

画像と地図情報を活用した町並みの復元に関する研究

吉岡 大貴

1. はじめに

1.1. 研究の背景

都市や文化の歴史を探る中で、過去の町並みを復元しようと試みられることは少なくない。しかし、過去の景観を復元するにあたって、参考とする資料として正確な情報は地図や平面図といった2次元の情報に限られ、3次元的な情報を収集できないことも多い。そのような条件下で、対象とする時代に作成された写真や絵葉書などの画像情報は、当時の様相を立体的に捉えるための重要な手がかりとなる。過去の町並みの復元にあたって、当時の町並みを形成する建築物や並木等の3次元情報を得るためには、これらの画像情報から必要な情報を推定する必要がある。

1.2. 既往研究と本研究の位置づけ

写真や絵画などの2次元情報から、投影物の3次元情報の取得を試みた研究は、都市計画から、図学や情報処理の分野まで多岐に渡っている。様々な手法を用いて、3次元情報を推定しようとする試みがなされてきたが、各手法ごとに一定の条件を満たす必要性があり、すべての写真に適用できるわけではない。

國井¹⁾や西原²⁾の研究が挙げられるが、前者ではカメラの回転が考慮されていないため、画像が正面撮影像である必要がある。後者は、画像から3つ消失点を得る必要がある。

本研究では、画像情報、実空間上の参考物、平面情報(地図・平面図)の3点をもとに、3次元情報を推定する手法について検討し、画像情報をもとにした3次元復元の新たな手法を提示することを目的とする。

2. 研究の方法

情報処理の分野では、写真からカメラの撮影位置を特定する方法が確立されている。

カメラで撮影するとき、カメラの位置や姿勢によって撮影される写真は変わる。また、カメラの位置姿勢が同じでも、カメラやレンズが異なると、得られる画像も変化する。逆に、写真に投影された像の特徴を分析することで、写真がどのようなカメラとレンズを用い、どのような位置・姿勢で撮影されたのかを推定することができる。このように、撮影画

像からカメラの位置姿勢や特性を推定することをカメラ・キャリブレーション(以下、CC)という。

本研究ではCCの内、幾何学的CCを扱う。これは、実空間上の既知の3次元座標と、それに対応する画像上の点を用いて推定を行うCCの手法の1つである。(以降、実空間と画像平面、それぞれの座標系を世界座標系、画像座標系という)CCによってカメラの位置姿勢や特性を推定し、画像と地図や平面図などの世界座標系に対応する2次元情報をもとに3次元情報を復元する。次章に、この根拠を示す。

3. 画像と地図を活用した町並みの復元手法

3.1. カメラパラメータ

CCを行うためには、カメラをモデル化し、画像の写り方に影響する主なパラメータを求める必要がある。本研究では、3次元空間(世界座標系)と二次元画像平面(画像座標系)との幾何学的対応関係を、最も基本的かつ単純なモデルで表すピンホールカメラモデルを扱う。

ピンホールカメラモデルは3次元座標の同次座標表現 $P_w = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ 、二次元座標の同次座標表現 $P_d = [u \ v \ 1]^T$ のもと、任意のスケール係数 λ 、カメラパラメータ P を用いて式1のように表すことができる。世界座標系の点はカメラパラメータによって画像座標系の点に変換される。

$$\lambda P_d = A [R \ | \ T] P_w \quad (1)$$

カメラパラメータは内部パラメータと外部パラメータによって構成され、これらのパラメータ行列の積で表される。

カメラパラメータによる実空間座標の画像座標への変換を図1に、各パラメータの持つ性質を表1に示す。まず、外部パラメータによって世界座標系 $X_w - Y_w - Z_w$ はカメラ座標系 $X_c - Y_c - Z_c$ に変換される。カメラ座標系のもとで表される点 M は内部パラメータによって画面座標系の点 m に投影される。カメラ座標系の原点 C はピンホールカメラのピンホールを意味し、 Z_c 軸はレンズの光軸方向を表している。 $U - V$ の二次元平面で表される画像平面は、 $X_c - Y_c$ 平面に平行であり、画像中心は $Z_c = f$ になる位置に置かれている。

表1 カメラパラメータ

内外	パラメータ	詳細
外部	回転	世界座標系におけるレンズの光軸方向
	平行移動	世界座標系におけるレンズの光軸方向
	焦点距離	レンズの中心から画像平面までの距離
内部	レンズ歪み係数	レンズの歪みを表すパラメータ
	画像主点距離	レンズの中心を通り、投影画像平面に垂直に交わる光線と投影画像平面との
	画素サイズ	縦および横方向の画素の大きさ

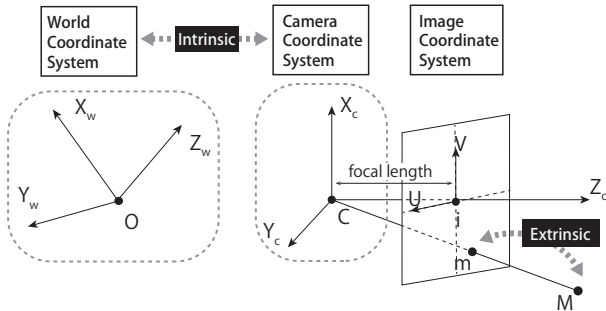


図1 カメラパラメータによる座標変換

3.2. カメラパラメータの推定

カメラパラメータは3行4列の行列で表される。(式2)カメラパラメータには定数倍の不定性があるため、自由度11、rank3である。画像平面上のU軸方向とV軸方向の双方で方程式が成り立つため(式3)、3次元座標とそれに対応する画像上の点が6組以上与えられると $6 \times 2 = 12 > 11$ となり、カメラパラメータの各要素を決定することができる。

$$A [R | T] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_i = \frac{p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + 1} \\ V_i = \frac{p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + 1} \end{cases} \quad (3)$$

3.3. 画像点の実空間での高さの推定

カメラパラメータと実空間上の既知の平面情報(地図・平面図)を用いて、画像上で指定した任意の点の、実空間上での高さを推定することで3次元情報の復元を行う。

画面座標上の任意の点 $[u_n, v_n]$ に対応する実空間座標 $[X_n, Y_n]$ が既知である時、任意の点の実空間上での高さ Z_n は、カメラパラメータの各要素を用いて以下の関係式で表すことができる。以上の幾何学的関係を模式的に示したものを図2に示す。

$$\begin{cases} z_1 = \frac{u(p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{34}) - (p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{14})}{p_{13} - up_{33}} \\ z_2 = \frac{u(p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{34}) - (p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{24})}{p_{23} - up_{33}} \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_i = \frac{z_1 + z_2}{2} \quad (5)$$

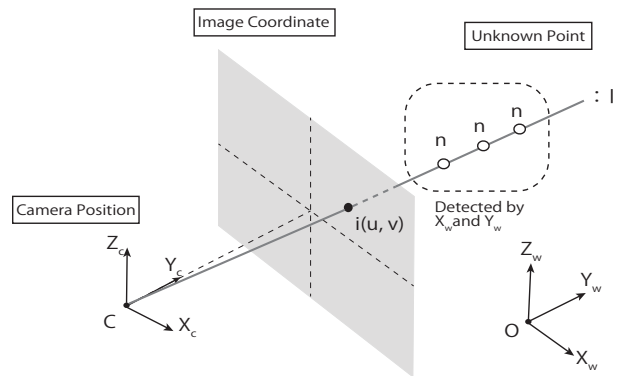


図2 実空間の高さ推定

3.4. 町並み復元の手順

本手法を適用して画像から3次元情報を復元するために必要な条件を以下にまとめる。

- ・画像内に3次元情報を抽出できるような構造物が写り込んでいる(例:現存する歴史的な建造物等)
- ・写真に写る実空間の平面情報を所持している(例:平面図、地図等)

以上の条件を有する場合において、写真や絵葉書などの画像情報と地図や平面図を活用して過去の町並みを復元する手順を説明する。

図3のような過去の景観写真が得られたとき、図中のA1、A2で示される構造物のみが現存していた場合を考える。まず、現存する構造物から3次元座標を取得し、それに対応する画像座標をもとにCCを行う。

画像上のb1~b5で示すような地図や平面図との対応が取れる点(建物の角等)を指定し、算出されたカメラパラメータを用いて、各点の実空間上での高さを推定する。得られた高さ情報を平面図や地図に付加し、立体化することができる。

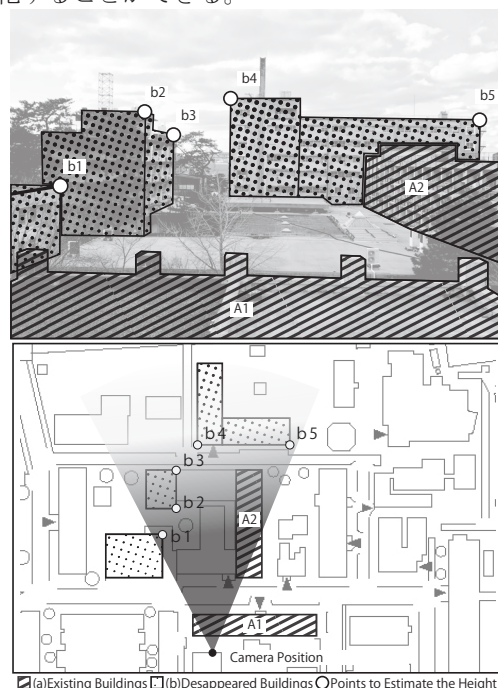


図3 町並み復元の事例

4. 手法の検証

4.1. 透視図による検証

写真上の任意の点の高さ推定は、CCによって求められるカメラパラメータの各要素を用いて算出するため、CCによって求められたカメラパラメータの精度が重要になる。

通常、カメラパラメータの精度向上や評価は複数枚の写真に対してCCを行い、バンドル調整法^{注1)}による最適化や、検出されたカメラ位置の相対的な位置関係による精度評価が一般的だが、当手法では、写真1枚に対してCCを行うため、これらの方法をとることはできない。対応点の選択方法を吟味することによって精度をあげる必要がある。

CCに用いられる対応点とカメラパラメータの関係を明らかにするため透視図を用いた。3点透視の図については図学的手法で3次元形態の復元が可能のため、1点透視と2点透視の透視図について検証する。

写真でCCを行う場合、レンズを介することによる投影の歪みや、画面上のポイント選択の際に誤差が生じてしまう。そのため、算出されるカメラパラメータと対応点との幾何学的関係を正しく考察できない。写真の歪みを補正し、CCの精度を向上させる方法については金本氏^{*3}によって明らかにされている。これらの誤差を排除し、カメラパラメータと対応点との純粋な幾何学的関係を明らかにするために透視図を用いる必要がある。検証に用いた透視図を図4、図5に示す。

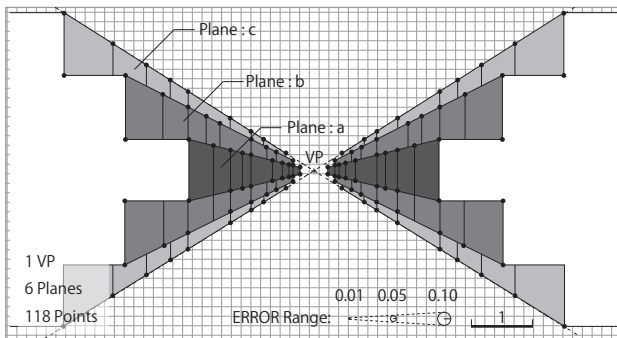


図4 検証に用いた1点透視図

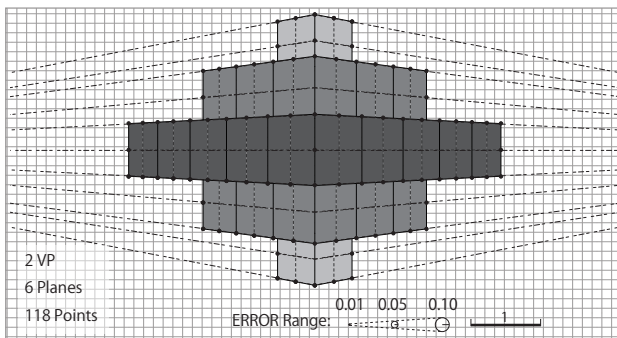


図5 検証に用いた2点透視図

対応点の選択方法については以下の点に着目した。

- 対応点の世界座標系での位置関係

- 画面座標系での位置関係

- CCに用いた対応点の数

対応点の位置関係を類型化するために、実空間上での視点場からの距離をもとに近景、中景、遠景に分け、選択する点が位置している面の数を参照面数とした。(例：対応点が面a上と面b上に存在した場合、参照面数は2)これらの条件と、対応点の数をもとに異なる選択方法を仮定し、カメラパラメータと高さの推定を行った。選択方法の一覧を表2、表3に示す。

表2 対応点の選択方法一覧 (1点透視)

Close	Middle	Distant	Close and Distant	Close and Middle	Middle and Distant
Selected points	Selected points	Selected points	Selected points	Selected points	Selected points
1 C1-L6	17 M1-L6	29 L1-L6	43 CL1-L12	53 CM1-L10	63 ML1-L10
2 C1-L10	18 M2-L6	30 L2-L6	44 CL2-L12	54 CM2-L11	64 ML2-L10
3 C2-L6	19 M2-L8	31 L2-L8	45 CL2-L34	55 CM2-L30	65 ML2-L20
4 C2-L8	20 M3-L16	32 L2-L12	46 CL3-L12	56 CM3-L15	66 ML3-L15
5 C2-L22	21 M3-L12	33 L3-L6	47 CL3-L52	57 CM3-L46	67 ML3-L30
6 C3-L6	22 M3-L18	34 L3-L12	48 CL2-A12	58 CM2-A10	68 ML2-A10
7 C3-L12	23 M2-A12	35 L3-L18	49 CL4-A12	59 CM4-A11	69 ML4-A10
8 C3-L36	24 M4-A12	36 L2-A12	50 CL4-A34	60 CM4-A30	70 ML4-A20
9 C2-A12	25 M4-A16	37 L4-A12	51 CL6-A12	61 CM6-A15	71 ML4-A15
10 C2-A20	26 M4-A24	38 L4-A16	52 CL6-A52	62 CM6-A46	72 ML4-A30
11 C4-A12	27 M6-A24	39 L4-A24			
12 C4-A16	28 M6-A36	40 L4-A12			
13 C4-A44		41 L6-A24			
14 C6-A12		42 L6-A36			
15 C6-A24					
16 C6-A72					

表3 対応点の選択方法一覧 (2点透視)

Close	Middle	Distant	Close and Distant	Close and Middle	Middle and Distant
Selected points	Selected points	Selected points	Selected points	Selected points	Selected points
1 C1-L6	9 M1-L6	17 L1-L10	30 CL1-L16	40 CM1-L10	48 ML1-L12
2 C1-L10	10 M2-L8	18 L2-L14	31 CL2-L20	41 CM2-L16	49 ML2-L18
3 C2-L6	11 M2-L12	19 L2-L16	32 CL2-L40	42 CM2-L32	50 ML2-L24
4 C2-L8	12 M3-L16	20 L3-L6	33 CL3-L12	43 CM3-L20	51 ML3-L22
5 C2-L24	13 M2-A12	21 L3-L20	34 CL3-L50	44 CM2-A20	52 ML3-L34
6 C2-A12	14 M4-A20	22 L3-L26	35 CL2-A32	45 CM3-A28	53 ML2-A24
7 C2-A32	15 M4-A24	23 L2-A20	36 CL3-A20	46 CM3-A32	54 ML4-A34
8 C4-A12	16 M6-A32	24 L4-A22	37 CL3-A34	47 CM5-A40	55 ML4-A46
		25 L4-A30	38 CL3-A32		56 ML6-A42
		26 L4-A34	39 CL3-A49		57 ML6-A55
		27 L6-A20			
		28 L6-A38			
		29 L6-A37			

- ① : Selection Range
 C : Close Only / M : Middle Only / L : Distant Only
 CM : Close and Middle / CL : Close and Distant
 ML : Middle and Distant
- ② : Number of Reference Planes and Distant
- ③ : Position on Screen
 L : Left Only / R : Right Only / A : Entire Screen
- ④ : Number of Corresponding Points

4.2. 対応点の幾何学的関係とカメラパラメータの精度

カメラパラメータの精度は、既知の実空間座標を算出されたカメラパラメータを用いて画面上に再投影することによって、他のカメラパラメータと相対的に評価することができる。再投影された点と実際の点との誤差の平均を再投影誤差という。算出された各カメラパラメータを用いた時の再投影誤差と推定された高さの誤差の関係を図6、図7に示す。

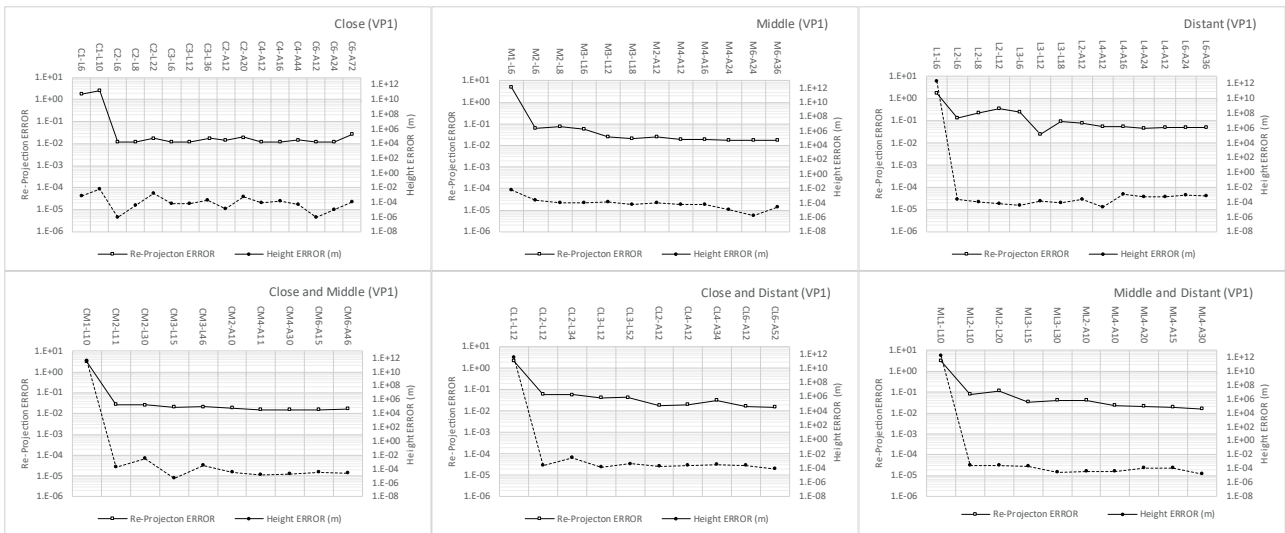


図6 再投影誤差と推定高さの誤差（1点透視）

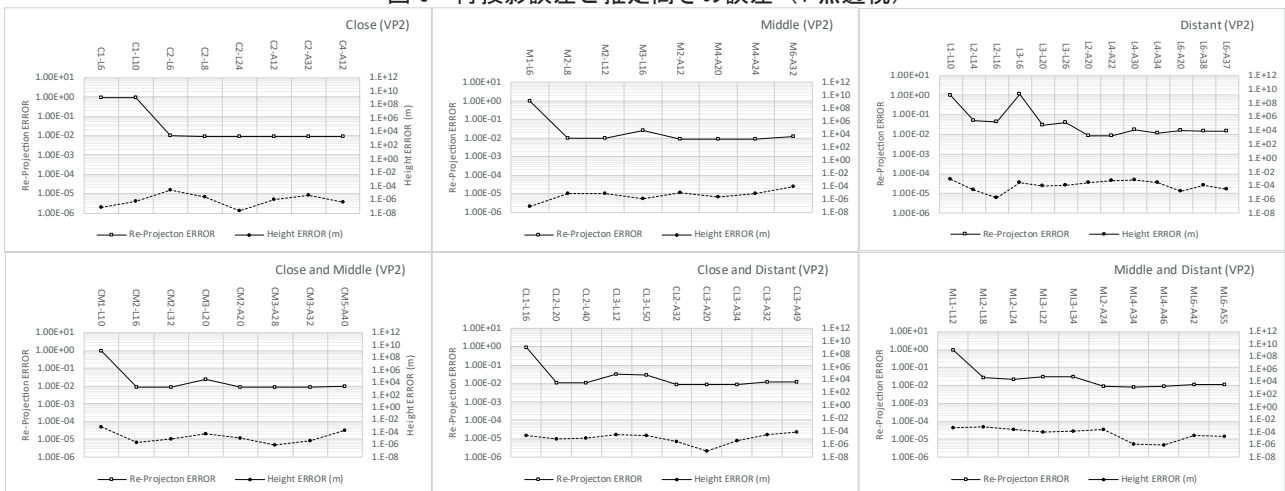


図7 再投影誤差と推定高さの誤差（2点透視）

図の縦軸第1軸の再投影誤差については、図4、図5に示す透視図のスケールバーで示す値に対応するものである。スケールバーの示す値は、実空間上でもっとも手前に存在する線分の長さに1:1対応している。

再投影誤差について、画像の構図に関わらず参照面数が1面のみの時は再投影誤差は1.0以上の値となり、カメラパラメータの精度は低いと言える。参照面数が2面以上の時、再投影誤差は0.01から0.05の範囲内におさまっている。今回検証に用いた画像では十分な精度を持っていると言える。また、対応点の実空間上での視点場からの距離、対応点の選択数、画面上での位置に関わらず、いずれも同様の結果を示しており、カメラパラメータの算出に、これらの条件は関係性がないことがわかる。

推定高さの誤差については、数式からも明らかであるが、再投影誤差とは概ね線形な関係性を持っている。画像の構図に関係なく、参照面数が2面以上であれば、誤差範囲は 1.0×10^{-8} mから0.01mに収まり充分有効な結果が得られた。

実際に写真を用いて本手法を適用する場合、対応点

選択の際に、画像点と実空間座標との間に誤対応が生じ、CC結果への影響は自明である。本研究で示した結果を踏まえると、写真への適用の際には、誤対応の生じづらい、近景の点をCCに用いることで、算出結果を理想値に近づけることができると言える。

5. 総括

本研究では、まず画像と地図や平面図などを用いた時の3次元情報復元の方法を示した。次に、透視図を用いた検証によって、本手法で有効な結果が得られることを示した。また、対応点の選択方法とカメラパラメータの幾何学的関係性を明らかにし、選択した対応点の実空間上で同一平面上に存在しないことが唯一の条件であることを示した。本研究では、透視図を用いて検証を行ったため、今後は写真を用いた実証や、作図不可能な条件下で本手法が有効か検証する必要がある。

注：

注1) 多視点画像を用いたCC結果の最適化の手法

<参考文献>

- 1) 國井洋一：「失われた建造物に対する1枚の古写真のみを用いた3次元情報の取得に関する研究－旧帝国劇場を事例として－」、東京農大農学集報、60(2)、85-92 (2015)
- 2) 西原一嘉：「一枚の写真からの建物の再現に関する研究」、図学研究、40、171-174 (2006)
- 3) 大穂正一郎、金本朋子：「カメラ・キャリブレーションを用いた都市風景画の視点場推定法の検証と改善」、日本建築学会研究報告九州支部、(2012)