

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に関する研究

大穂 正一郎

1. はじめに

景観法の制定以来、都市整備においては、それまで大きく取り上げられることのなかった景観の美しさも重要な要素の一つとされるようになった。景観の良し悪しは、個人の感覚に依るところが大きく、客観的に評価することは難しい。しかし、美しいと呼ばれる景観には、多数の人に共有される何らかの基準があるはずであり、より良い景観をつくり上げるために、様々な研究が行われてきた。

景観は、見る・見られるという両者の関係による視覚的環境である。景観整備においては、「見られる」側の視対象の整備で完結するのではなく、対象の見え方を左右する「視点場」も重要な要素の一つである。

美しい都市景観を投影したものの代表として、都市風景画や景観写真がある。多くの人から評価を得た風景画や写真は、その都市独自の優れた景観であり、それを描いた場所・撮影した場所は、重要な「視点場」と言える。

視点場に関する研究は、都市計画から、図学や情報処理の分野まで多岐にわたっている。様々な素材・手法を用いて、視点場を推定しようとする試みがなされてきたが、その方法は人の感覚や手作業に頼らざるをえなかった。本研究では、優れた景観を表現したものとして都市風景画を取り上げ、絵画の二次元情報と空間の三次元情報から、視点場を算出する手法を確立することを目的とする。

2. 研究の方法

従来の研究では、都市計画の分野で絵画から視点場を求める際には、透視図法による作図が用いられてきた。しかし、この方法では、煩雑な手作業が必要となる。さらに、全ての風景画が作図可能な構図で描かれているとは限らない。また、絵画が描かれた当時の正確な地図や平面図が必要となり、仮に入手できたとしても、その正確さには期待できない。

一方で、撮影画像からカメラの位置姿勢や特性を推定する方法、即ち投影の逆問題を解く方法として、カメラ・キャリブレーション (Camera Calibration; 以下 CC) がある。これを用いることで、より正確かつ容

易に都市風景画の視点場を求めることが可能になる。

CC は、本来は「カメラ」という装置そのものの性質を数値化するものである。この機能を用いることで、カメラによる投影画像 (= 写真) の撮影位置を求めることができる。しかし、写真も絵画も平面に投影された「画像」であるということに変わりはないため、この二つの像に根本的な違いはない。従って、CC によって写真以外の画像 (絵画・3DCG 画像等) の視点場を求めることも可能なはずである。

本研究では、CC による視点場推定手法の有効性を示す。さらに都市風景画を対象として、実際に CC を用いて視点場を求め、その位置から見た景観の 3DCG 画像と対象の絵画を比較・分析することで、この視点場推定手法の妥当性を検証する。

3. カメラ・キャリブレーションの有効性

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。ここでは、三次元空間 (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。

これに基づく CC において、カメラの位置姿勢や特性を表すパラメータを表 1 に示す。このように、カメラパラメータは外部パラメータと内部パラメータに分類できる。前者はカメラの三次元空間における位置姿勢を表し、後者は三次元空間を二次元画像平面へ投影するためのパラメータであり、レンズやカメラそのものの特性を表す。

世界座標系における点 $P_w (x_w, y_w, z_w)$ と、画像座標系における点 P_u の投影点 $P_d (u_d, v_d)$ との幾何学的関係を考える。

表 1 カメラパラメータ

内外	パラメータ	詳細
外部	回転	三次元空間におけるレンズの光軸方向
	平行移動	三次元空間におけるレンズの中心座標
	焦点距離	レンズ中心から投影画像平面までの距離
	レンズ歪み係数	レンズの歪みを表すパラメータ
内部	画像主点位置	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交点
	画素サイズ	縦および横方向の画素の大きさ

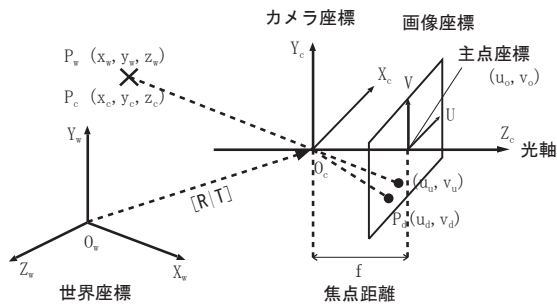


図1 世界座標と画像座標

まず、点 P_w の三次元座標の同次座標表現 $P_w = [x \ y \ z \ 1]^T$ と、点 P_d の二次元座標の同次座標表現 $P_d = [u \ v \ 1]^T$ を用いて、 P_w と P_d の関係は次のように記述できる。

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

ここで、 λ は画像のスケール係数、 $[R|T]$ はカメラモデルの外部パラメータ行列、 A は内部パラメータ行列を表している。

以上のカメラパラメータによって、世界座標系の点は、図1のように画像平面に投影される。この図では、世界座標系における点 P_w の座標を (x_w, y_w, z_w) と表し、カメラ座標系における点 P_w の座標を $P_c(x_c, y_c, z_c)$ と表している。また、 O_c はピンホールカメラモデルにおけるピンホールを表しており、 Z 軸とレンズの光軸方向を一致させている。そして、 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。

(1) 式において、 $A[R|T]$ の自由度は 11 であるため、三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、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、このような点が 6 点あれば、 $6 \times 2 = 12 > 11$ であり、十分な拘束が得られてカメラ行列 $A[R|T]$ を決定することができるため、全てのパラメータが算出される。

3-2 透視図モデルによる検証

図2に縦7.00m×横5.00m、軒高4.00m、軒から頂上までの高さ2.00mの正確な透視図のモデルを作成した。CCによって算出される視点が、どの程度の誤差を生じるかを、最低限の6点の情報を与えた場合と、さらに2点を追加した場合の二通りで検証する。

結果を表2に示す。視点 S の座標を原点としている。平面距離は X - Y 平面における視点座標との直線距離である。6点の場合は平面距離0.02mと、極めて正確な値が算出された。点を8点に増やすと、平面距離はさらに小さくなった。このことから、扱う画像が正確であれば、CCによって正確な視点場推定が可能であることが分かった

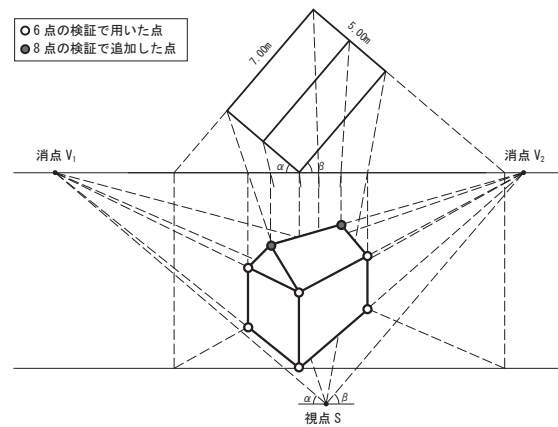


図2 透視図モデルによる検証

表2 透視図モデル 検証結果

	誤差			平面距離
	x	y	z	
視点座標	0.00	0.00	0.00	
CC 6点	0.00	-0.02	0.00	0.02
CC 8点	0.00	-0.01	-0.01	0.01

単位：m

3-3 写真による検証

実際の風景画は、前節の透視図モデルより遥かに複雑な構図で描かれている。また、必ずしも正確に描かれている訳ではない。よって、実際にCCを都市風景画に応用する際に、どのような基準で座標の情報を与えれば、正確な視点場が導けるのかを検討する必要がある。

3-3-1 近景写真による検証

図3は、視対象が二点透視となるように撮影した写真である。撮影位置を原点とし、透視図法によって求めた視点、CCによって求めた視点の座標と平面距離の誤差を表3に示す。CCに用いたポイントは、使用した総数と近距離（撮影位置からの距離60m未満）・遠距離（60m以上）の内訳、画面上のどの範囲から抽出したかを併せて記した。

まず、透視図法によって求めた視点場では、距離で16.2mの大きな誤差が生じた。写真を透視図とみなし、作図によって視点場を求める場合には、撮影時のカメラの傾きやレンズの歪み、作図時のずれによって誤差が生じやすいことが原因として考えられる。

次に、CCを用いて $k1 \sim k9$ の9つのパターンを検証した。 $k1$ と $k2$ は、共に6点を使用しているが、遠距離の点のみを用いた $k2$ では、誤差が大きい。 $k2$ に



図3 近景写真

表3 近景写真 検証結果

撮影位置	ポイント			座標			平面距離
	範囲	合計	近	x	y	z	
透視図法				0.0	0.0	0.0	
k1	全体	6	6	-10.7	-12.2	0.1	16.2
k2	全体	6		1.3	-0.1	-0.3	1.3
k3	全体	6	6	1.8	6.6	-0.2	6.9
k4	全体	7	1	-0.2	-0.5	-0.3	0.5
k4	左側	12	9	3	16.4	33.0	4.0
k5	右側	12	9	3	63.7	38.8	14.2
k6	全体	12	9	3	1.1	0.8	-0.4
k7	全体	12	6	6	0.5	-0.2	0.6
k8	全体	18	12	6	0.7	0.0	-0.2
k9	全体	24	18	6	0.7	0.0	-0.2

近距離の点を一つ追加したk3では、誤差が小さくなった。画面の左右に偏った位置から12点を抽出したk4、k5では著しく大きな誤差が出たが、画面全体の点を用いたk6、k7では誤差1.4m以内に収まった。18点以上に点を増やしても、同等の精度となった。

図4の地図に写真の撮影位置と、透視図法によって求めた視点場、CCによって算出したk9の視点場の位置を記した。透視図法と比べ、CCによる視点場推定の正確さが窺える。

これらの検証により、手作業の作図による視点場推定よりも、CCを用いる方が信頼度の高い結果が得られることが分かった。この理由としては、CCでは撮影時の状況やレンズの歪みを補正して結果を算出できることが考えられる。

3-3-2 景観写真による検証

前項では、作図可能な二点透視の構図で、近景に建物が大きく写った写真を用いてCCの検証を行った。しかし、都市景観を写した写真では、奥行きのある複数の視対象から座標を抽出する必要があり、対象の一部分しか画面に映っていない場合が多い。この場合、扱う地図や測量誤差の影響を受けやすくなるため、前項のような正確な値が算出されるとは限らない。

そこで、図5のような奥行きを持った写真を用いて、都市スケールの景観写真ではどの程度の誤差が生じるかを検証した。結果を表4に示す。使用するポイントは、近距離(70m未満)・中距離(70m以上200m未満)・遠距離(200m以上)の三つに分類した。X軸が画面の奥行き方向、Y軸が左右方向、Z軸が高さ方向を表している。

6点を用いたs1、s2では14.4m、13.6mの平面距離

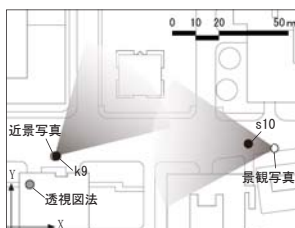


図4 写真の撮影位置



図5 景観写真

表4 景観写真 検証結果

撮影位置	ポイント			座標			平面距離		
	範囲	合計	近	中	遠	x		y	z
透視図法						0.0	0.0	0.0	
s1	全体	6	4	2		-13.8	4.0	-0.1	
s2	全体	6	6			-13.1	3.5	0.3	
s3	全体	6		6		51.7	7.4	-0.9	
s4	全体	6			6	173.3	8.9	-11.2	
s5	左側	12	6	4	2	-14.2	3.1	-0.6	
s6	右側	12	6	4	2	-15.0	3.4	-0.6	
s7	全体	12	6	4	2	-11.0	2.1	-0.2	
s8	全体	18	6	6	6	-10.9	1.7	-0.4	
s9	全体	24	10	8	6	-11.0	1.4	-0.3	
s10	全体	30	12	12	6	-11.4	1.9	-0.3	

の誤差が出た。中距離、遠距離の点のみを用いたs3、s4は著しく不正確な値になった。扱うポイントを12点に増やした場合、画面の範囲を左右に限定すると、14.6m、15.4mの誤差が生じたが、s6、s7では画面全体の点を用いることで、11m近くまで誤差を減らすことができた。s8、s9、s10ではポイントを増やしても、特に大きな変化は見られなかった。Z軸方向の誤差は、s4を除く全てで1m以内とほぼ正確な値になった。また、全体的にY軸方向の誤差よりもX軸方向の誤差が目立つことから、奥行き方向にずれが生じやすかった。

図4にs10の視点場を記している。撮影位置より約11m前進した位置に視点場が算出されており、近景写真と比べると誤差が大きい。

3-4 検証のまとめ

本章では、透視図と写真を用いた検証によって、CCによる視点場推定手法の有効性を示した。その際、画像のポイントが画面全体から満遍なく抽出すること、近距離の点を必ず与えること、点の数をできる限り多くすることの三つの条件を満たすことで、精度の高い結果が得られることが分かった。

4. 都市風景画における視点場推定

4-1 対象とする都市風景画

本章では、ベルナルド・ベロットが、ドイツの都市ピルナで描いた11枚の風景画を対象とし、描かれた視点場を推定する。彼の絵画は秀でた正確さを持っていると言われているため、視点場推定のために一定以上の精度を要する本研究に適している。

4-2 視点場推定の方法

ベロットが都市風景画を描いた当時の正確な地図は残っていない。また、三次元情報が得られている建物が、作図可能な構図で描かれている作品は無い。よって、透視図法の作図による視点場の推定はできない。

一方で、CCを用いれば、前述のように座標の組が6つ以上あれば視点場を算出できる。ベロットがピルナで描いた全ての風景画には、ゾンネンシュタイン要

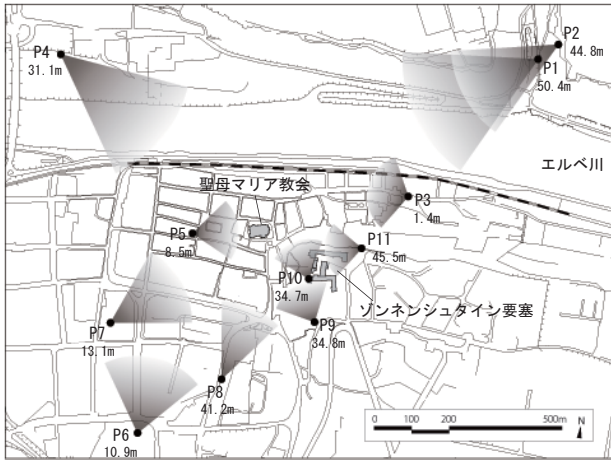


図6 都市風景画の視点場の位置

塞と聖母マリア教会が描かれている。ピルナのランドマークとも言えるこの二つの歴史的建造物は、今もなお現存しており、現地調査によって空間情報が得られている。この二つを中心に座標を抽出し、CCを行う。できるだけ多くの情報を反映し、より正確なデータを得るために、抽出できる主要なポイントの座標を全て用いることにする。11枚中9枚の風景画は、要塞と教会を遠景に望む構図で描かれているため、前章の検証の結果を考慮すると、あまり正確な値は期待できない。そのため、近景に描かれた街路の境界線や河岸線などの地形要素からポイントの座標が分かるものは、その点も用いることにする。

4-3 CC を実践

上記の条件で、P1 から P11 の 11 枚の絵画で CC を実践した。得られた視点場の地図上での位置と高さを、図6に示す。どの絵画でも、要塞や教会から半径2km以内の、対象が目視できる位置に算出された。P5においては、実際にペロットが絵画を描いたと言われている。



図7 ペロットの絵画(左)とCCによって求めた視点場から眺めた景観の3DCG(右)

る建物上に算出されたことから、ほぼ正確な値であると言える。

4-4 3DCG 画像との比較

現地調査で得られた情報を基に、ピルナ市街地の3DCGを作成した。4-2で求められた視点場の座標を入力し、絵画と同じ範囲が写りこむように画角を調節したものが図7である。用いたポイントと、3DCG画像の画角を表5に示す。

全ての絵画と3DCG画像で、ほぼ同じ構図の景観を望むことができる。特に、P5の絵画では建物の配置や遠近感に至るまで、概ね全ての構図が一致した。市役所と教会の塔部分の高さの関係が両者で異なるため、画家が作為的な演出をしている可能性が高い。

しかし、P3やP6では近景の映り方に違いが生じている。これは、主に遠景の要塞と教会の座標から視点場を算出しているため、近景要素による拘束が弱く、ずれが生じてしまったためと思われる。

5. 総括

本研究では、CCを用いた視点場推定手法の有効性を明らかにした。また、CCを用いて、都市風景画の視点場を推定し、3DCG画像と都市風景画を比較することで、その妥当性を示した。今後の研究では、この手法を画家の特徴や描かれた都市空間の分析に応用していきたい。

参考文献

- 萩島哲:バロック期の都市風景画を読む ベロットが描いたドレスデン、ピルナ、ケーニヒシュタインの景観, 2006年
- 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム:OpenCV プログラミングブック, 2007年
- 佐藤淳:コンピュータビジョン-視覚の幾何学-, 1999年
- 黒田正巳:透視画 歴史と科学と芸術, 1965年
- 面出和子, 齋藤綾, 佐藤紀子, 穂田夕子:描く人、鑑賞する人のための-遠近法と絵画

表5 CCに用いたポイントと画角

ポイント	画角				P6	P7	P8	P9	P10	P11	総数				
	要塞	教会	他	画角							要塞	教会	他	画角	
総数	21	13	6	2	58	15	9	4	2	76	15	9	4	2	76
P1	21	13	6	2	58	14	9	3	2	60	14	9	3	2	60
P2	21	13	6	2	50	15	11	2	2	46	15	11	2	2	46
P3	17	12	3	2	120	6	4	2	0	87	6	4	2	0	87
P4	20	15	5	0	50	12	5	5	2	78	12	5	5	2	78
P5	29	5	3	21	78	16	12	4	0	89	16	12	4	0	89