

広域仮想都市構築のための航空写真影解析による

3次元情報復元

カイリル アズミ 小野晋太郎 影沢政隆 池内克史
東京大学生産技術研究所

論文概要： 仮想都市構築における3次元形状モデルを得る手段は様々であるが、代表的な例としては光学センサを用いて航空写真によるステレオ視を行ったりし、レーザースキャナを利用して3次元情報を得ながら同時にテクスチャも取得し、建物のモデルを構築するといった研究が見られる。しかし、いずれにしてもハイコストな計測器が必要とされる。故に、都市モデリングにはハイコストというイメージがある。このようなイメージを打開しようとし、計測器が不要な都市モデルを構築する方法を探っている。そこで、3次元情報を得る手段として、計測器の代わりに、航空写真の影解析を用いる手法を提案した。これまでの都市モデリングでは、航空写真から影を抽出するのは大変困難とされており、影を使った3次元情報取得に関する研究は殆どなされていない。しかし、本研究では航空写真の性質を評価した結果、航空写真の影領域と影でない領域の間に大きな階調の差があり、航空写真の2値化により影領域だけが抽出されることが分かった。そこで、本論文では特に2値化による影抽出・計測を用いた3次元情報取得手法を提案する。

3D Information Restoration Based on Shadow Analysis of Aerial Imagery for Large-Scale Virtual City Reconstruction

Khairil Azmi Shintaro Ono Masataka Kagesawa Katsushi Ikeuchi
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract: In this paper, an approach for automatically generating large-scale 3-dimensional city model is proposed, which is based on shadow analysis using high-resolution aerial imagery. With aerial imagery as its single input information, shadow extraction and measurement is intended to restore the 3rd dimension information (height) from the available 2-dimensional information of aerial imagery. Many approaches have been researched and applied to obtain this 3rd dimension information from 2-dimensional map or aerial imagery, however, most of them strongly depend on high-costly hardware such as laser range finder sensor, etc. The approach introduced in this paper is to offer a low-costly automatic system, which depends mostly on how reliable the shadow analysis algorithm applied is.

Keywords: 3D city model, aerial imagery, binary image, shadow analysis

1 はじめに

仮想現実(VR: Virtual Reality) システムの多くは、幾何学形状モデルを用いて、仮想環境や物体を表現し、コンピュータグラフィックス(CG) 技術によって描画・表示される。VR の利用分野は広く、シミュレーション、医療応用、福祉応用、3次元モデリング、娯楽、芸術など多岐にわたる。最近では種々のレンダリング技術の進歩により、実写に近い表示が得られるようになった。また、仮想空間におけるモデルについても各種のセンサやコンピュータビジョンなどの技術を用いて精度の期待できるモデリングが可能になりつつある。

しかし、現在の技術では、このような都市モデリングは依然として費用のかかる作業である。それというのも、建物の3次元幾何学形状の計測においては、計測器となるハードウェアの役割が大きいためである。計測はソフトウェアのみに任せることはできないと考えられている。

一方、発展途上国においては、このような事情から、都市をモデル化することは殆ど不可能である。レンジセンサのような計測器は高額である上に、それを扱えるだけのスキルも必要である。

そこで、本論文では、既存の技術では必要不可欠とされてきた計測器を一切用いない手法を考える。その第一歩としては、航空写真から建物の影を抽出し、抽出した影から高さ情報を得る手法を提案する。

2章では、既存の技術について述べる。3章では、提案手法としての影解析による3次元情報復元について述べる。最後に4章ではまとめを行う。

2 既存の技術と本研究の特徴

都市空間をより忠実に表現するためには、3次元形状を自動的に計測する手法が必要不可欠である。これまでステレオ航空写真から建物や道路などの3次元情報を抽出する手法が盛んに研究されてきた。[1] この手法はステレオマッチング技術によって3次元情報を抽出する方法であるが、航空写真に影や隠蔽などが非常に多い場合、建物の検出率と信頼性を向上させることはなかなか容易ではない。

一方近年、レーザ計測技術の発展に伴いレーザレンジファインダ(距離計測装置)などを利用して実物体の3次元情報を計測することが比較的容易になりつつある。地上レーザ計測器によるものもあれば[2][3]、航空レーザ計測器によるものもある[4][5]。しかし、いずれにしても、このようなレーザ計測器自体は高額なものであると同時に、それを扱うためにも高度な技術が必要とされる。

本研究では、いわゆる低コストな「3D city modeling on your desk」の完全実現を目指している。すなわち、実際の現場に行ったり、航空機や計測器などを使い航空撮影・計測を行ったりすることなく、実世界の都市を仮想空間へ低コストに投影できることを目標としている。

本研究で入力情報として必要とされているのは、個人でも購入可能な昼間撮影の航空写真である。航空写真に影解析処理を施し、処理結果として3次元情報が得られる。この3次元情報を元に、3次元都市モデルを構築する。

現段階では主に建物の3次元情報復元を目的としているため、3次元情報から得られるのは建物の高さだけであるが、建物の2次元情報は航空写真から既知であるため、建物の基本的な3次元幾何学形状が構築できる。すなわち、航空写真により与えられている建物の2次元平面の長さ・幅に高さを与えることで立体形状が生成できる。(図2)

建物以外に関しては、現段階では基本的に対象外としている。特に、地上道路は基本的に2次元情報だけでも構築できるので、その構築には3次元情報を必要としない。しかし、比較的大きな木の群れや高架道路、つまり建物以外で建物の大きさ以上の立体形状をもつ物体は本研究の対象となる。

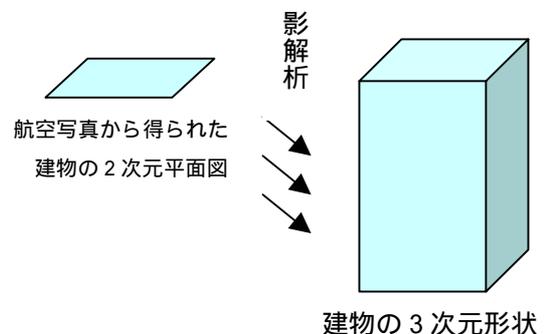


図2: 本研究の概念図

3 影解析による3次元情報復元

3.1 影解析の原理

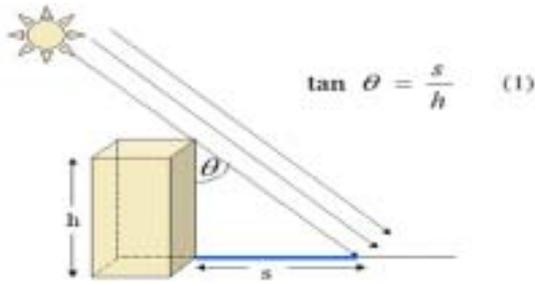


図 3.1: 天頂角, 建物の高さ, 影の長さの関係

図 3.1 に示すように, 建物の高さや影の長さは比例する. また, 任意の実空間 (広さに限度のある都市単位) において時刻 t における天頂角 θ はほぼ一定数に決まる. 従って, 時刻 t における天頂角 θ さえ分かれば, 建物とその影の比が求まる. (式 1)

ちなみに, 天頂角 θ は次のように求まる:
(式 2, 図 3.2) [6]

$$\cos \theta = \sin d \sin L + \cos d \cos L \cos k$$

$$\sin \phi = \frac{\sin d - \sin L \cos \theta}{\cos L \sin \theta}$$

$$\sin d = -\cos \left[(D-1) \frac{180}{182.6} \right] \sin(23.45)$$

$$k = (LST - 12) \cdot 15 \quad (2)$$

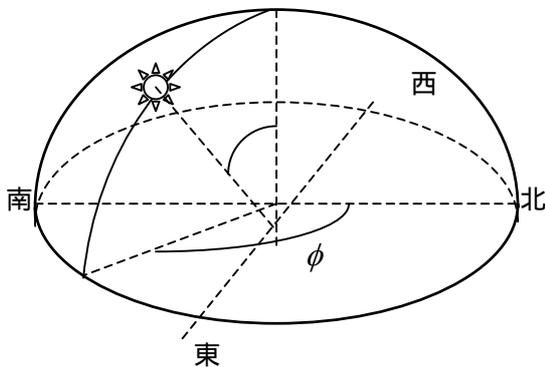


図 3.2: 天頂・方位の原理図

但し,
: 天頂角 (solar zenith)
 ϕ : 方位角 (solar azimuth)

LST: Local Solar Time (現地太陽時間)

L: 緯度

D: 月日指数 (12月20日 = 365, 12月21日 = 1)

3.2 初期仮定

本研究では, 少なくとも現段階において, 航空写真は対象の建物の真上から撮影されていると仮定し, また地面が建物の側面と垂直である (つまり, 地面がスロープでない) と仮定している. この仮定によって誤差が出ることは避けられないが, 誤差を把握し, 後に結果を修正すれば問題を最小化できる.

厳密には航空写真から影を解析するためには, 図 3.3 に示すより適応性のある状況を想定しなければならない. [7] しかし, これには本研究において未知であるカメラ位置に関する正確な情報が必要である.

3.3 2値化による影抽出・計測

3.3.1 航空写真の性質

本研究で扱う航空写真はデジタル画像であり, 構成単位の小さな点である画素が2次的に多数集まったものである. また, 各画素における画像の明るさを階調または階調値と呼ぶ. 画像の任意の画素を座標 (x, y) によって表すと, その画素における画像の明るさに相当する階調値を $f(x, y)$ とする. また, $f(x, y)$ の取り得る値の範囲あるいは個数を階調値と呼ぶ.

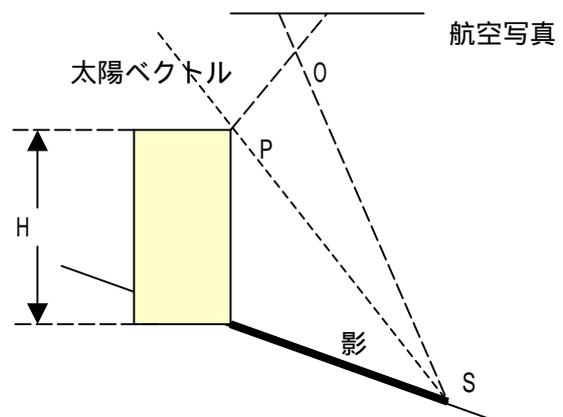
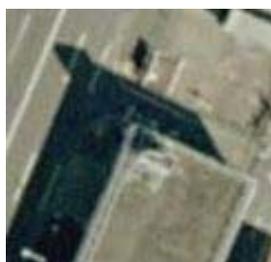


図 3.3: 影解析による3次元情報取得の基本概念

通常の航空写真はカラー画像であるが、カラー画像では、各画素 $f(x,y)$ は RGB, YMC 等の 3 原色の階調を表している。例えば、RGB 画像の場合、各画素 $f(x,y)$ は、R(Red), G(Green), B(Blue) それぞれの階調を示す $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$ によってその画素の色が決定される。

昼間撮影の航空写真では、影領域とそうでない領域の画像の明るさに大きな差がある。また、影でない領域に含まれている画素の階調値は高く、一定値に収束する。この値を本論文では高階調収束値と呼ぶ。同様に、影領域に含まれている画素の階調値も低く一定値に収束する。本論文では低階調収束値と呼ぶ。

図 3.4 (a) と (b) は本研究に用いる航空写真から取り除いたものを示す。その濃度ヒストグラムはそれぞれ図 3.5 (a) と (b) に示す。縦軸は画素数、横軸は階調値を表す。両ヒストグラムから分かるように、多くの画素は低階調収束値または高階調収束値に収束する。低階調収束値は影領域の階調値を表すのに対し、高階調収束値は影でない領域の階調値を表す。ヒストグラムのグラフの谷にあたる階調値をしきい値にすることによって、影領域と影でない領域を分割する良好な 2 値画像（階調値 $f(x,y)$ が 0 または 1 の画像）を得ることができる。カラー画像・階調画像を 2 値画像へ変換する処理は 2 値化と呼ぶ。

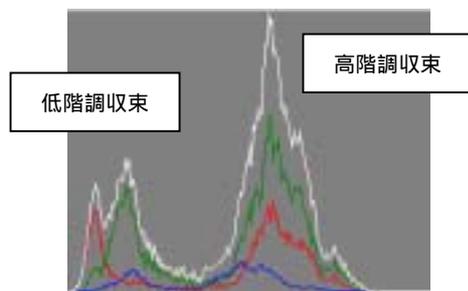


(a)

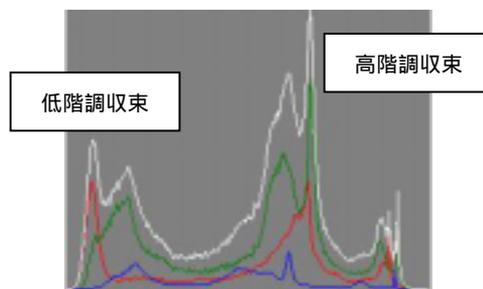


(b)

図 3.4: 航空写真の例



(a)



(b)

図 3.5: 航空写真の濃度ヒストグラム

3.3.2 2 値化の原理

ある濃度値（階調値） t をしきい値としてあらかじめ決めておき、すべての画像領域で

$$b(x,y) = \begin{cases} 1 & (f(x,y) \geq t) \\ 0 & (f(x,y) < t) \end{cases} \quad (3)$$

とする。但し、 $b(x,y)$ は 2 値画像の画素 (x,y) の階調値とする。

3.3.3 固定しきい値による航空写真の 2 値化

固定しきい値による 2 値化では、航空写真全体に対してただ一つのしきい値を設定する。しきい値の決定にはヒストグラムを用いることが多い。前述のように、航空写真の性質のために、航空写真のヒストグラムに明確な谷が存在する場合が殆どである。このような場合、ヒストグラムの谷にあたる階調値をしきい値にすることにより、良好な結果が得られる。

図 3.6 は本研究で実際に 2 値化した航空写真の例を示す。原画像（図 3.6 (a)）では影が直接地面に射



(a) 原画像



(b) 2 値画像 (t=80)

図 3.6: 航空写真の 2 値化

影する。原画像のヒストグラム(図 3.5(a))からしきい値を決定し(この例では、ヒストグラムの谷にあたる階調値は 70-90 である)、そのしきい値で 2 値化を行った。その結果は図 3.6(b)に示す 2 値画像である。

3.3.4 方位ベクトルによる影計測

本研究では、方位ベクトルは知識ベースの方法とサンプル・ベースの方法の 2 つの方法で求める。

1) 知識ベース

航空写真の撮影日・時刻が分かれば、式 2 より、方位角 ϕ が求まり、方位ベクトルが生成できる。

2) サンプル・ベース

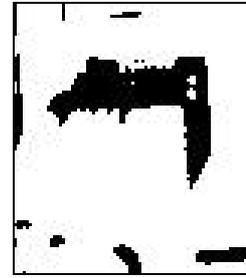
航空写真から一つの建物をサンプルにとり、その影の向き (= 方位角) を計り、方位ベクトルを生成する。

本研究では方位ベクトルを影の長さを計測するために用いる。現段階では次の 2 つの方法を採用している：

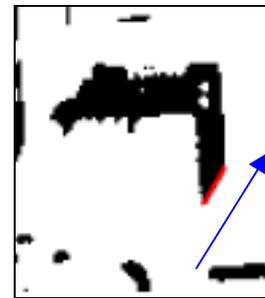
- 1) 影領域内において、方位ベクトルに平行なエッジを検索する。エッジにノイズがなければ、通常各建物からは高々 2 つの接線が得られる。長さの異なる 2 つの接線が得られたときは、長い



(a) 原画像



(b) 2 値画像 (t=80)



(c) 方位ベクトルと平行なエッジ

図 3.8: 方位ベクトル

接線の先端にノイズが出ている可能性があるとして、短い方を採用し、その長さを影の長さとする。しかし、図 3.8 に示すように、影領域のエッジに不規則にノイズなどが出ている場合もある。この例では、方位ベクトルと平行なエッジは一つしか得られない。このときは素早く唯一の接線の長さを影の長さとする。一方、方位ベクトルと並行なエッジが全く得られない場合は、次の対策を適用する。

- 2) 方位ベクトルの方向に沿って影領域に複数の接線を当てはめて、それぞれの長さを計る。これによって、各建物から複数の接線が得られるが、長さの順に上から n 本の接線を取り、それらの長さの平均値を影の長さとする。得られた全ての接線の長さの平均を影の長さにとることも以前考えていたが、図 3.9 に示すように、場合によっては影領域内に階調値の高い部分が存在す



(a) 原画像



(b) 2 値画像 (t=80)



(c) 2 値画像 (t=100)

図 3.9: 影領域のエッジから直線が得られない上、影領域内にノイズが出る例

る場合があるので、単にすべての接線を採用しその長さの平均を取るだけでは誤差を拡大することになる。

3.3.5 問題点

1) スロープ地面

影が映る地面は必ずしも建物と垂直とは限らないので、地面がスロープになっている場合、その時の対策を考えなければならない。もちろん、3次元情報をもたない単純な航空写真ではスロープを検出できないため、現段階では各建物周りの地面を平面とみなす。特殊な地形をもった都市（例えば、山岳地帯に位置する都市）ではない限り、スロープは部分的にしか存在しないので、その場合のスロープ無視による誤差は許容範囲内とする。

2) 建物が高密度に密集しているエリア

高密度エリアでは、建物の影が地面に映らず、隣接した建物に映る場合が多い。この場合、ある建物群について、その群の内側に属するすべての建物の高さが同じと仮定し、その高さの値は群の最も外側に



図 3.10: 高密度エリアの例

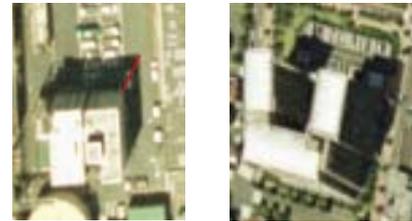


図 3.11: 航空写真が建物の真上から撮影されない例

位置し、その影が地面に映る複数建物の高さの平均値とする。（図 3.10）

3) 航空写真が真上から撮影されない場合

地面に垂直な建物の側面が航空写真に写っていることは、その航空写真がその建物の真上から撮影されなかったことを意味する（図 3.11）。しかし、高解像度衛星写真でも常にすべての建物の真上から撮影することが不可能である。そのため、この問題への対策としては、誤差評価を行い、ある一枚の航空写真における誤差率を検出することである。この場合、比較の参考として事前にある建物に関して正確な高さ情報を取得することが望ましい。一枚の通常の航空写真に関しては、この問題による誤差率はほぼ一意に決まる。

4 まとめと今後の課題

航空写真から 3次元情報を抽出するための影解析手法を提案し、計測器が必要としない低コストな広域仮想都市構築を可能にした。

しかし、構築システムは未完成のため、一般に用いられている 3次元情報取得技術（計測器を使った技術）との信頼性の比較は行っていない。評価システムの実現は、構築システムの実現とともに今後の課題となる。

また、よりリアルな仮想都市を構築するためにも、単なる 3次元幾何学形状を構築するだけでなく、得

られた3次元幾何学形状にテクスチャを貼ることも必要である。建物の屋根や道路などのテクスチャは簡単に航空写真から得られるが、建物の側面はそうではない。このようなテクスチャ取得も今後の課題となる。

参考文献

[1] C. Baillard and H. Maître, “3D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery: A Focusing Strategy,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 76, no. 3, Dec. 1999, pp. 244-258.

[2] C. Frueh and A. Zakhor, “3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans,” *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE CS Press, 2001, vol. 2.2, pp. 31-38.

[3] H. Zhao and R. Shibasaki, “Reconstructing Textured CAD Model of Urban Environment Using Vehicle-Borne Laser Range Scanners and Line Cameras,” *Proc. 2nd Int’l Workshop Computer Vision Systems, LNCS 2095*, Springer, 2001, pp. 284-297.

[4] M. Morgan and K. Tempeli, “Automatic Building Extraction from Airborne Laser Scanning Data.” *Proc. 19th Int’l Soc. Photogrammetry and Remote Sensing Congress (ISPRS)*, book 3B, ISPRS, pp. 616-623.

[5] H. Norbert and B. Claus, “Generation of 3D City Models from Airborne Laser Scanning Data,” *Proc. 3rd European Assoc. Remote Sensing Laboratories (EARSEL) Workshop Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, A.A. Balkema, 1997.

[6] X. Zhang and M. Nakajima, “Image-based Building Shadow Generation Technique for Virtual Outdoor Scene”, *Proc. of the 10th ICAT(International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, 2000, pp.132-139.

[7] S.Hinz, F. Kurz, A. Baumgartner and P. Wasmeier, “The Role of Shadow for 3D Object Reconstruction from Monocular Images”, *Optical 3-D Measurement Techniques (V)*, Institute of Geodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, 2001, pp. 354 – 363.

[8] R.B. Irvin and D.M. McKeown, “Methods for Exploiting the Relationship Between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 19(6), 1989, pp.1564-1575.

[9] 安居院猛, 長尾智晴, “画像の処理と認識”, 昭晃堂, 1996.

[10] 酒井幸市, “デジタル画像処理入門”, CG出版社, 2004.