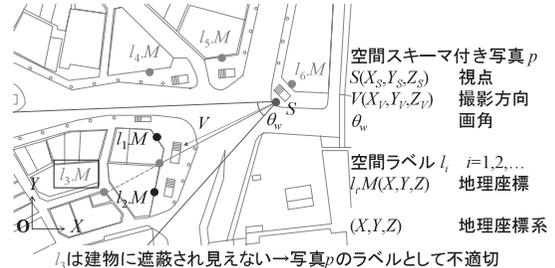


図5 地図データを利用した遮蔽の考慮

Fig. 5 Screening a line of sight using map data.

関数 $InView$ は Q が写真 p の画角内に含まれるとき $true$ を返す. 具体的には次の式を満たすとき $InView(fov, Q) = true$ である.

$$\left| \arccos \frac{(Q - fov.S) \cdot fov.V}{|Q - fov.S| |fov.V|} \right| \leq \frac{fov.\theta_w}{2} \quad (2)$$

これを用いて写真 p に適切な空間ラベル集合 L_p は次のように表される.

$$L_p = \{l \mid InView(p.fov, l.M) = true\} \quad (3)$$

次に, ある写真の視点から見て建物等の裏側にある対象は, 写真が切り取る空間内にあっても写真には写らないはずである. そこで地図データを利用して建物等により遮蔽されるラベルを除外する. たとえば, 図5において, l_3 が建物に遮蔽されて写真に写らないため除外される.

以降でこの処理を具体的に記述する. 実世界の道路や建物等(地物)の形状を, 点や点の列である線分や多角形, 立体として表現したデータである, 地物形状データを $feature$ と表す. また, 関数 $Intersection$ を, 2つの地物形状データを引数とし, 両者が空間内で交差する場合 $true$ を返す関数とする.

$$Intersection(feature_1, feature_2) = \begin{cases} true & \text{地物 } feature_1, feature_2 \\ & \text{が交差する} \\ false & \text{地物 } feature_1, feature_2 \\ & \text{が交差しない} \end{cases} \quad (4)$$

これらを用いて, L_p から, 対象が遮蔽されて見えないものを除外した集合 $L_{p'}$ は次のように表される.

$$L_{p'} = \left\{ l \mid \begin{array}{l} l \in L_p, \forall feature \in MAP.building, \\ \neg Intersection(feature, V_{pl}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

MAP は地物形状データの集合としての地図データであり, $MAP.building$ は, そのうち建物データの集合である. V_{pl} は写真 p の視点からラベル l の地理座標への半直線である. なお, 本手法では地図データとして存在しない対象による遮蔽は考慮されない.

3.2 写真上へのラベル配置

ラベルが指し示す対象の写真上での位置は, その実世界での座標を写真平面上へ射影することで得られる. 以降で具体的に記述する. 関数 $ProjectionToPhoto$ を写真 p の空間スキーマ $fov = (S, V, \theta_w, \theta_h)$ と, ある点の地理座標 $Q = (X, Y, Z)$ を引数とし, Q を写真 p の写真座標系上に射影した座標 $q = (x, y)$ を返す関数とする.

$$q = ProjectionToPhoto(fov, Q) \quad (6)$$

これを用いて, 地理座標 $M = (X, Y, Z)$ のラベルの写真 p 上での写真座標 $m = (x, y)$ は以下のように記述できる.

$$m = ProjectionToPhoto(p.fov, M) \quad (7)$$

以降で関数 $ProjectionToPhoto$ の具体的な内容を示す. 図 6 に示すように, 実空間内のある点の地理座標 $Q = (X, Y, Z)$ とその写真座標 $q = (x, y)$ の間には以下の共線条件式が成立する⁸⁾.

$$x = -c \frac{a_1(X - X_S) + a_4(Y - Y_S) + a_7(Z - Z_S)}{a_7(X - X_S) + a_8(Y - Y_S) + a_9(Z - Z_S)} \quad (8)$$

$$y = -c \frac{a_2(X - X_S) + a_5(Y - Y_S) + a_8(Z - Z_S)}{a_7(X - X_S) + a_8(Y - Y_S) + a_9(Z - Z_S)} \quad (9)$$

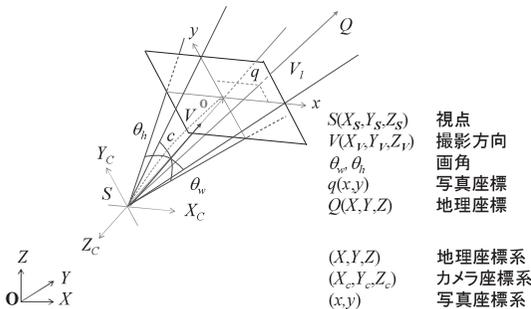


図 6 共線条件式

Fig. 6 Colinearity equation.

$S = (X_S, Y_S, Z_S)$ は写真の視点である. (a_1, a_2, \dots, a_9) は撮影方向を地理座標系の Z 軸に重ねる 3 次元回転行列 R の要素であり, 撮影方向 V の値から算出される.

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} = R \quad (10)$$

c は焦点距離であり, 画角 θ_w , CCD サイズの横幅 w との間に次の関係が成立する.

$$c = \frac{w}{2 \tan \frac{\theta_w}{2}} \quad (11)$$

式 (8), (9) における写真座標は, 焦点距離, CCD サイズと同一の単位で算出される. 本論文では, 式 (11) の w に対して画像サイズ (ピクセル座標) の横幅を用いることで, 写真座標を画像サイズと同一の単位であるピクセル座標として算出する. 空間スキーマ付き写真では, $(X_S, Y_S, Z_S), (a_1, a_2, \dots, a_9), \theta_w, w$ が既知であるため, 式 (8), (9) において Q にラベルの



図 7 ラベルの写真上への配置

Fig. 7 Label placement on a spatially schematized photograph.



図 8 ラベルの写真下部への配置

Fig. 8 Label placement below a spatially schematized photograph.

地理座標 M を代入することで、ラベルの写真座標 m が q として算出される。

最後に写真 p の写真イメージ $image$ 上にラベル集合 L_p 中のすべてのラベルデータを配置した例を図 7 に示す。また、本節では、空間ラベルの地理座標や空間スキーマ付き写真の空間スキーマの各要素といった地理座標を高さ Z 座標を持つ 3 次元座標として議論してきたが、 Z 座標を持たない 2 次元座標が含まれる場合は、写真座標の座標のみ算出できるため、図 8 に示すように写真イメージの下部にラベルを配置する。

4. ラベル対象の地理座標算出

本章では、空間ラベルの地理座標を算出する手法を提案する。3 章の手法では、地理座標を持つ空間ラベルのみが空間スキーマ付き写真間で共有されるが、本論文では、空間ラベルは利用者が特定の写真上で対象の位置を指定してテキスト入力することで作成されることを想定しており、そのままでは空間ラベルは地理座標を持たないため、他の写真と共有することはできない。地図インタフェースも用意し、空間ラベル作成時に利用者が地図上の位置を指定することで、地理座標を明示するという実装も行っているが、すべての空間ラベルに対して地理座標を手入力するのは負荷が高い。

そこで本章では、図 9 に示すように、複数の異なる空間スキーマ付き写真に対する空間ラベルが同一対象を指し示す場合に、その地理座標を算出する。4.1 節で同一対象を指し示す 2 つの空間ラベルを用いる手法を説明し、4.2 節では、同じく 3 つ以上の空間ラベルを用いる手法を説明する。なお、本章では空間スキーマ付き写真と空間ラベルの要素である地理座標を高さ Z 座標を持つ 3 次元座標として議論するが、 Z 座標を持たない 2 次元座標を用いた場合、算出する空間ラベルの地理座標も 2 次元座標となる。

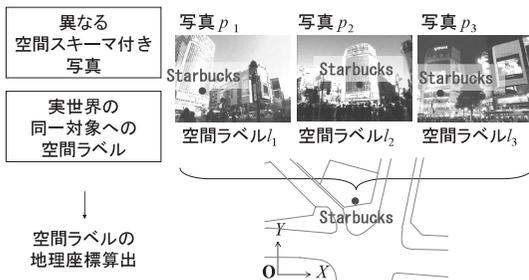


図 9 同一対象を指し示す複数の空間ラベルを用いた地理座標算出
Fig. 9 Label geocoding using multiple labels pointing the same object.

4.1 同一対象を指し示す 2 つの空間ラベルを用いたラベルの地理座標算出

3 章の図 6 は、ある点の写真座標 $q = (x, y)$ と地理座標 $Q = (X, Y, Z)$ の関係を示すが、写真座標が既知で地理座標が未知の場合でも、写真の視点からその点の地理座標への方向ベクトルが定まることが分かる。つまり、空間スキーマ付き写真上に配置された空間ラベルに関しては、写真の視点からラベル対象の地理座標への方向ベクトルが定まる。そこで、2 つの空間スキーマ上の空間ラベルが同一対象を指し示す場合、それぞれの写真の視点からラベル対象への方向ベクトルどうしの交点として、ラベル対象の地理座標を算出する。以降で具体的に記述する。以下の値を用いる。これらの空間的な関係は図 10 のとおりである。

$$l_1 = (text_1, M_1, m_1) : \text{空間ラベル}$$

$$l_2 = (text_2, M_2, m_2) : \text{空間ラベル}$$

$$p_1 = (image_1, fov_1, L_1), l_1 \in L_1 : \text{空間スキーマ付き写真}$$

$$p_2 = (image_2, fov_2, L_2), l_2 \in L_2 : \text{空間スキーマ付き写真}$$

l_1 と l_2 は異なる空間スキーマ付き写真 p_1, p_2 に対する空間ラベルであり、ともに写真座標が既知、地理座標は未知である。目的は地理座標 $M_1 (= M_2)$ を算出することである。ラベルテキストが同一の場合にラベルは実世界の同一対象を指し示すと判定する。ラベル l_1 と l_2 が同一対象へのラベルである場合、以下が成り立つ。

$$text_1 = text_2 \tag{12}$$

続いて、関数 Direction を、空間スキーマ付き写真

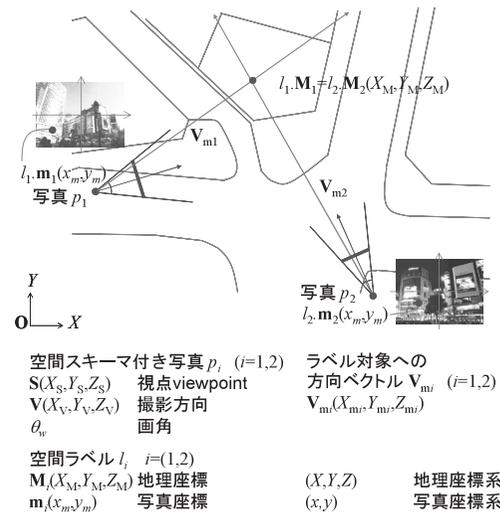


図 10 同一対象を指し示す 2 つの空間ラベルを用いた地理座標算出
Fig. 10 Label geocoding using two labels.

の空間スキーマ $fov = (S, V, \theta_w, \theta_h)$ と、写真上のある点の写真座標 $a(x, y)$ を引数とし、写真の視点 $S = (X_S, Y_S, Z_S)$ からその点への方向ベクトル V_a を返すものとする。関数 Direction の具体的な内容を以降に示す。3章で示した共線条件式 (8), (9) は以下のように変形できる。

$$X - X_S = (Z - Z_S) \frac{a_1x + a_2y - a_3c}{a_7x + a_8y - a_9c} \quad (13)$$

$$Y - Y_S = (Z - Z_S) \frac{a_4x + a_5y - a_6c}{a_7x + a_8y - a_9c} \quad (14)$$

ここで、関数 $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, $f_3(x, y)$ を以下のように定める。

$$\frac{a_1x + a_2y - a_3c}{a_7x + a_8y - a_9c} = f_1(x, y) \quad (15)$$

$$\frac{a_4x + a_5y - a_6c}{a_7x + a_8y - a_9c} = f_2(x, y) \quad (16)$$

$$Z - Z_S = f_3(x, y) \quad (17)$$

これらを用いて、式 (13), (14) は以下のように書ける。

$$X - X_S = f_1(x, y) f_3(x, y) \quad (18)$$

$$Y - Y_S = f_2(x, y) f_3(x, y) \quad (19)$$

式 (17), (18), (19) において、写真座標 $q = (x, y)$ に空間ラベルの写真座標 $m = (x_m, y_m)$ を代入すると、写真視点からラベル対象への方向ベクトル V_m は以下のように定まる。

$$V_m = \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x_m, y_m) f_3(x_m, y_m) \\ f_2(x_m, y_m) f_3(x_m, y_m) \\ f_3(x_m, y_m) \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$|V_i| = 1 \quad (21)$$

関数 Direction を用いると、写真 p_1, p_2 の視点からラベル l_1, l_2 の対象への方向ベクトル V_{m1}, V_{m2} は以下のように記述できる。

$$V_{m1} = \text{Direction}(p_1.fov, l_1.m_1) \quad (22)$$

$$V_{m2} = \text{Direction}(p_2.fov, l_2.m_2) \quad (23)$$

ラベル l_1, l_2 の地理座標 M_1, M_2 はそれぞれ写真 p_1, p_2 の視点 S_1, S_2 を始点とし、方向ベクトルが V_{m1}, V_{m2} である半直線上の点として表される。

$$M_1 = S_1 + k_1 V_{m1} \quad (24)$$

$$M_2 = S_2 + k_2 V_{m2} \quad (25)$$

k_1, k_2 は実数である。ラベル l_1, l_2 の地理座標 M_1, M_2 はこれらの半直線 (24), (25) の交点として算出される。

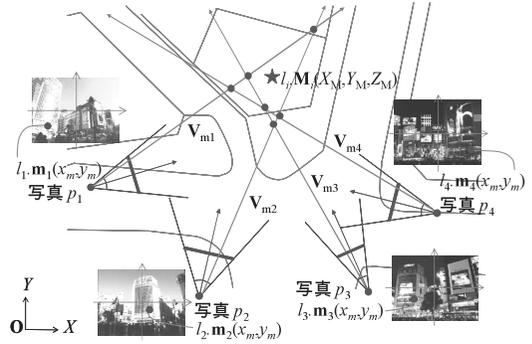


図 11 同一対象を指し示す 3 つ以上の空間ラベルを用いたラベルの地理座標算出

Fig. 11 Label geocoding using multiple labels.

$$M_1 = M_2 \quad (26)$$

すなわち、ラベルの地理座標 $M_1 (= M_2)$ は連立方程式 (24), (25), (26) により得られるが、3次元空間で2本の半直線が交差するのは非現実的であり、この連立方程式は成立しないため、代わりに以下を用いる。

$$M_1' = S_1 + k_1' V_{m1} \quad (27)$$

$$M_2' = S_2 + k_2' V_{m2} \quad (28)$$

$$M_1 = M_2 = \begin{pmatrix} M_1'.X \\ M_1'.Y \\ \frac{M_1'.Z + M_1'.Z}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_2'.X \\ M_2'.Y \\ \frac{M_1'.Z + M_1'.Z}{2} \end{pmatrix} \quad (29)$$

ここで M_1', M_2' はそれぞれ前述の半直線 (24), (25) 上の点であり、これらの x, y 座標はそれぞれ等しい。 $M_1 (= M_2)$ は M_1' と M_2' の中点として算出される。

4.2 同一対象を指し示す 3 つ以上の空間ラベルを用いたラベルの地理座標算出

図 11 に示すとおり、3 つ以上の空間スキーマ付き写真上に配置された同一対象への空間ラベルから、その地理座標を算出する。各写真の視点から対象方向への半直線は 1 点で交わらず、交点をラベルの地理座標とする前節の手法では、地理座標が 1 点に定まらない。そこで、すべての半直線の組合せに関して算出し、得られた複数の交点の重心としてラベルの地理座標を算出する。

以降で具体的に記述する． n 個の空間スキーマ付き写真 p_1, p_2, p_3, \dots 上にそれぞれ配置された n 個のラベルを l_1, l_2, l_3, \dots とする．これらのラベルテキストが同一の場合に同一対象へのラベルと見なすため，以下が成立する．

$$l_i.text = l_j.text \quad (1 \leq i, j \leq n, i \neq j) \quad (30)$$

続いて，ラベル l_i と l_j ($1 \leq i, j \leq n, i \neq j$) に関して，前節の手法で算出した地理座標を M_{ij} とする．

空間ラベル l_1, l_2, l_3, \dots の地理座標 $l.M (= l_1.M = l_2.M = \dots)$ は，このうち 2 つのラベルのすべての組合せに関して求めた交点の重心として，以下のように算出される．

$$l.M = \sum^{1 \leq i, j \leq n, i \neq j} \frac{M_{ij}}{n C_2} \quad (31)$$

5. プロトタイプシステム

図 12 がクライアントのグラフィカル利用者インターフェースである．

地図，写真のサムネイル，選択された写真，空間ラベルのリストという 4 つのインターフェースからなる．以下の機能を実現した．

- 空間スキーマ付き写真のメタデータ読み書き
視点，撮影方向および空間ラベルとコメント情報を画像ファイルのヘッダに EXIF format で記録する．またこれを読み込む．
- 地図上の視線ベクトルによる空間スキーマ付き写真の表示，選択および空間スキーマ入力
空間スキーマ付き写真を，その視点から撮影方向への矢印である視線ベクトルとして地図上に表示する．図 12 の地図上に配置された複数の矢印が視線ベクトルである．地図上に表示された視線ベクトルを選択することで対応する写真が選択され

る．この枠組みにより，同一地点を別の方向から撮影した写真，同一地点から別の方向を撮影した写真，特定の経路上の写真といった選択を容易に行うことができる．加えて，地図上に視線ベクトルを入力することで，写真の視点と撮影方向を手入力できる．

- 写真上，地図上で空間ラベル入力と表示
写真上または地図上で，対象の位置を指定してラベルテキストを入力することで，空間ラベルが作成される．写真上で入力された空間ラベルはその写真上での写真座標を持ち，地図上に入力されたラベルは地理座標を持つ．入力済みの空間ラベルは，写真上，地図上，またはその両方に表示される．
- ラベルテキストによる写真群の検索
検索するラベルテキストを入力することで，または，写真上，地図上，リスト内の空間ラベルを選択することで，同一のラベルテキストを持つ複数の写真が検索される．検索結果はサムネイルおよび地図上の視線ベクトルとして提示される．検索された写真上に配置されるラベルを選択していくことで，関連する写真を次々に閲覧することができる．
- 選択した写真に対する空間ラベル検索および写真上への配置
3.1 節の手法により，利用者が選択した写真に対する複数の空間ラベルを，ラベル共有システムの共有データベースより検索して提供する．また，3.2 節の手法により，検索されたラベルの写真座標を算出し，写真上に配置する．
- 空間ラベルの地理座標算出
利用者が共有を許可したラベルをラベル共有データベースに登録する．その際ラベル共有システムは 4 章の手法により登録された空間ラベルの地理座標を算出し，共有データベースに蓄積する．
- 選択した空間ラベルの写真群への伝播
利用者が選択した空間ラベルを，利用者が持つ写真のうち，そのラベルが適切であるものすべてに伝播させる．3 章の手法により，すべての写真に関して選択された空間ラベルの地理座標が画角内に含まれるかを判定することで処理する．図 13 は地図上の赤枠で囲んだ空間ラベルが，複数の写真に伝播した様子を示す．この空間ラベルが伝播した写真は，サムネイルリストに表示され，また地図上にオレンジの視線ベクトルとして図示されている．なお，この図の写真は伝播の様子を視覚



図 12 プロトタイプシステム “PhotoField”
Fig. 12 A prototype system “PhotoField”.

している．なお，この図の写真は伝播の様子を視覚

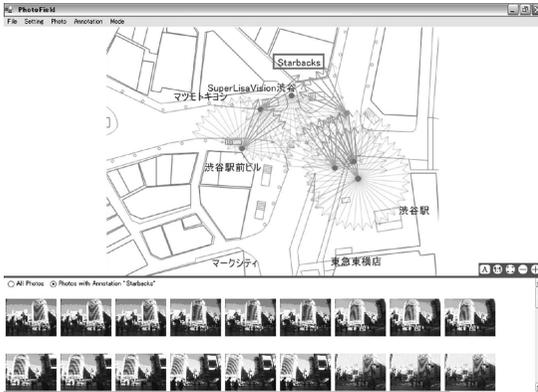


図 13 ラベルの伝播

Fig. 13 Spatial labels propagation over spatial photographs.

的に確認するために、首振りカメラにより機械的に撮影したものである。

6. 関連研究

本章では、本研究と関連する既存の研究やサービスの概要をまとめ、各分野における本論文の提案手法の意義を述べる。なお、表記統一のため、引用した論文が「注釈」という語を用いている場合も、本章では「ラベル」という語に置き換えてある。

空間関係を利用した写真のラベル共有の観点：

文献 9) は撮影位置（カメラ位置）の情報を持つ写真を対象とし、写真に対するラベルの共有とラベルを介した写真の検索を実現している。基本的には撮影位置の近い写真間でラベルを伝播させるが、以下の前処理により、伝播するラベルの順序付けすることが特徴である。

- (1) 撮影位置のクラスタリング
- (2) ラベルテキストのクラスタリング

(1) では、その場所から多くの写真が撮影されている領域をクラスタとして複数抽出し、各クラスタにおいてラベルの頻度を算出している。この処理により、同じ領域から撮影した写真群においても、異なる方向を向いて異なる対象を撮影し異なるラベルが与えられたものがあるといった問題に対処している。(2) では、各ラベルが与えられた写真が多く撮影されている領域をクラスタとして複数抽出している。この処理により、ある建物名のラベルは、建物の正面と、少し離れた建物全体をよく見ることができるところ、という複数の領域で用いられるといった傾向を利用している。クラスタリング (1), (2) はそれぞれ、

- 撮影位置（カメラ位置）に関するクラスタリング

- 撮影対象に関するクラスタリング

であり、視点になりやすい（眺めの良い）場所と、撮影対象になりやすいオブジェクトに偏りがあることを前提とした場合に有効である。これに対して提案手法は、写真の撮影位置に加えて撮影方向と画角を利用し、写真を平面ではなく空間として扱うことで、写真とラベルの空間的な関係を活用する点が特徴である。

3 次元情報復元の観点：

文献 10) はヘッドマウントディスプレイのリアルタイム映像上へのラベル配置を実現している。あらかじめ環境の複数地点でパノラマ画像群を撮影してラベルを配置しておくことで、リアルタイムの入力画像とパノラマ画像群との位置合わせに基づいて入力画像上にラベルを配置する。位置合わせは画像間の対応点情報を自動抽出し、これを利用して対象の 3 次元情報を復元することで行われる。一般に画像間対応点の自動抽出のためには、均質な照明条件や、あらかじめ空間的に密な映像データの整備等が必要となる¹¹⁾ が、本研究は利用者が写真上に入力したラベルから対応点情報を作成して対象の 3 次元座標を算出しており、撮影条件の不均質な写真画像群を対象とし、人と計算機の協調作業による 3 次元復元手法を検討する意義を持つ。協調作業による写真データの組織化の観点：

Flickr⁷⁾ はコメントと写真上に配置したラベルをキーとして、利用者間で公開した写真の共有を行うサービスである。メジャーな blog ツールのプラグインとしても開発されており、写真の共有をベースとしたものでは世界最大規模の Social Network Service である。本研究は写真に対するラベルをラベルが配置された写真の撮影位置や方向といった情報を含めて共有することで、より高度に組織化する点が特徴であるが、Flickr はすでに多くのコンテンツを持ち、また写真上の位置を指定してラベルを入力するという本研究と同じ枠組みを持つことから、flickr コンテンツに本研究の提案手法を活用する予定である。

POI データの作成と利用の観点：

近年、店舗や施設等の位置情報が POI (Point of Interest) データとして整備されており、カーナビゲーションやヒューマンナビゲーション、地図サービスにおけるコンテンツとして重視されている。POI データは、一般に店舗名等のテキストとその地理座標（東経、北緯等）を主要素とする。たとえば、地理座標を介してラベルとして地図上に重ねて表示したり、テキストや音声によるナビゲーションにおいて道案内文章を自動生成する際の語要素にしたりするといった利用がなされている。地図データをはじめとする空間データお

および空間コンテンツの記述・通信・交換に関するプロトコルを Web 上での流通を目的として定めた JIS 規格である G-XML では、POI データに店舗の電話番号や営業時間等さまざまな要素が追加されることを想定して、POI データ作成者が要素を任意に定義でき、さらにその交換可能性も保証するための辞書付き POI の概念も導入されており、POI データ共有の枠組みが整いつつある。本論文の提案手法は、地理座標を算出することで、写真に対するラベルを POI データ化しているといえる。逆に、既存の POI データを写真に対するラベルとして利用可能である。

Web 上の大規模画像検索サービスの観点：

Google Image 検索⁵⁾ は Web 上の画像を検索するサービスであり、2005 年 5 月時点で約 12 億の画像の検索が可能である。テキストでなされる問合せに対して Web 上の画像ファイルのサムネイルや URL の一覧を検索結果として返す。Google Image 検索では次の情報を用いてテキストによる索引を作成している。

- html 文書中の `` タグの `alt` 属性 (代替テキスト) や `title` 属性 (画像タイトル)
- html 文書中で画像近くにあり、さらにその画像と関連付けられていると推定されるテキスト

Google Image 検索の索引は写真に対応するラベルテキストを Web から自動抽出する技術として位置付けられ、Google Image 検索において写真に関連付けられるテキストは、提案手法でラベルデータとして利用できる可能性がある。

7. 考 察

本章では、本論文の提案手法をまとめたうえで、これが有効に機能するための条件をあげ、今後の課題を示し、なかでも提案手法にとって重要である空間的な誤差の問題に関する考察を行う。本論文の提案手法の中心となるのは以下の 2 点である。

- (1) 空間スキーマ付き写真による地理座標を持つラベルの取得 (3 章)
- (2) 空間スキーマ付き写真上の写真座標を持つラベルの地理座標算出 (4 章)

それぞれが利用する入力情報は以下のとおりである。

- (1) 写真の撮影位置、撮影方向、画角、ラベルの地理座標
- (2) 写真の撮影位置、撮影方向、画角、ラベルの写真座標、ラベルのテキスト

したがって本論文の提案が有効に機能するための条件は次のとおりである。

- (a) 空間スキーマ付き写真の撮影位置、撮影方向、画

角の値が十分な精度を持つ。

- (b) ラベルの地理座標が十分な精度を持つ。
- (c) ラベルの写真座標が十分な精度を持つ。
- (d) ラベルテキストによりラベルデータが指し示す対象の同定が可能である。

提案 (1) では条件 (a), (b) が必要であり、提案 (2) では (a), (c), (d) が必要である。(a) に関して、同一対象を指し示す複数の空間ラベルを利用したその地理座標の算出手法に関して、以下の問題が予想される。

- 視点から対象へのベクトルが平行に近づくとき、算出される対象の地理座標の精度が大幅に減少する。
- 視点からの対象までの距離が遠いと、算出される対象の地理座標の精度が大幅に減少する。

そこで本章では、提案手法 (2) 空間ラベルの地理座標算出手法に関して、写真の撮影位置、撮影方向の精度と、算出される地理座標の位置精度の関係に関する考察を誤差伝播の考察として後半にまとめる。(b) に関して、地理座標を持つラベルとしての既存の地図データを用いる場合、その地理座標の精度は地図データの精度に依存する。一方、ラベルの地理座標として提案手法 (2) により写真座標を利用して算出した値を用いる場合、その精度は写真の撮影位置、撮影方向、画角、およびラベルの写真座標の精度に依存する。(c) に関して、ラベルの写真座標は利用者により入力されることを前提としている。そこでその精度の扱いは今後の課題であり、方針を 8 章にまとめた。(d) に関して、ラベルデータの同定おける問題点は以下のとおりである。

- 同一対象を指し示すラベルであっても、ラベルテキストにはゆれがあり、同一対象と判定されない場合がある。
- 異なる対象を指し示すラベルであっても、同一ラベルテキストが与えられる可能性があり、同一対象と判定される場合がある。

この点は今後の課題であり、方針を 8 章にまとめた。誤差伝播の考察

空間ラベルの地理座標算出手法に関して、写真の撮影位置、撮影方向の精度と、算出される地理座標の位置精度の関係を考察する。

図 14 に示すように、2 枚の写真の視点座標をそれぞれ (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , ラベルへの角度それぞれを θ_1 , θ_2 とし、算出される対象の位置を (X_M, Y_M) とする。また 2 視点間の距離を b とする。 $X_M, Y_M, X_1, Y_1, X_2, Y_2, \theta_1, \theta_2, b$ それぞれの誤差を、 $\sigma_{X_M}, \sigma_{Y_M}, \sigma_{X_1}, \sigma_{Y_1}, \sigma_{X_2}, \sigma_{Y_2}, \sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}, \sigma_b$ とするとき、以下のように問題ない。

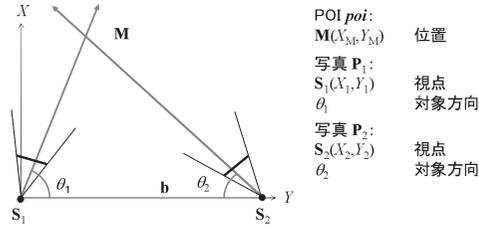


図 14 対象の地理座標への誤差伝播

Fig. 14 Error propagation for geographic coordinates.

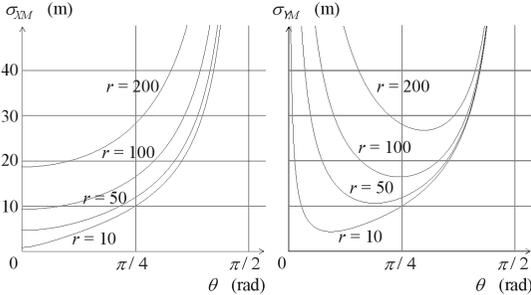


図 15 対象の地理座標への誤差 (視点位置誤差 10 m)

Fig. 15 Accuracy of geographic coordinates (10 m position accuracy of viewpoint).

$$\sigma_{X1} = \sigma_{Y1} = \sigma_{X2} = \sigma_{Y2} = \sigma_X \quad (32)$$

$$\sigma_{\theta1} = \sigma_{\theta2} = \sigma_\theta \quad (33)$$

さらに簡略化のため,

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad (34)$$

とする。この条件により、視点 (X_1, Y_1) から対象の位置 (X_M, Y_M) までの距離を r とすると、

$$b = 2r \cos \theta \quad (35)$$

である。以上を付録の式 (46), (47) に代入し、 X_M, Y_M の精度 $\sigma_{XM}^2, \sigma_{YM}^2$ は次のように求まる。

$$\sigma_{XM}^2 = \frac{r^2 \sigma_\theta^2 + 2(\sin^2 \theta) \sigma_X^2}{2 \cos^2 \theta} \quad (36)$$

$$\sigma_{YM}^2 = \frac{r^2 \sigma_\theta^2 + 2(\sin^2 \theta \tan^2 \theta) \sigma_X^2}{2 \sin^2 \theta} \quad (37)$$

以降ではこの式を用いて考察を行う。図 15, 図 16, 図 17 のグラフは、式 (36), (37) を用い、それぞれ以下の (条件 1), (条件 2), (条件 3) のもとで、 θ と算出される対象の地理座標の誤差 σ_{XM}, σ_{YM} の関係を示したものである。対象までの距離 $r = 10 \text{ m}, 50 \text{ m}, 100 \text{ m}, 200 \text{ m}$ のときのグラフを描画している。

(条件 1) $\sigma_X = 10 \text{ m}, \sigma_\theta = 1^\circ$

(条件 2) $\sigma_X = 1 \text{ m}, \sigma_\theta = 1^\circ$

(条件 3) $\sigma_X = 0.01 \text{ m}, \sigma_\theta = 1^\circ$

(条件 1) は現時点で携帯電話等に搭載されている GPS で現実的な値である。他方、(条件 3) は、リアルタイム測位の商用サービスとして提供されている中

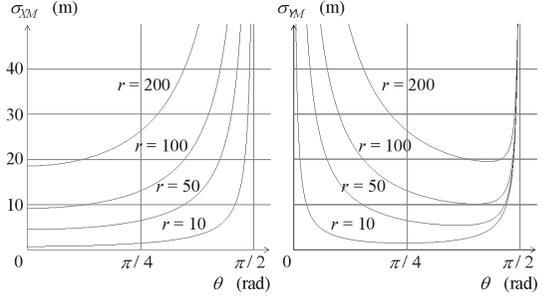


図 16 対象の地理座標への誤差 (視点位置誤差 1 m)

Fig. 16 Accuracy of geographic coordinates (1 m position accuracy of viewpoint).

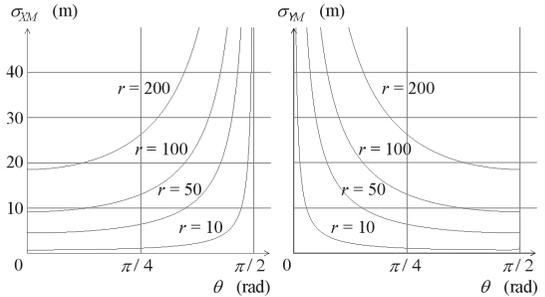


図 17 対象の地理座標への誤差 (視点位置誤差 0.01 m)

Fig. 17 Accuracy of geographic coordinates (0.01 m position accuracy of viewpoint).

で、現時点で最も高精度な値である。

これらのグラフは算出される対象の位置の誤差 σ_{XM}, σ_{YM} に関して以下を示している。

- θ が 0 または $\pi/2$ に近づくとき、つまり 2 視点から対象までの 2 つのベクトルが平行に近づくとき、 σ_{XM}, σ_{YM} が著しく高まる
- σ_X が小さくなると述べた θ の影響による誤差の増加の割合が抑えられる
- (条件 2) と (条件 3) の結果に大きな差がみられない。

提案手法は実世界において空間的には領域である対象に対して、点で位置を決定しているため、点が対象の領域から大きくはみ出なければ、ラベル配置の際に利用者に対して視覚的な違和感を与えないと考えられる。つまり、算出される地理座標が対象の領域内にあれば、提案手法は地理座標の算出に関して実用性があると判断できる。しかし、対象の大きさはさまざまであるため、実用性を一概に決定することはできない。

たとえば、条件 (2) において、2 視点から対象への方向ベクトルどうしが平行にならないとき、ここでは図 14 の θ を $1/8\pi < \theta < 3/8\pi$ 程度のとき、対象の大きさ (幅) を 20 m (中規模のビル程度) として、誤差を 20 m におさえるためには、対象までの距離 r が

100m 以内である必要があることが分かる．また、同じ条件で、幅 5m 程度の看板の位置を算出するには、対象までの距離 r が 25m 以内である必要があることが分かる．

対象の地理座標の精度は写真の撮影位置や撮影方向の精度に加え、写真と対象の位置関係にも大きく影響を受けるため、算出される POI 位置の誤差に応じて、ラベルデータとして提供する際の順位付けを行ったり、誤差が大きい場合には共有データベースへの登録を行わなかったりするといった手法の開発は今後の課題である．

8. 結論と今後の課題

本論文では、今後、撮影位置や撮影方向等の情報を持つ写真が流通することを想定し、これを空間スキーマ付き写真と名付け、空間スキーマ付き写真に対するラベルデータを、ラベル対象の地理座標を介して共有する手法を検討し、プロトタイプシステムとして実装した．提案手法は次のような特徴および利点を持つ．

- ラベルデータの地理座標を与えることで、特定の写真から独立した空間データとし、その再利用性を高める．たとえば、地図データとして他の地図アプリケーションで利用できる．
- 地図データ等として整備されている既存のラベルデータを空間スキーマ付き写真のラベルデータとして利用できる．
- 複数の空間スキーマ付き写真上で同一のラベルが入力されると、対象の実世界での位置が定まる．すなわち、多くの写真上で入力されたラベルが地理座標を介して共有される．
- 空間スキーマ付き写真に対して、その写真に写っているラベルデータが伝播する．
- 伝播した複数のテキストラベルが写真上の適切な位置に配置される．ラベルデータが関連 URL を持っている場合、写真がクリック可能なものとなる．

提案手法は次のような欠点を今後の課題として持つ．

- (a) ラベルテキストの一致をもって同一対象へのラベルであると判定しているが、ラベルであっても表記ゆれがある．また、実世界の異なる対象に同一のラベルが与えられる場合もある．
- (b) 空間スキーマ付き写真の位置、方向、画角や、ラベルの地理座標、写真座標といった空間的なパラメータがそれぞれ誤差を持つ．また、ラベルの写真座標等が利用者により入力されることを前提としているため、その信頼度の決定が困難である．

- (c) 1 枚の空間スキーマ付き写真が切り取る空間 (FOV) はその撮影方向に無限に広がっているため、3 章の手法で FOV に含まれるすべてのラベルデータをその写真に伝播させると、遠すぎて写真に写っていない対象へのラベルが取得される．

(a) に関して、空間的な近さとテキストの類似度の両者を活用して、同一対象へのラベルを判定する手法を検討する予定である．表記ゆれは本研究に限らず、テキスト検索一般の問題であり、シソーラスの構築が現時点での主要な解決手段である．提案手法で扱う空間ラベルのように、対象を実空間に直接的に関わるものに限定した場合、ラベルが地理的な位置を持つことから、空間的な関係を利用してラベルデータを構造化しシソーラスを構築する手法が考えられる．加えて、既存の地図データを地理辞書として活用できる可能性がある．利用者のラベル入力とその共有という協調作業によりシソーラスが構築されていく環境が目標である．続いて (b) に関して、空間スキーマ付き写真の位置、方向、画角や、ラベルの地理座標、写真座標といった空間的なパラメータに関して、それぞれの精度を保持し、精度に基づいた処理を行う手法を検討する．たとえば EXIF Format の撮影位置に関して、測位の際に利用した GPS 衛星の数と方向に基づく「測位の信頼性」という項目があり、利用可能である．関連して、十分な位置精度を持つデータとして標準写真群と標準ラベル群を提供し、最も信頼度の高い情報として利用することを検討している．たとえば、教師情報として手入力のデータの補正や評価に利用する．標準写真群は位置や方向に関して補正済みの写真群であり、対象領域を空間的に効率良くカバーするよう整備する．標準ラベル群はたとえば地図データとして整備されているような建物名やランドマーク名等の一般的なラベルであり、地理座標および標準写真上で写真座標に関して補正済みの値を持つ．最後に (c) に関して、視線の長さに関値を決定することで空間スキーマ付き写真が切り取る画角内の空間 (FOV) を有限にし、この FOV 内のラベルデータを伝播させるという手法が考えられる．コンピュータグラフィクスにおけるクリッピング処理にあたる．視線の長さを決定することは、写真に写る空間の奥行きを定めることにあたり、すべての写真に対して一定の閾値を定めることは不自然である．たとえば、丸ビルからすぐ隣の東京駅を写した写真と、同じく丸ビルから富士山を写した写真では、写真に写る空間の奥行きはまったく異なるためである．そこで、視線と地図データとの交点や、EXIF 情報の対象距離や対象距離範囲等を用いて写真ごとに視線の

長さの閾値を決定する手法を検討する予定である。また、写真ごとにその写真に写る空間の範囲を決定する手法とは、逆に、ラベルごとにその対象が見える領域（ラベルの有効領域）を決定できる可能性もある。この場合は、ラベルの有効領域と FOV が重なる写真に対してラベルを伝播させる。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「IT の深化の基盤を拓く情報学研究」A02 班「コンテンツの生産・活用に関する研究」において「分散位置情報サービスと空間コンテンツ融合に関する研究」（公募研究：平成 13–17 年度）として支援を受けました。国際航業株式会社フェローの太田守重様には、地理座標算出における誤差伝播の考察に関して有益な助言をいただき、感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Arikawa, M., Sagara, T. and Okamura, K.: Spatial Media Fusion Project, *Proc. 2000 Kyoto International Conference on Digital Library, Research and Practice*, IEEE Computer Society Practice, Kyoto, pp.304–311, IEEE Computer Society Press (2000).
- 2) Digital Still Camera Image File Format Standard (Exchangeable image file format for Digital Still Cameras: EXIF), JEIDA (Japan Electronic Industry Development Association) (1988).
- 3) 藤田秀之, 有川正俊, 岡村耕二: 高精度な空間情報付き写真の 3 次元実空間マッピング, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-A, No.1, pp.120–131 (2004).
- 4) Fujita, H. and Arikawa, M.: A Ubiquitous Photo Mapping Considering Users' Lines of Sight, *International Workshop on Ubiquitous Data Management (UDM2005)*, In conjunction with IEEE ICDE 2005, IEEE Computer Society Press (Apr. 2005).
- 5) Google Image Search (2001). <http://images.google.com>
- 6) PhotoShop Album (2003). <http://www.adobe.co.jp/products/photoshopalbum/overview/>
- 7) Flickr (2004). <http://www.flickr.com/>
- 8) 村井俊治: 空間情報工学, p.175, 日本測量協会 (2001).
- 9) Naaman, M., Paepcke, A. and Garcia-Molina, H.: From Where To What: Metadata Sharing for Digital Photographs with Geographic Coordinates, *10th International Conference on Cooperative Information Systems (COOPIS)* (2003).
- 10) 興相正克, 蔵田武志, 坂上勝彦, 村岡洋一: パノラマベースドアノテーション—全方位画像を用いたコンテンツの簡便化とジャイロセンサーを用いた注釈提示の安定化, 第 6 回画像センシングシンポジウム (*SSII2000*), pp.381–386 (2000).
- 11) 徐 剛: 写真から作る 3 次元 CG, p.2, 近代科学社 (2001).
- 12) G-XML と POI と辞書, G-XML 講演会予稿集, データベース振興センター (2004).
- 13) 中村英夫, 清水英範: 測量学, p.55, 技報堂出版 (1999).

付 録

前方交会法における誤差伝播の式を拡張して, 提案手法における誤差伝播の式を算出する. 図 14 において, $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \theta_1, \theta_2$ を測定し, (X_M, Y_M) を算出する際の精度を算出する. b は $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ 間の距離である. $X_M, Y_M, X_1, Y_1, X_2, Y_2, \theta_1, \theta_2, b$ それぞれの誤差を, $\sigma_{X_M}, \sigma_{Y_M}, \sigma_{X_1}, \sigma_{Y_1}, \sigma_{X_2}, \sigma_{Y_2}, \sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}, \sigma_b$ とする. 図 13 において次式が成立する.

$$X_M = Y_M \tan \theta_1 \quad (38)$$

$$X_M = (b - Y_M) \tan \theta_2 \quad (39)$$

これより, 以下が成立する.

$$X_M = \frac{b \tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (40)$$

$$Y_M = \frac{b \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (41)$$

まず b が既知である前方交会法の場合, X_M, Y_M の精度は次のように表される¹³⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_{X_M}^2 &= \left(\frac{\partial X_M}{\partial \theta_1} \right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial X_M}{\partial \theta_2} \right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 \\ &= \frac{b^2}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)^4} \left\{ \left(\frac{\tan \theta_2}{\cos \theta_1} \right)^4 \sigma_{\theta_1}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\tan \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^4 \sigma_{\theta_2}^2 \right\} \quad (42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Y_M}^2 &= \left(\frac{\partial Y_M}{\partial \theta_1} \right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial Y_M}{\partial \theta_2} \right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 \\ &= \frac{b^2}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)^4} \left\{ \left(\frac{\tan \theta_2}{\cos^2 \theta_1} \right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\tan \theta_1}{\cos^2 \theta_2} \right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 \right\} \quad (43) \end{aligned}$$

提案手法においては b が既知ではなく,

$$b = \sqrt{(X_1^2 - X_2^2) + (Y_1^2 - Y_2^2)} \quad (44)$$

として誤差を含んで測定される. そのため, X_M, Y_M の精度の算出にあたり, 式 (37) に b の精度を加味す

る必要がある． b の精度は次のとおりである．

$$\begin{aligned}\sigma_b^2 &= \left(\frac{\partial b}{\partial X_1}\right)^2 \sigma_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial X_2}\right)^2 \sigma_{X_2}^2 \\ &\quad + \left(\frac{\partial b}{\partial Y_1}\right)^2 \sigma_{Y_1}^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial Y_2}\right)^2 \sigma_{Y_2}^2 \\ &= \frac{(X_1 - X_2)^2 (\sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2) + (Y_1 - Y_2)^2 (\sigma_{Y_1}^2 + \sigma_{Y_2}^2)}{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}\end{aligned}\quad (45)$$

以上より X_M , Y_M の精度は、次のように求まる．

$$\begin{aligned}\sigma_{X_M}^2 &= \left(\frac{\partial X_M}{\partial \theta_1}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial X_M}{\partial \theta_2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 + \left(\frac{\partial X_M}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 \\ &= \frac{b^2}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)^4} \left\{ \left(\frac{\tan \theta_2}{\cos \theta_1}\right)^4 \sigma_{\theta_1}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\tan \theta_1}{\cos \theta_2}\right)^4 \sigma_{\theta_2}^2 \right\} + \left(\frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}\right)^2 \\ &\quad \times \frac{(X_1 - X_2)^2 (\sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2) + (Y_1 - Y_2)^2 (\sigma_{Y_1}^2 + \sigma_{Y_2}^2)}{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}\end{aligned}\quad (46)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{Y_M}^2 &= \left(\frac{\partial Y_M}{\partial \theta_1}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial Y_M}{\partial \theta_2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 + \left(\frac{\partial Y_M}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 \\ &= \frac{b^2}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)^4} \left\{ \left(\frac{\tan \theta_2}{\cos^2 \theta_1}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\tan \theta_1}{\cos^2 \theta_2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 \right\} + \left(\frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}\right)^2 \\ &\quad \times \frac{(X_1 - X_2)^2 (\sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2) + (Y_1 - Y_2)^2 (\sigma_{Y_1}^2 + \sigma_{Y_2}^2)}{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}\end{aligned}\quad (47)$$

(平成 17 年 6 月 2 日受付)

(平成 17 年 11 月 1 日採録)



藤田 秀之

2001 年東京大学工学部建築学科卒業．2003 年同大学院新領域創成科学研究科環境学専攻社会文化環境コース修了．現在、東京大学空間情報科学研究センター博士課程 3 年、空間情報科学、ユーザインタフェースの研究に従事．



有川 正俊 (正会員)

1986 年九州大学情報工学科卒業．1988 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了．博士 (工学)．1989 年同大学工学部情報工学科助手．1993 年京都大学工学部情報工学科助手．1994 年広島市立大学情報科学部助教授，1999 年東京大学空間情報科学研究センター助教授，現在に至る．空間情報技術，データベース，ユーザインタフェースに興味を持つ．地理情報システム学会空間 IT 分科会代表．