

TLS (Three Line Sensor)を用いた三次元建物データ構築手法の開発

中川雅史, 柴崎亮介 (東京大学・空間情報科学研究センター)

要旨: 航空写真を用いた写真測量は, 密集都市部における三次元建物データを構築していくうえで, 効果的な手法である。特に, 高解像度画像を用いることで, 建物データを抽出するために十分な情報を得ることが可能である。しかし, 三次元データ構築の自動化の成功率は高くない。しかしながら, 高解像度画像と補助データを組み合わせることで, この成功率を改善できる可能性がある。本研究では, 超高解像度画像である Three Line Sensor (TLS) 画像を主データ, LIDAR データと既存地図を補助データとして用いた, データ統合型の三次元建物データ自動構築手法を開発した。結果として, 低い解像度の二次元建物形状データを, 超高解像度画像を用いることで, テクスチャを伴った三次元建物データへ, 自動的にリファインすることが可能になった。

Development of methodology for 3D urban data using TLS imagery

Masafumi NAKAGAWA, Ryosuke SHIBASAKI (The University of Tokyo)

Abstract: Photogrammetry based aerial photos is effective for 3D building manual reconstruction in dense urban area. Especially, high-resolution images provide enough information for data reconstruction. But, the correctness rate of automated 3D reconstruction is low. However, it can be improved by integrating ultra high-resolution images and complementary data. The data integration for automated 3D building reconstruction is developed in this research. TLS images are used as ultra high-resolution images. Moreover, 2D digital maps and LIDAR data are used as complementary data. As a result, low-resolution 2D building data are automatically refined to high-resolution 3D texture building data by using ultra high-resolution images.

1.はじめに

三次元建物データの構築には, 主に, 航空写真画像を用いた写真測量による手法と LIDAR データによって自動的に生成する手法, また既存地図に高さを付与する手法がある。一般的に, 航空写真画像は LIDAR データよりも解像度が高いため, LIDAR データを使う手法よりも写真測量による手法の方が, 都市部の密集地における建物の抽出や詳細なモデリングという面では比較的優位にある。しかし, 航空写真画像による三次元自動モデリングを行う際, 特に密集した都市部においては, オクルージョンの影響などもあり, 三次元計測の信頼性は低い。一方で, LIDAR データは, テクスチャ情報がないといった難点もあるが, 自動三次元モデリングに関する高いポテンシャルを持っている。しかしながら, その解像度はそれほど高くないので, 都市部の密集地における小規模建物の抽出や, 建物形状の変化を捉えることが容易ではない。また, 既存の二次

元地図に高さを付与する手法は処理が容易であるが, 三次元形状を忠実に再現できるか否かは, 既存地図中の建物形状の詳細さに依存する。このように, 各手法を用いることで三次元データを生成することはできるが, 必ずしもデータの品質やデータ生成の信頼性が高いとはいえない。

また最近では, これらの手法を用いて自動生成された三次元建物データに対して, テクスチャマッピングが行われる場合が多い。テクスチャ付きの三次元データは, その見栄えの良さだけに注目される。しかしながら, 密集都市部における建物データ更新の観点からは, テクスチャの変化を捉えることが有用な情報源になると考えられるので, 建物データにテクスチャを付けておくことには, そうした利点もある。一般的に, 建物の屋根面に関しては, 航空画像から取得したテクスチャが自動的に貼り付けられる。しかし, 壁面に関しては, 外業によって取得したデジタルカメラ画像を, マニュアルでの編集作業により貼り付けていくのが現状である。結果として, テクスチャ付きの三次元データを生成するためには, 形状データの 10 倍近くのコス

トがかかっている．しかし，高解像度の斜め写真を用いることで，壁面へのテクスチャマッピングを自動化することが期待できる．

2. 本手法におけるデータ構築手法の概要

本研究では，より信頼性の高い三次元建物データを自動構築する手法を提案すると同時に，建物壁面へのテクスチャマッピングの自動化手法を提案することで，先に述べた諸問題を解決することを目的とする．

基本的な考え方は，非常に高い分解能を持った三重ステレオ画像を取得可能な Three Line Sensor (TLS) 画像（空間分解能 3cm）と，低解像度 LIDAR データや既存の 2D 地図を組み合わせることである．本手法の処理をおおまかに分類すると，「概形 3D 建物モデルの生成」，「建物形状の自動修正」，「画像選択型テクスチャマッピング」の三段階になる．

「概形 3D 建物モデルの生成」では，建物抽出と三次元建物初期モデルの生成が行われる．一般的に，画像から建物を自動抽出するためには，画像のセグメンテーションを高い精度で行う必要がある [1]．一方，LIDAR データをセグメンテーションすることで建物を自動抽出する手法もあるが，その解像度の低さにより，密集都市部における小建物を抽出することは，容易ではない [2]．そこで，ここでは既存の二次元地図を用いることで，この建物抽出に関する問題に対応することにしている．ただし，この場合初期値となる二次元地図は漏れなどがなく，完全性という意味で現状とほぼ一致していると想定する．また，これまでの研究において，ステレオ航空写真画像を用いてステレオマッチングを行う際に，LIDAR データを利用して，あらかじめおおまかなマッチングポイントを取得しておくことで，座標計測の精度と速度が向上することがすでにわかっている [1]．そのために，おおまかな三次元形状を持った建物初期モデルが生成される．そこで，LIDAR データと既存の二次元数値地図データから，おおまかな三次元形状を持った建物初期モデルを生成する．

また，一般的に，既存の二次元地図は，高解像度航空画像に比較すると形状表現が粗く，その画像上において，位置と形状の整合がとれず，位置精度上の問題が生じるばかりでなく，テクスチャの貼り付けの段階でもずれなどの問題を生じる．そこで，建物形状と画

像上での位置と形状の整合が取れるように，既存の二次元地図を初期値にして，「建物形状の自動修正」を適用し，建物形状をより忠実に再現する．しかし，数多く提案されている画像だけを用いたモデリングの成功率は画像処理の成功率に大きく左右される．そこで，本研究における手法では，画像空間上での制約に加え，三次元建物初期モデルを利用して，オブジェクト空間上で三次元幾何的制約をかけることで，大きなミスマッチングを減らすことを試みている．結果として，モデリングの自動化レベルを飛躍的に向上させることが可能になると考えられる．

また，TLS 画像は，建物の屋根だけでなく壁面の情報も十分に含まれており，オクルージョンの影響が少ないことが特徴である．そこで，自動的に生成された三次元建物データに対して，「画像選択型テクスチャマッピング」を適用し，TLS 画像を用いた建物屋根面および建物壁面へのテクスチャマッピングを行う．

3. Three Line Sensor (TLS)

TLS は航空測量のための光学センサである．TLS は，平行に並べられた 3 つのライン式 CCD で構成されているもので，前方視，直下視，後方視の三方向の画像を同時に取得できる．これを航空機の進行方向に対し垂直に搭載し，地上面を走査することによって地上の対象物の三重ステレオ画像を得ることができる．これにより，隠蔽部を極めて少なくすることができる．3 つのうちの 2 画像を利用した前方交会法によって三次元座標を求めることも可能である（図 1）．

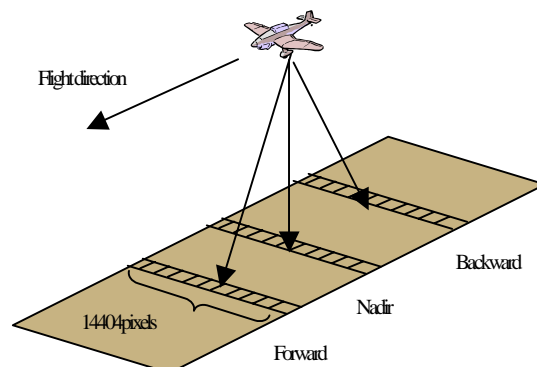


図 1. TLS によるデータ取得

ライン式 CCD の特徴として、飛行方向と直角な方向で比較したときにエリアセンサーと比べて画素数を多くとれることがある。これを利用することで、より広い範囲を計測対象とすることができる。また、ライン式 CCD は、一度に 1 ライン分の画像しか取得できないが、非常に多数の素子を配置することができ、航空写真に匹敵する解像度を得ることができる。しかし、各ラインの画像取得時間が異なるので、各ラインの撮影時の位置・姿勢も異なってくる。そのため、従来の航空写真測量の方法で標定することはできず、各ラインにおけるセンサ位置・姿勢を推定しなくてはならない。また、TLS は航空機搭載のため、画像が航空機の動きに大きく左右される。航空機と TLS の間に航空機の細かい動揺の影響を防ぐためのスタビライザを用いることで、そのぶれを軽減することが可能である。

4. オブジェクト空間と画像空間

本研究では、オブジェクト空間と画像空間の二種類の空間上でモデリングを行う。オブジェクト空間は、実空間で使用している座標系に基づいた空間である。また、画像空間は、画像座標系に基づいた空間である。TLS 画像の場合、前方視、直下視、後方視の三種類の画像があるので、3つの画像空間を設定しておく。処理上では、オブジェクト空間上で 3D 建物ポリゴンを保持しておき、その形状を画像に適合するように画像空間上で修正することを繰り返し行う。ここでは、データを画像空間からモデル空間へ移動することを「投影」と呼び、データをモデル空間から画像空間へ移動することを「逆投影」と呼ぶ。

5. 概形 3D 建物モデルの生成の生成

地図から抽出した 2D 建物ポリゴンを LIDAR データに投影し、その LIDAR データにおける 2D 建物ポリゴン領域内の高さ情報と法線ベクトル情報を抽出かつフィルタリングすることで、2D 建物ポリゴンに高さを付与する。これにより、大まかな形状の 3D 建物ポリゴンを生成する。

6. 建物形状の自動修正

画像空間上に逆投影される 3D 建物ポリゴンは形状表現が粗いので、画像上に現れる形状の整合がとれな

い。ここでは、画像上で対応している建物縁と一致するように、建物ポリゴンの水平面の形状修正を行う。まず、3D 建物ポリゴンの屋根面を直下視画像空間上に逆投影する。ここでは、SNAKE モデル^[4]を適用し、建物ポリゴンの形状を画像に適合するように修正する。SNAKE モデルは、以下の式のように定義される。

$$E_{snake} = \omega_1 E_{internal} + \omega_2 E_{external} \quad Optimize \quad (1)$$

ただし、 $E_{internal}$; 内部エネルギー変数

$E_{external}$; 外部エネルギー変数

ω_1 ; 内部エネルギー変数の重み

ω_2 ; 外部エネルギー変数の重み

SNAKE モデルを適用するにあたっては、画像空間上に投影されたポリゴンを初期値とする。また、エッジ画像には、建物の特徴を十分に含むものを用意しては行けない。そのため、オクルージョンの影響が比較的少ない TLS 直下視画像から抽出した画像を利用する。また、エッジを抽出する際、元画像のダイナミックレンジの設定を変えてエッジ抽出したものを重ね合わせるにより、太陽影の影響を軽減することを試みている。ここで最適化されたポリゴンは、画像空間からオブジェクト空間へ投影され、3D 建物ポリゴンの概形データを更新する。これにより、3D 建物ポリゴンの水平面の位置および形状が修正される (図 2)。

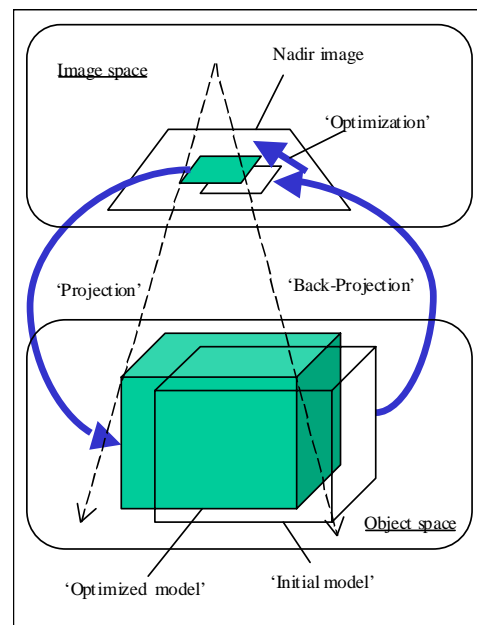


図 2 3D ポリゴンの水平面の位置・形状修正

ここで修正された3D建物ポリゴンは、前方視画像および後方視画像へ逆投影され、直下視画像上での処理とほぼ同様の処理を行う。ここで形状修正された2Dポリゴンは、画像空間からオブジェクト空間へ投影され、3D建物ポリゴンのデータを更新する。ただし、ここでは、マッチングにおいて、図3の幾何モデルに基づいた三次元幾何的制約をかけられる。これにより、形状修正に関する処理範囲に制限を設けることで、ミスマッチングを減らすことが可能になる。

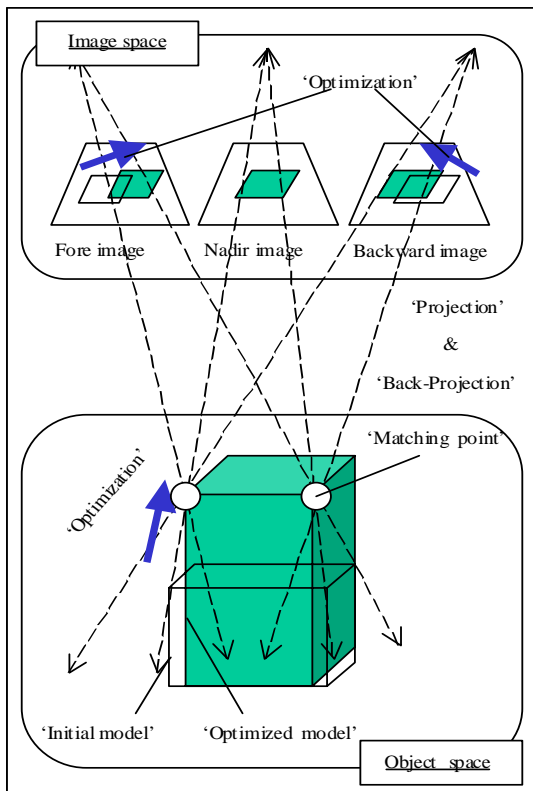


図3.3D建物ポリゴンの高さ修正

さらに、ライン画像のひとつの特徴として、ライン軸（TLS撮影方向の軸）に沿ったエッジ周辺の特徴量（エッジ両側の輝度値など）がほぼ一致することを利用できる（図4）。ここでは、ライン軸方向のエッジには、エッジ情報とエッジ両側領域の輝度値が、マッチングのパラメータとして利用される。また、ライン軸方向と垂直方向（CCDスキャニング方向）のエッジには、エッジ情報のみが、マッチングのパラメータとして利用される。マッチングは、面積関連の手法がベースとなり、その結果はSNAKEモデルの内部エネルギー変数に反映される(2)。

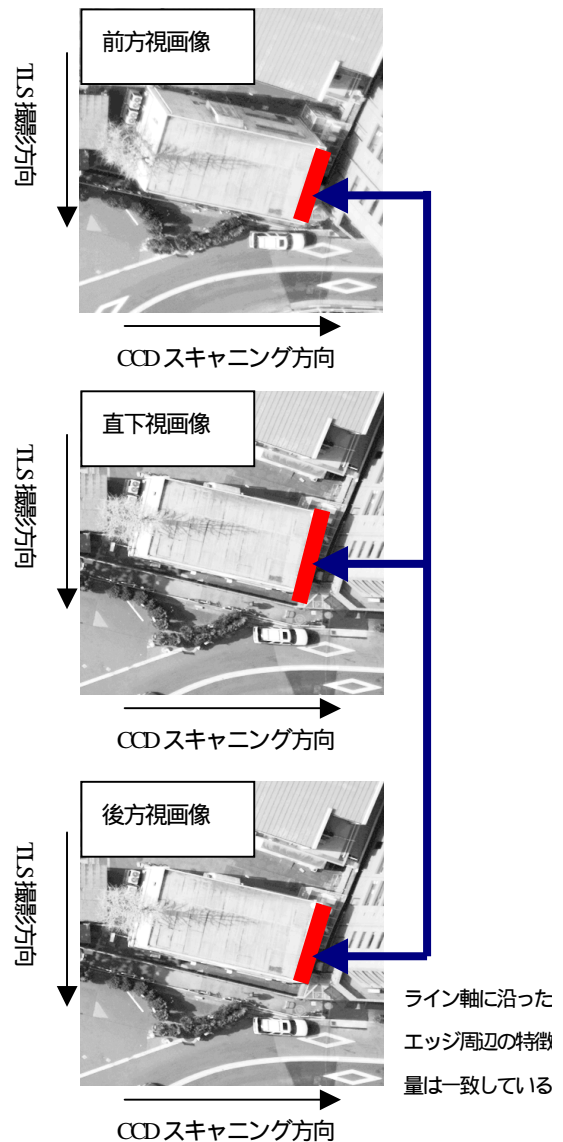


図4. TLS画像におけるマッチング

$$E_{internal} = \omega_{int1} E_{edge} + \omega_{int2} (E_{outside} + E_{inside}) \quad (2)$$

ただし、 E_{edge} ; エッジマッチング変数

$E_{outside}$; エッジ外側の輝度値のマッチング変数

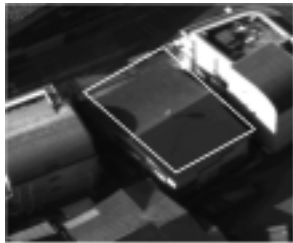
E_{inside} ; エッジ内側の輝度値のマッチング変数

ω_{int1} ; エッジマッチング変数の重み

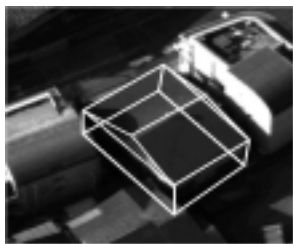
ω_{int2} ; 輝度値のマッチング変数の重み

次に、オブジェクト空間において、建物の壁面が鉛直であるという制約条件とLIDARデータから得られたDEMを利用することにより、建物が建っている箇所の地盤高を自動取得する。これにより建物の壁面部が決定される。さらに、ここで生成された壁面は画像空間

へ逆投影することで、画像空間における壁面の位置および形状が決定される(図5)。最終的に、3画像空間上の位置および形状とオブジェクト空間上で修正された3D建物モデルが対応付けられたものが生成される。



(a) 三次元建物初期モデル



(b) 修正された3D建物モデル

図5. 建物形状の自動修正結果

7. 画像選択型テクスチャマッピング

本手法でのテクスチャマッピングは、屋根面へのテクスチャマッピングと壁面へのテクスチャマッピングの二段階で構成される。

まず、屋根面へのテクスチャマッピングにおいては、「建物形状の自動修正」で得られた画像空間上の位置および形状とオブジェクト空間上の3D建物データの対応づけ情報を用いることで、建物の屋根面にテクスチャがマッピングされる。このテクスチャには、水平面方向において最も画質の良い直下視画像が用いられる。ここで、次の処理において、オクルージョンの影響による屋根面テクスチャの壁面への映りこみを防ぐために、テクスチャのマテリアルとして使用された領域は、影部として塗り替えておく。

次に、壁面へのテクスチャマッピングが行われる。ここでも、「建物形状の自動修正」で得られた画像空間上の位置および形状とオブジェクト空間上の3D建物データの対応づけ情報を用いることで、建物の壁面にテクスチャがマッピングされる。ここでのテクスチャのマテリアルには、直下視画像、前方視画像および

後方視画像の中から、最も画質の良くなるものが面ごとに選択される。

その画像選択の判断基準としては、画像上の面積(ピクセル値)およびオクルージョン率(面に含まれるオクルージョン領域の割合)がパラメータとして利用される。もし、任意の面が3画像上に存在しないと判断された場合は、テクスチャはマッピングされない。

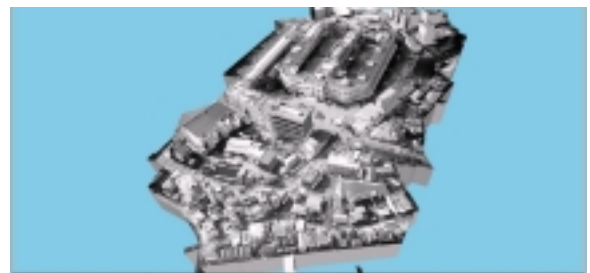
8. 実験

テストフィールドは東京・六本木である。この地域には水平屋根のほか、水平面が複合した屋根、切妻屋根など、様々な形状の建物が密集して存在する。本実験では、以下のデータが用いられた。

- 1) TLS画像：処理速度を上げるため原画像を2分の1の解像度(空間分解能6cm)に落としている
- 2) 低解像度LIDARデータ：空間分解能50cm
- 3) 2Dデジタル地図：地図レベル1:1000相当

9. 結果と考察

本手法において生成された三次元建物データを、図6に示す。これらは、TLS画像がテクスチャマッピングされた三次元建物データに、地表面のオルソ画像を重ね合わせた結果である。また、マッピングされているテクスチャは、すべてTLS画像が用いられている。



(a) 全体俯瞰



(b) 大型建造物と街区部分



(c) 大型建造物



(d) 街区部分



(e) 街区部分

図 6. モデリング結果

(c)にある建造物は、前方視及び後方視画像に加え、直下視画像もテクスチャマッピングされている例である。直下視画像の中心線（CCD スキャニング方向における中間点）上に近い部分では鉛直面が見えないが、画像の両端に近い部分では、鉛直面も観測でき、前方視及後方視画像に比較して歪みのない画像を得ることができる。こういった場合、壁面のテクスチャは、直下視画像からも取得される。

(d)や(e)中の建物の中には、壁面にテクスチャがマッピングされていない箇所が見られる。これは、任意の壁面が3画像上に存在しないと判断されているので、

テクスチャがマッピングされていない例である。こういった欠落箇所に対しては、水平面において、撮影方向と直角の方向から撮影された TLS 画像を用いることで補完することが可能である。また、図にも見られるように、TLS 画像は非常に解像度が高いので、速度制限や停止線などの道路ペイントや街路樹などの形状を持ったテクスチャとして取り込むことが可能である。本研究では特に取り扱っていないが、道路における情報を GIS データとして抽出することも可能である。

10 まとめ

本研究では、非常に高い分解能を持った TLS 画像を主データとして、低解像度の LIDAR データと形状表現の粗い既存の 2D 地図を補助データとして用いた、データ統合型の三次元建物データ自動構築手法を開発した。結果として、低い解像度の二次元建物データを、超高解像度 TLS 画像を用いることで、自動的に三次元建物データへリファインすることが可能になった。

画像空間とオブジェクト空間の両空間での処理により、大きなミスマッチングを減らすことができ、結果としてデータ自動構築の信頼性が向上している。また、既存の 2D 地図を初期値にして、SNAKE モデルを基本にした形状修正関数を適用することによって、建物形状の修正が効果的に行われることがわかった。

参考文献

- [1] M.NAKAGAWA, R.SHIBASAKI, Y.KAGAWA, Fusing stereo linear CCD image and laser range data for building 3D urban model, ISPRS Commission , WG /7, 2002.
- [2] M.NAKAGAWA, R.SHIBASAKI, Y.KAGAWA, Refining Coarse 3D Building Models by using high resolution air-borne linear CCD (TLS) imagery, Asian Cofrence on Remote Sensing, 2002
- [3] M.NAKAGAWA, H. ZHAO, R.SHIBASAKI, Comparative study on model fitting methods for object extraction, Asian Cofrence on Remote Sensing, 2000
- [4] MICHAEL KASS, ANDREW WITKIN, and DEMETRI TERZOPOULOS, 1988. Snakes (Active Contour Models). International Journal of Computer Vision, pp321-331.