

# 画像と地図情報を用いた3DCGによる都市空間の復元方法に関する研究

幾竹 新

## 1. はじめに

### 1.1. 研究の背景

かつて中国に存在した「南満州鉄道付属地」（以下、満鉄付属地）は我が国の都市計画上、最も早い時期に建設された近代的な都市の一つである<sup>1)</sup>。しかし、当時の付属地であった一帯は現在では開発の波にのまれ、当時の都市空間はかすかに面影を残すのみである。また、現存する重要建築物以外に当時の付属地の様相を語るものは、地図や古写真等の2次元情報ばかりで、当時の都市空間を3次元的に把握できる情報は非常に少ない。このような状況の都市において、地図や古写真等といった限られた2次元情報を手掛かりに3次元情報を復元することができれば、失われた都市空間を評価・分析するための有用なツールの一つになるのではないかと考える。

### 1.2. 既往研究と本研究の位置づけ

画像等の2次元情報から3次元情報への復元に関する研究は、都市計画から情報処理の分野まで多岐に渡る。特に、近年はコンピュータ技術の発達により高精度の復元が可能となっている<sup>2)</sup>。しかし、これらの精度の高い3次元復元に関する研究では、大量の画像を必要とし、現存する写真に限られる場合には適用できない。一方で、限られた条件下（1枚の写真のみの場合）での3次元復元を試みたものとしては、画像上の直線成分を抽出し、消失点を求めることで3次元モデルを作成した研究がある<sup>3)</sup>。しかし、これは対象が建築物単体であるのに加え、画像上から直線成分を抽出するこの手法は、低解像度で、ノイズが多く発生する古写真には不適である。

本研究の最も基盤となる研究として、画像情報、実空間上の参考物、地図を用い、カメラキャリブレーションの原理を基に、3次元情報の推定方法を検証したもの<sup>4)</sup>がある。この研究では、対応点（写真上の座標と実空間上の座標が対応する点）の選択方法により手法の精度を検証している。しかし、これは、透視図を用いた対応点とカメラパラメータの純粋な幾何学的関係の検証に留まっており、実際の写真を用いた検証は行っていない。そこで、この手法を古写真に適用したところ、透視図の場合と比べ、精度の低い結果が示された。本研究は、この研究を基に、新たな復元手法の提示を目指すものである。

### 1.3. 研究の目的

既往研究を踏まえて、本研究では、画像と地図情報、現存する建物の情報の3点を活用した失われた都市空間の3次元情報（高さ）を復元する手法について検討を行う。加えて、CG画像による検証と実際の古写真を用いた本手法の実証を行うことにより、画像と地図情報を用いた新たな3次元復元手法を提示することを目的とする。

## 2. 対象と方法

### 2.1. 研究対象

本手法の対象とする画像として、現存する建物が写り込んだ過去の街並みを想定する。図1-1と図1-2に示すような過去の都市空間を写した写真が存在する場合、その写真上に写り込んだ現存する建物Aの3次元情報とその画像、地図情報をもとに周辺の都市空間（建物B）の形態を復元する。また、本手法を用いる対象地として満鉄付属地の一つ、奉天の都市空間を選定した。

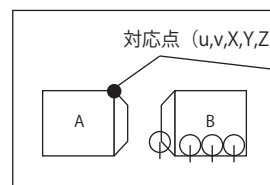


図 1-1 過去の写真

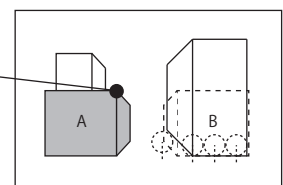


図 1-2 現在の街並み

### 2.2. 研究方法

画像処理の分野では、撮影画像からカメラの位置姿勢や特性を推定するものとしてカメラキャリブレーション（以下CC）という方法がある。このCCでは、画像上の点を実空間上の点と対応づける関係を表すカメラモデルが用いられる。このカメラモデルは、実空間上の3次元座標を画像上の2次元座標への変換を表すため、これにより、両者の対応関係を把握することが可能である。

本研究では、はじめにこのカメラモデルを応用し、画像と地図情報を用いた3次元復元を行うための理論を構築することにより、新たな手法を提示する。次に、理想的な条件下で手法の検証を行い、本手法の有効性を示す。ここでは、画像と実空間の対応が正確に把握できるCG画像を用いる。また、本手法の精度に関する評価を行うことで、高精度の復元を行うための条件を明らかにする。最後に、古写真を対象に本手法の実証を行う。

### 3. 3次元復元手法

#### 3.1. カメラモデルの応用

CCを行うにあたって、一般に使用されるカメラモデルは透視投影カメラモデル(式1)と言われる。本章では、このモデルを扱う。これは、任意のスケール係数  $s$  と実空間上(世界座標系)の点  $X_w(X_w, Y_w, Z_w)$  がカメラ座標系から画像座標系の変換を表す内部パラメータ  $A$  と世界座標系からカメラ座標系への変換を表す外部パラメータ  $[R|T]$  により点  $x(u, v)$  に変換されることを示す(図2)。

$$sx = A [ R | T ] X_w \quad (1)$$

また、式1の内部パラメータと外部パラメータをまとめると式2と式3のように表すことができ、成分  $p_{11}$  から  $p_{33n}$  の成分で表される行列を透視投影行列という。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x = PX_w \quad (3)$$

式1から式3より、世界座標系上の点  $X_w$  は、3行4列の透視投影行列  $P$  により画像座標系の点  $x$  に変換されることがわかる。つまり、透視投影行列  $P$  が持つ全てのパラメータを推定し、式3の逆問題を解くことで2次元情報から3次元情報を復元することができる。しかし、この行列  $P$  は3行4列の行列であり、逆行列が存在しない<sup>註1)</sup> ため、3次元情報の復元には誤差が生じてしまう。

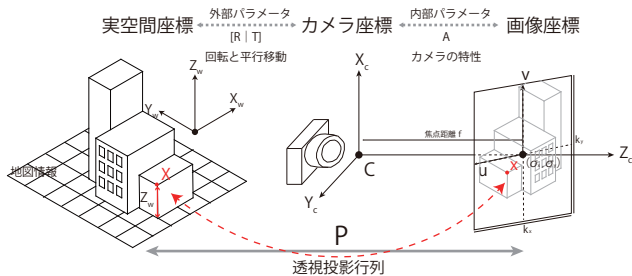


図2 カメラパラメータによる座標変換

#### 3.2. 画像上点の実空間における高さの推定

前述のカメラモデルを応用し、透視投影行列のパラメータと実空間上の既知の地図情報(平面)を利用して、画像上で選択した任意の点の実空間上での高さを推定する。この推定した高さをを用いて3次元復元を行う。

式2は式4と式5のように変形することができる。この式4には、未知の8つのパラメータが存在するが、両辺に係数が存在しないため、未知数のうちのひとつを任意の基準解として定め、残りのパラメータ7個を求める。式4から、7つのパラメータを算出するためには、7点の対応点  $(u, v, X_w, Y_w, Z_w)$  が必要であることがわかる。即ち、7点の対応点既知であれば式4と式5により、各パラメータを算出でき、実空間上の高さ  $Z_w$  を推定できる。

$$u(p_{21}X_w + p_{22}Y_w + p_{23}Z_w + p_{24}) = \quad (4)$$

$$v(p_{11}X_w + p_{12}Y_w + p_{13}Z_w + p_{14})$$

$$Z_w = \frac{v(p_{11}X_w + p_{12}Y_w + p_{14}) - u(p_{21}X_w + p_{22}Y_w + p_{24})}{up_{23} - vp_{13}} \quad (5)$$

#### 3.3. 復元手法の手順

本手法による画像と地図情報から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建物が写り込んでいる(例:現存する歴史的な建物)
- ・画像に写る実空間の平面情報を所持している。(例:地図、平面図)
- ・7つの対応点(写真上の座標と実空間上の座標が対応する点)が既知である。

以上の条件下において、写真や絵葉書などの画像情報、地図情報、現存する建物の情報の3点を活用して失われた都市空間を復元する手順を以下にて説明する。

図3のような過去を写した写真が得られ、図中のA1、A2で示される建物のみが現存していた場合を考える。まず、現存する建物と地図情報から実空間座標を7点取得し、それに対応する画像座標を選択し、これらをもとに式4を用いて8つのパラメータを算出する。次に、画像上の  $b1 \sim b5$  で示すような写真と実空間との対応が取れる点を指定し、算出されたパラメータを用いて、各点の実空間上の高さを推定する(式5)。推定した高さを平面図や地図に付加し、立体化することで3次元復元を行う。

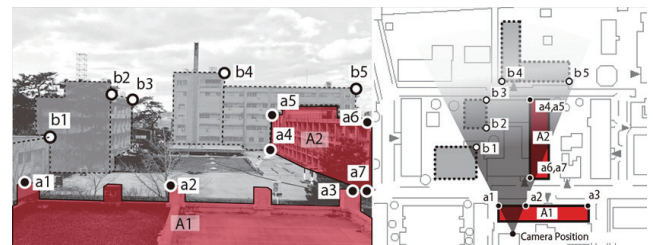


図3 復元手法に用いる画像と地図

### 4. 手法の検証

#### 4.1. CG画像による検証

本手法を実際に撮られた写真に適用する場合、レンズを介することによる投影像の歪みや、画像上の座標を選択する際に実空間上の座標との間に誤差が生じてしまう。そのため、算出されるパラメータと対応点との対応関係を正しく把握できず、手法の有効性を示すためには十分ではない。したがって、これらの誤差を排除した条件下で本手法の有効性を示すために、画像と実空間の対応関係が写真よりも正確であるCG画像を用いた検証を行う必要がある。本研究では、以上のような理想的な条件下で検証を行うことにより、本手法を用いた3次元(高さ)復元が可能であるかどうかを示すと同時に、精度の高い復元を行うための諸条件を明らかにする。

検証に用いる地図を図4のように作成し、地図上に存在する各建物から任意の対応点を指定し、これらの点を用いて本手法の検証を行う。検証には、平面図と図5の画像、実空間に見立てたCGモデルを利用した。尚、検証で用いる点の座標は、全て既知であるものとする。

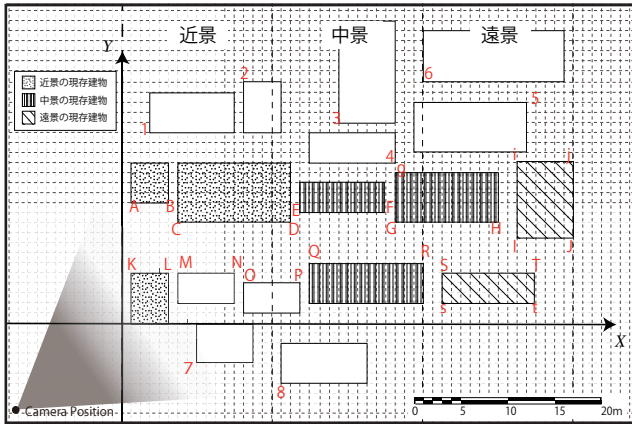


図4 検証に用いた地図

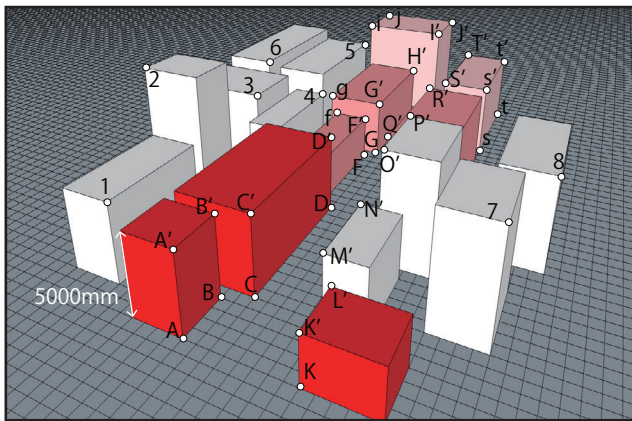


図5 検証に用いた画像

本検証では、はじめに復元手法の精度を評価するための指標として推定高さ誤差を算出する。これは、既知の高さと本手法を用いて算出した推定高さの差であり、この値が低いほど、精度が高いことを示す。また、この値により、選択した7つの対応点から算出したパラメータの精度も評価できる。高さの推定には対応点から得たパラメータを用いるため、その精度評価も重要である。また、推定高さ誤差を異なる条件下で算出することにより、精度の高い復元を行うための条件を検討する。復元を行う際の条件として、以下の2点に着目した。

i) 現存する建物の位置

本研究の対象である現存する建物が写り込んだ古写真には、様々な場所から撮られたものが想定される。そこで、本検証では、現存する建物の位置により推定される高さがどの程度異なるかについて検討する。現存する建物の実空間上における位置に着目し、その位置を視点場からの距離をもとに近景、中景、遠景の3つに分類した。この3つの各場合において、本手法に必要な7点をそれぞれ3セットずつ選択し、推定高さ誤差を算出する。

ii) 対応点の画像上における選択範囲

本手法で用いる透視投影行列のパラメータは7つ対応点の選択に依存しているため(式5)、対応点の選び方によって生じ得る誤差についても検証を行う。対応点の選択については、選択した点の画像上における範囲に着目した。選択範囲を表す指標として、画像上の選択点同士間の最長距離を算出し、この最長距離により推定高さ誤差がどの程度異なるかについて分析する。

また、本検証では、各条件下における推定高さ誤差が最も小さくなった時のパラメータを利用して、画像に写り込んだ全ての建物の高さを推定する。この結果をもとに、画像上の全建物の高さを推定した場合の推定高さ誤差が最も低小さくなる時の条件を明らかにする。以上の条件を踏まえて行った検証の結果を次節にて示す。

4.2. 手法の有効性

本手法に用いた7つの対応点に関して行った検証の結果を表1に示す。まず、i)の現存する建物の位置に着目し、結果を述べる。近景の建物が現存する場合は、推定高さ誤差が約0.11~0.25mmであり、算出したパラメータの精度は高いと言える。中景の場合は、推定高さ誤差が約0.34~298.36mmと近景の場合と比べ、ばらつきが大きい。遠景の場合は、約2.10~12.19mmに推定高さ誤差が収まっており、算出したパラメータの精度は中景の場合よりも高いと言える。また、各場合の最も精度が高いパラメータを算出した7点(例:近景-(1))を用いて全ての建物の高さを推定した。推定した高さの誤差を図6に示す。図6からパラメータを算出した7つの対応点に関する結果と対応するように、近景の場合が誤差が最も少なく、中景の場合の誤差が最も大きいことが示された。

表1 検証結果

	選択した点	選択点間最長距離(mm)	推定高さ誤差平均(mm)
近景	(1) A',B',D',D',K',K'	174.85	0.11
	(2) A,A',B,B',C,C',D	139.22	0.45
	(3) C,C',D,D',K,K',L'	174.85	0.25
中景	(1) F',F',G,G',H',Q',R'	72.35	0.34
	(2) F,f,G,G',g,Q',R'	72.83	142.86
	(3) F',G,G',g,Q',R',H'	72.65	298.36
遠景	(1) j',S',s',T',t',t'	122.10	2.10
	(2) l',j',j',S',s,s',T'	122.10	3.13
	(3) l',l',j',j',S',s',t	116.30	12.19

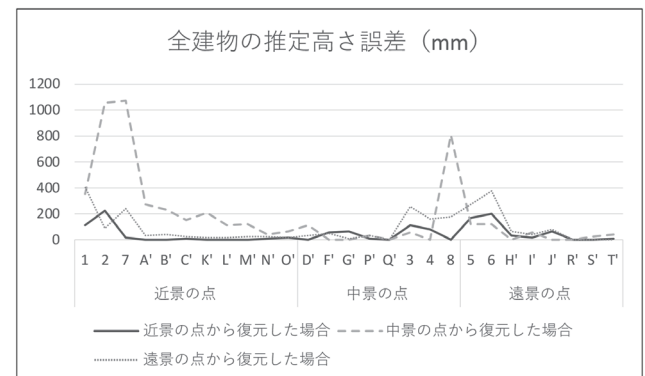


図6 全ての建物の推定高さ誤差

したがって、近景の建物が現存する写真を用いることで精度の高い復元が可能であることが伺えた。

次に、ii)の対応点の画像上における選択範囲に着目した結果を述べる。本検証では、選択範囲を表す指標として、選択点間最長距離を用いた。表1から、近景、遠景の各場合において、この値が大きいくほど推定高さ誤差は小さく、小さいほど推定高さ誤差は大きいことがわかる。中景の3つ場合においては、推定高さ誤差にばらつきが見られるものの、図6から選択点間最長距離の値が大きいくほど、全建物の推定高さ誤差の値が小さくなっていることがわかる。

以上の結果から、全ての建物に関する推定高さ誤差は、平均すると47.3mmから189.4mmに収まっていることがわかる(図6)。この誤差の範囲を許容できれば、都市空間を対象とした復元においては本手法は有効であると言える。また、精度の高い3次元復元を行うためには、近景の建物が現存している写真が望ましいが、それ以外の場合でも、点同士の距離が長くなるように対応点を選択すれば復元の精度を高められることがわかった。

## 5. 古写真を用いた手法の実証

本章では、奉天を写した古写真(図7)、現存する建物の情報<sup>註2)</sup>、古地図<sup>6)</sup>に対して本手法を適用することで、3次元(高さ)復元が可能であるかの実証を行う。

実証を行うにあたって前章の検証結果に基づき、近景に現存する建物から対応点を選択した。また、対応点間の距離が長くなる7点を選択し、実証を行った。実証に使用した対応点に関する実証結果を表2に示す。表2から選択した点の推定高さ誤差は小さいことがわかる。即ち、算出したパラメータを用いた復元は精度が高いと言える。この算出したパラメータを用いて古写真上の未知の5点に関して復元を行った。実証例を図8に示す。

表2 実証結果

点	既知の高さ	推定高さ	推定高さ誤差(mm)	復元する点	復元した高さ(mm)
2'	7386	7386.51	0.51	a	7211.78
3	0	-2.25	-2.25	b	7720.96
3'	7386	7386.78	0.78	c	7946.36
4'	9066	9065.15	-0.85	d	8162.04
5	0	-0.72	-0.72	e	8789.24
5'	9066	9066.63	0.63	f	-3555.26
6'	8930	8929.42	-0.58	-	-

表2の結果から、復元された点の高さは写真と比較すると概ね正しい値が算出されたと伺える。しかし、5点のうち1点は復元した高さが負の値とり、写真とは大きく異なっていた。この原因として、対応する写真上の点と実空間上の点を正確に選択できていないことが考えられる。特に、古写真の場合は、解像度が低く正確な建物の点を選択することが困難である。また、遠景になればなるほど、平面図と写真上の対応関係を把握することが難しく、復元する際に誤差が生じてしまう。



図7 奉天浪速通を写した古写真<sup>7)</sup>

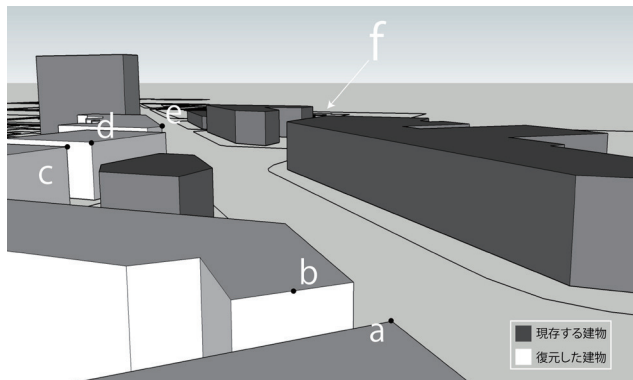


図8 本手法による実証例

## 6. 総括

本研究では、まず写真と地図、現存建物の情報を用いた時の新たな3次元情報復元の方法を提示した。次に、CG画像を用いた検証により、対応点を選択する際は、画像上で点同士の距離が最も長くなるような7点を選択することで、精度の高い復元が可能であることを明らかにした。最後に、奉天の付属地が写り込んだ古写真に本手法を適用し失われた都市空間の3次元復元を行った。この実証により、写真と実空間の対応関係が正確に把握できる場合において本手法は適用可能であることを示すことが出来た。つまり、現存する建物があり、実空間との対応関係が把握できる写真と地図が存在すれば、本手法を用いて失われた都市空間を復元できると言える。

### 【補注】

註1) 逆行列が存在しないとき、行列式を解くために疑似逆行列が用いられる。これを用いることで最も誤差が小さい解を求めることができる。

註2) 2018年9月22日から25日にかけての4日間中国瀋陽市(旧奉天)にて現存する建物の実測を行った。

### 〈参考文献〉

- 1) 越沢明: 植民地満洲の都市計画, アジア経済研究所, 1978年12月発行
- 2) Paul E. Dbevec: Modeling and Rendering Architecture from Photographs A hybrid geometry and image based, Technical Report UCB//CSD-96-893
- 3) 山中俊介, 加藤直樹, 藤澤克樹: 建築画像の消失点検出法の開発とそれに基づく3次元建築モデルの再構成手法, 日本建築学会計画系論文集, 2001年66巻542号p. 269-277
- 4) 吉岡大貴: 画像と地図情報を活用した街並みの復元に関する研究, 九州大学大学院人間修士論文梗概集, 平成30年度
- 5) ICCS国際中国学研究センター, 中国戦前絵葉書データベース: (<http://iccs.aichi-u.ac.jp/postcard/manzhou/sengtian/>), 最終閲覧日, 2019年1月30日
- 6) 南満洲鉄道株式会社地方部土木課: 土木十六年史付属図, 1926