

建築物のイメージベースモデリングにおける精度に関する考察

松井健児† 斎藤隆文† 宮村(中村)浩子†

概要: イメージベースモデリングにおいて, 2次元の実写画像から3次元形状を推定するために, 正確なカメラ校正が必要である. 消失点抽出に基づく手法では, 建築物に多く含まれる平行直線群から求めた消失点を利用してカメラ校正を行うことで, より簡単なモデリングを可能としている. しかし, この手法は画像を複数用いた場合に画像間で不整合が生じるという問題がある. 本稿では, その原因の調査結果を示し, 一般的なイメージベースモデリングにおいても考慮すべき点の考察を行う.

Consideration about Accuracy Improvement for Image-Based Modeling

Kenji MATSUI† Takafumi SAITO† Hiroko MIYAMURA(NAKAMURA)†

Abstract: In image-based modeling, accurate camera calibration is required for reconstruction of 3D shapes. By the method based on vanishing point extraction, simple camera calibration is enabled by using vanishing points acquired from parallel straight line groups that buildings contain. However, it does not have enough accuracy for reconstruction from multiple images. This paper shows and discusses the causes of errors, which should be taken into consideration also in general image-based modeling.

1 はじめに

近年, 3次元の写実的なコンピュータグラフィックスが多くの分野で用いられている. 例えば, 都市景観のシミュレーションなどにおいて, 建築物を忠実に表現する際などに有効である. しかし, その作業には大変手間がかかるため, 作成コストの削減方法が望まれている.

作成コストの削減方法の一つに, 実写画像を基に3次元形状を復元するイメージベースモデリング技術が挙げられ, この技術による簡便なモデリング手法の研究がなされている. 特に, 消失点抽出に基づく手法では, 建築物に多く含まれる平行直線群から求めた消失点を利用して

カメラ校正を行うことで, より簡単なモデリングを可能としている. しかし, この手法は画像を複数用いた場合に画像間で不整合が生じるという問題がある. そこで, 本研究ではその原因の調査を行い, 改善手法の検討を行う.

2 イメージベースモデリングの既存手法

本節では, イメージベースモデリングにおける既存の手法を挙げ, その有効な点や問題点を示す.

2.1 複数画像間の対応点抽出に基づく手法

実写画像を用いて3次元形状の復元を行う手法として, 復元対象のオブジェクトを異なる視点から撮影した複数の画像間の対応点より, エピポーラ幾何などを用いて3次元形状を推定する手法が現在一般的である[1,2]. この手法では, 画像間での特徴点の正確な対応付け処理が必要となる.

†東京農工大学, 生物システム応用科学教育部
Tokyo University of Agriculture and Technology,
Graduate School of Bio-Applications and Systems
Engineering

2.2 消失点抽出に基づく手法

対象となるオブジェクトが建築物などの場合、オブジェクトを構成している線分や面が平行性や垂直性の関係を豊富に含んでいることが多い。この特性を利用したイメージベースモデリングの研究として文献[3,4]がある。これらは、オブジェクトを構成している平行直線群を Hough 変換により抽出し、その交点として求めた消失点を用いて3次元形状を復元している。

文献[3]の手法では、画像平面上で一つの消失点に収束する直線群の各パラメータが、パラメータ平面上において画像平面の消失点に対応する直線上に分布するという性質を利用し、消失点を自動検出している。しかし、この手法により消失点を自動検出した場合、誤検出される可能性があることや、適切な閾値設定の手間がかかるなどの問題がある。

一方文献[4]の手法では、通常遠方に位置する消失点を、有限円形領域を用いて有限の領域に可視化することで、ユーザが消失点を認知し、指定することを可能としている。そのため、単一画像から建築物のモデリングを行った場合は、消失点を手動で微調節することである程度の精度を得られる。

消失点の指定をユーザに任せることにより、安定した消失点の推定が可能で、かつ微調整が容易な[4]の手法は、消失点抽出に基づくイメージベースモデリングにおいて有効な手法である。しかし、多方向からのテクスチャを得るために複数の画像を用いた場合に、調整しきれない誤差が生じ、モデリング精度に影響を及ぼすという問題がある。そこで、本研究は誤差が生じる原因の調査を行う。予想される誤差は、Hough 変換による直線抽出の際の誤差や、入力画像に含まれる誤差などが挙げられる。

3 誤差原因の調査

高精度で消失点を求めるには、消失点を通る直線群の抽出精度が重要となる。直線群の抽出精度の低下を招く原因としては、Hough 変換による直線パラメータの検出精度不足や、レンズの歪みなどにより入力画像自体に歪みが生じていることなどが考えられる。本節では、これらの原因による直線群抽出精度への影響を調査し、改善方法の検討を行う。

3.1 Hough 変換の高精度化

直線群の抽出に用いている Hough 変換による誤差が、モデリング精度低下の原因となっている可能性が考えられる。予備実験より、投票値のピーク位置にずれが生じている場合が見られ、また、そのピーク位置の検出精度も不足していることが考えられる。そこで、これらの点について対処することで、高精度の消失点の抽出につながるか調査する。

3.1.1 量子化誤差を考慮した Hough 変換

投票値のピーク位置にずれが生じる原因の一つに、量子化誤差が考えられる。量子化誤差を考慮した Hough 変換の高精度化の研究には文献[5]がある。一般的な Hough 変換のパラメータが包含し得る量子化誤差の値の確率分布に基づき、Hough 変換投票領域に可変フィルタ処理を施す。それらの手法のなかで、特に式(1)、(2)の正規分布に基づく2次元平均化フィルタが量子化誤差軽減に有効であると示している。そこで、本実験では上記の2次元フィルタを簡略化して、図1の加重平均フィルタを用いてピーク位置を検出し、消失点抽出への量子化誤差の影響の有無を調査した。

$$f(\rho, \theta) = f_g(\rho, \sigma_\rho) \cdot f_g(\rho, \sigma_\theta) \quad (1)$$

$$f_g(x, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma = \delta\sigma_{\max} / 2$$

($\delta\sigma_{\max}$: 最大量子化誤差)

1/16	2/16	1/16
2/16	4/16	2/16
1/16	2/16	1/16

図1 加重平均フィルタ

3.1.2 ピーク位置の検出精度の改善

本項では、以下の方法でサブピクセル精度のピーク位置を検出し、消失点抽出精度への影響を調査する。

(A) 放物線を用いた方法

投票値がピークとなる格子とその4近傍の投票値を用いる．4近傍の座標と投票値を放物線に当てはめ，その放物線の頂点をピーク位置として求める．つまり，図2のように u, v 座標に放物線をそれぞれ当てはめ，その頂点座標 u', v' をピーク位置の座標とする．

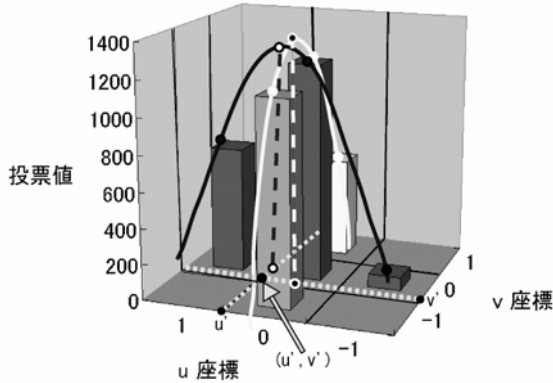


図2 放物線を用いた検出方法

(B) 双三次たたみ込み内挿法を用いた方法

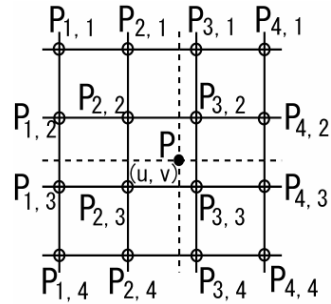
投票結果からピークとなる格子の座標を求め，その投票値とその近隣の投票値を用いて双三次たたみ込み内挿を行う[6]．その結果得られた内挿値が最大となる u, v の座標をサブピクセル精度で検索し，その座標をピーク位置とする．内挿したい点の内挿投票値は，図3に示すように周囲16点の投票値を用いて，式(3), (4), (5)で示される双三次たたみ込み関数より求める．

$$P = \begin{bmatrix} f(y_1) & f(y_2) & f(y_3) & f(y_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{31} & P_{41} \\ P_{12} & P_{22} & P_{32} & P_{42} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} & P_{43} \\ P_{14} & P_{24} & P_{34} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \\ f(x_4) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi} \approx \begin{cases} 1 - 2|t|^2 + |t|^3 & (0 \leq |t| < 1) \\ 4 - 8|t| + 5|t|^2 - |t|^3 & (1 \leq |t| < 2) \\ 0 & (2 \leq |t|) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_1 = 1 + (u - [u]) & y_1 = 1 + (v - [v]) \\ x_2 = (u - [u]) & y_2 = (v - [v]) \\ x_3 = 1 - (u - [u]) & y_3 = 1 - (v - [v]) \\ x_4 = 2 - (u - [u]) & y_4 = 2 - (v - [v]) \end{cases} \quad (5)$$

なお， $[]$ はガウス記号で， $[u]$ は u の小数部分を切り捨てた整数部分を表す．



投票値を内挿したい点
投票値が存在する点

図3 双三次たたみ込み内挿法

3.1.3 調査結果

上記のそれぞれの方法を用いて直線のパラメータ抽出を行った場合の精度の検証結果を示す．

まず，ランダムな位置の2点を入力として，その2点を通る直線のパラメータ（理論値とする）と，Hough変換により求めたパラメータ（実験値とする）の比較実験を行った．図4は，比較を1000回繰り返した際の絶対誤差の平均値を示している．誤差が減少していることから，量子化誤差とピーク位置検出の精度不足が誤差原因の一つであることが判明した．さらに，両改善を組み合わせるとより大きな効果が得られることがわかる．

次に，上記の2次元フィルタと双三次たたみ込み内挿法によるHough変換の高精度化を，実際に実写画像に適用した場合の消失点付近の拡大図を表1のBに示した．従来の方法による表1のAと比べると，消失点の集中度が向上していることがわかる．

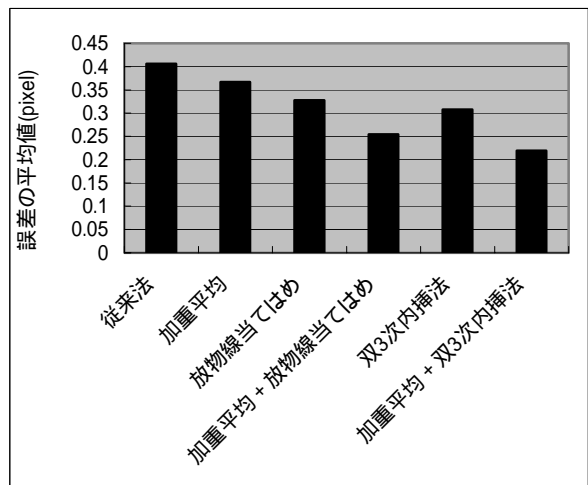
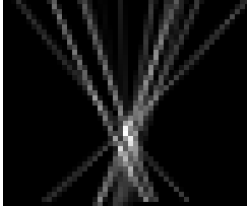
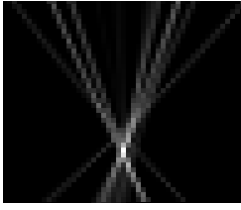
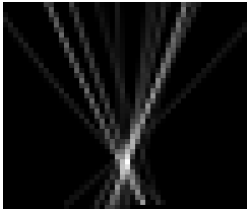



図4 実験値と理論値の絶対誤差の平均値

表 1 消失点付近の拡大図の比較

	従来の方法	Hough 変換の 高精度化後
収差補正無し	A 	B 
収差補正有り	C 	D 

3.2 歪曲収差補正

理想的なレンズを想定した場合、オブジェクトの一点から出た光線はレンズを通過後一点に集中し、オブジェクトとその像は相似形となる。しかし、実際のレンズには理想光学からの誤差があり、鮮明度の低下や形の歪みを引き起こす。その誤差のことを収差と呼ぶ。収差には、色収差、球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲収差、歪曲収差などがある。歪曲収差以外の収差は、画像の鮮明度に関わる収差であるが、歪曲収差は像全体の形状を変形させる。例えば、四角い物体が糸巻状もしくは樽状に変形され、その歪みは光軸から離れた直線ほど大きくなる[7]。補正用のレンズを使用して収差を抑えた高価な計測用のレンズもあるが、本研究では一般的な低価格のデジタルカメラの使用を想定しているため、人目で見ても歪曲収差の影響が見られる。

歪曲収差の影響によって、オブジェクトを構成している線分が本来直線であったとしても、画像上で直線である保証は無い。線分に歪みがある場合、消失点推定の誤差原因となる可能性が高いため、文献[7]の補正法を用いて調査した。一般的に、歪曲収差による変位は、光軸を原点とした結像平面の x, y 直交座標系において式(6)で表される。この手法では、式(6)の2次の項の係数 K_2 を推定し補正する。ただし、光軸

を画像中心と仮定している。なお、本実験には Canon 製 Power Shot S30 を用いる。

$$\begin{aligned} \delta x &= (K_0 + K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + K_3 r_d^6 \dots) x_d \quad (6) \\ \delta y &= (K_0 + K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + K_3 r_d^6 \dots) y_d \end{aligned}$$

$\delta x, \delta y$: 歪曲収差による変位

r_d : 光軸から結像点のユークリッド距離

($r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$ が成り立つ)

入力画像に歪曲収差補正を施して直線抽出を行った場合の、消失点付近の拡大図を表 1 の C に示す。補正を行っていない表 1 の A と比べると、消失点の集中度が向上していることがわかる。よって、歪曲収差が誤差原因の一つであると言える。また、表 1 の D より、Hough 変換の高精度化と歪曲収差補正を組み合わせるとより効果が高いことがわかる。

4 改善後も残る誤差の調査

上記の Hough 変換の高精度化と歪曲収差補正による改善を行った後も、消失点の集中度が不足する場合が見られた。その原因の調査より、近接する複数の平行直線を同一直線として誤検出していることが判明した。

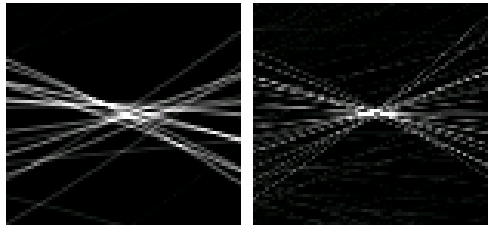
文献[5]において、Hough 変換時の画像平面とパラメータ平面の分解能の検討が重要であるとしている。そこで、高解像度の入力画像の利用と Hough 変換投票領域の拡張により分解能を上げて調査する。

入力画像の解像度と Hough 変換投票領域をそれぞれ 512×384 、 513×513 とし直線を抽出した場合の、消失点付近の拡大を図 5(a) に示す。この図より、消失点が一点に集中していないことがわかる。

解像度と Hough 変換投票領域をそれぞれ 1024×768 、 2049×2049 と変えて実験した結果の拡大を図 5(b) に示す。比較すると、消失点の集中度が改善されていることがわかる。このことから、Hough 変換時の画像平面とパラメータ平面の分解能不足が、誤差が生じる原因の一つであることが確かめられた。

ただし、分解能の向上は計算時間とのトレー

ドオフとなる．このような分解能に関する検討は過去に行われており[8,9]，これらを参考に，Hough 変換の高精度化と歪曲収差補正も用いた上で，適切な入力画像の解像度と Hough 変換領域を用意する必要がある．



(a) (b)
図5 消失点付近の拡大図の比較

5 モデリング精度への影響の調査

本研究の目的は，モデリング精度を低下させている原因の調査とその改善である．よって，本節では調査より明らかになった誤差原因を改善した上で，実際にモデリング精度への影響の調査結果を示す．

上記の精度改善を行った上での，モデリング精度への影響を調査する．入力画像には，同じ建築物を異なる視点から撮影した二枚の図を用いる．図6(a)を基準に直方体を当てはめ，図6(b)上で誤差を調べる．改善前と改善後のそれぞれの調査結果を図7,8に示す．精度の向上は見られるが，依然として誤差が残っていることがわかる．誤差の改善が不足していることと，誤差の原因が他にも存在することが考えられる．



(a) (b)
図6 モデリングの入力画像



図7 改善前のモデリング結果

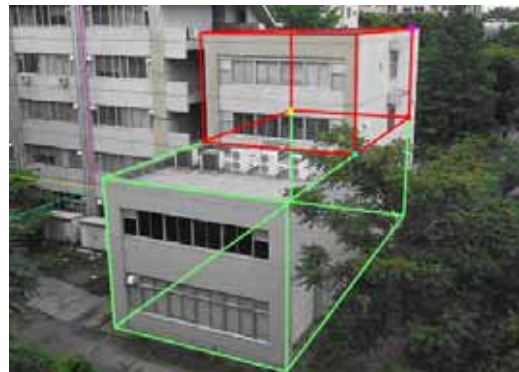


図8 改善後のモデリング結果

6 光軸のずれ

消失点抽出に基づくイメージベースモデリング手法では，3消失点と光軸点の4点のうち3点以上を用いてカメラ校正を行う．消失点の1つを正確に求められない場合でも，光軸点位置の指定により補うことができる．したがって，正確な光軸点の推定は，モデリング精度の改善において重要である．

CCD の物理的な配置により，レンズの光軸と画像面との交点である光軸点は必ずしも CCD の中心と一致しない[10]．ただし，近年の製造技術の進歩により，高精度の計測が目的でない場合は，レンズの光軸と画像面との交点である光軸点を画像の中心点としてもさほど問題にならないと言われている[11]．しかし，イメージベースモデリングに用いる場合，この簡略モデルでは精度不足である可能性がある．また，3.2項で示した歪曲収差の収差中心は光軸点であるため，補正精度の向上のためにも正確な光軸点が必要となる．そこで，本節では実際に光軸点と画像中心のずれを計測した結果を示す．

計測方法は以下の通りである．光学ズーム機

能を持つデジタルカメラを固定し、広角側と望遠側の写真を撮影する。両写真における不動点を光軸点として求める。これは、光軸を通る光線は一直線に画像面に結像するため、焦点距離に関わらず光軸上の画像は同じテクスチャになるという性質に基づく。

1024×768pixel の両写真の焦点距離を変化させて計測した光軸点と、画像中心(512,384)とのずれを表2に示す。

表2より、比較に用いる両画像の焦点距離によって、求まる光軸点の位置が大きく異なっていることがわかる。このことから、本手法での光軸点位置の決定は不可能である。また、ズーム機能によってレンズ中心が移動している可能性などが考えられ、本実験で用いたカメラ以外でも起こり得る。この点に関しては今後さらに調査する。

表2 光軸点位置と画像中心とのずれ

焦点距離		光軸点の位置 (x, y)	画像中心とのズレ (pixel)
広角側	望遠側		
18mm	21mm	(560, 429)	(48, 45)
15mm	21mm	(550, 429)	(38, 45)
12mm	21mm	(544, 416)	(32, 32)
10mm	21mm	(530, 411)	(18, 27)
9mm	21mm	(528, 404)	(16, 20)
7mm	21mm	(525, 402)	(13, 18)
7mm	18mm	(521, 398)	(9, 14)
7mm	15mm	(518, 394)	(6, 10)
7mm	12mm	(517, 394)	(5, 10)
7mm	10mm	(518, 391)	(6, 7)
7mm	9mm	(518, 393)	(6, 9)

7 おわりに

本稿では、消失点抽出に基づくイメージベースモデリング手法を用いて、未校正の複数画像より建築物の三次元モデルを復元する際に生じる誤差の原因の調査結果を示した。判明した誤差の原因を以下にまとめる。

・ Hough 変換時の誤差

- (1)量子化誤差
- (2)投票値のピーク位置検出精度の不足
- (3)Hough 変換時の画像平面とパラメータ平面の分解能不足

・ 入力画像による誤差

(4)歪曲収差

また、本実験で用いたカメラにおいて、焦点距離の変化とともに、光軸位置が動いている可能性がある。

以上のことは、消失点抽出に基づく手法に限らず、一般的なイメージベースモデリングにおいても検討すべき点である。

今後は、誤差原因が判明した点において、さらなる高精度化を目指して改善を図り、その後も誤差が残る場合は原因の調査を継続する。

参考文献

- [1] 杉本典子, 徐剛, 3枚の中心射影画像によるカメラ内部変数・3次元形状・3次元運動の復元, 情報処理学会研究報告, CVIM114, pp.9-16, 1999
- [2] 杉村良彦, 佐藤淳, 未校正マルチカメラの相互投影を用いた弱校正と物体形状の復元, 情報処理学会研究報告, CVIM140, pp.17-24, 2003
- [3] 山中 俊介, 加藤 直樹, 藤澤 克樹, 建築画像の消失点検出手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, 第542号, pp.269-277, 2001
- [4] 荒井領太, 斎藤隆文, 複数画像に基づく簡易な建築物形状モデラ, 第1回情報科学技術フォーラム, LJ-6, 2002
- [5] 森本正志, 尺長健, 赤松茂, 末永康仁, 可変フィルタによるハフ変換の高精度化, 信学論, 信学論, Vol.J75-D-II, No.9, pp.1548-1556, 1992
- [6] CG-ARTS 協会, Image Processing 画像処理標準テキストブック, CG-ARTS 協会, 1997
- [7] 伊藤健二, 線情報を用いた実写画像による歪曲収差補正, 東京農工大学卒業論文, 2003
- [8] 輿水大和, Hough 変換に関する最近の研究動向, 情報処理学会研究報告, CV51, pp.1-8, 1987
- [9] 輿水大和, Hough 変換に関する最近の研究動向(2), 電子情報通信学会, PRU91-15, 1991
- [10] CG-ARTS 協会, デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, 2004
- [11] 除剛, 写真から作る3次元CGイメージベースト・モデリング&レンダリング, 近代科学社, 2001