

# 空撮映像の分割と統合による広域市街地空間モデルの自動構築

石川 裕 治<sup>†</sup>, 宮 川 勲<sup>†</sup>  
若 林 佳 織<sup>†</sup>, 荒 川 賢 一<sup>†</sup>

本論文では、空撮映像から市街地の3次元モデルを広域に自動構築する方式およびシステムを提案する。提案方式では、(1)各飛行コースの空撮映像からシームレスな3次元座標値データ(3次元点列データ)を復元し、(2)3次元点列データと線分情報を組み合わせて上面テクスチャ付きの建物群から構成される市街地の3次元形状モデルを復元する。広域の構築処理では空撮映像を多数の部分画像列に分割して処理を行うため、入出力データや処理パラメータなどの情報(設定情報)の管理がオペレータに大きな負担となる。提案システムはデータ処理単位ごとに設定情報を管理し、設定情報の自動生成機能によりオペレータがWebブラウザ上で簡易な設定作業を行うだけで構築作業を可能にする。実験では作業経験のない1名のオペレータによって、PC2台10日間の処理で約5平方キロメートルの市街地空間モデルを構築する。その結果、処理コストおよびオペレータ作業量の両面において、数十平方キロメートル規模の構築が可能であるとの見通しを得た。

## Automatic Structure Reconstruction in Large-scale Urban Areas Based on Partition and Integration of Aerial Image Sequences

YUJI ISHIKAWA,<sup>†</sup> ISAO MIYAGAWA,<sup>†</sup> KAORU WAKABAYASHI<sup>†</sup>  
and KENICHI ARAKAWA<sup>†</sup>

In this paper, we introduce an automatic structure reconstruction method and system for large-scale urban areas using aerial image sequences. The proposed method consists of two steps: (1) recover a 3D point set (*continuous point clouds*) seamlessly from each aerial image sequence; (2) recover a set of 3D building models with rooftop texture images, combining spatial data with line segments. For large-scale reconstruction, aerial image sequences are divided into a large number of subsequences in the recovery processes. Therefore operators are burdened with handling *configuration records*, which are input/output file names, parameters and so on. The proposed system has a component for configuration record management and a function to generate configuration record automatically. This function enables operators to reconstruct large-scale urban structures with simple operations on Web browsers. As an experiment, a single inexperienced operator reconstruct about 5 kilometer urban structures in 10 days, and those results illustrates that the possibility of reconstruction over 10 square kilometers from both standpoints of processing cost and operation complexity.

### 1. はじめに

現実の建物群を3次元化したモデルデータは、都市部の電波伝搬や災害時の被害をシミュレーションする際の基礎データとして利用されてきた<sup>1)</sup>。現在では都市計画やナビゲーションへ利用領域が拡大し、情報化社会の基盤データとして、その重要性が認識されている<sup>2)</sup>。

広域のモデル構築には上空からの情報獲得が有効であり、航空写真を利用した構築システムとしてはCC-MODELER<sup>3)</sup>、RADIUS<sup>4)</sup>などが提案されている。航空写真のステレオ視による対応点探索および形状抽出は依然として難しい問題であり、これらのシステムではオペレータの教示情報を必要とする。一方、レーザプロファイラによって獲得した密な標高データ(Digital Surface Model: DSM)から市街地の3次元形状を復元する手法も提案されている<sup>5)</sup>。画像に基づく方法では3次元座標の異常値を再投影誤差により除去できるが、DSMでは自動除去が難しく、また上面のテクスチャも獲得できない。その他の研究としてはDSMに地図情報と衛星画像を組み合わせる手法<sup>6)</sup>や

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所  
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation  
現在、株式会社 NTT データ技術開発本部  
Presently with Research and Development Headquarters, NTT DATA Corporation

Three Line Scanner により対応点探索を安定して行う手法<sup>7)</sup>などが提案されている。しかし、複数種類のデータや特殊機器の利用は構築コストの増大を招く恐れがある。

これに対し、近年の空撮システムの高機能化<sup>8)</sup>により、時空間分解能が高くシームレスな映像が容易に取得できる環境が整いつつある。同時に、放送コンテンツ取得や災害情報収集を目的として空撮システムは全国的に整備されており、地上波デジタル放送の普及とともに今後も発展が見込まれる。そのため空撮カメラから市街地の3次元モデル構築が可能になれば、その意義は大きい。

空撮映像を利用することによりオプティカルフローを適用して特徴点の対応点探索が可能になる。また、同一の特徴点を多数の画像フレームで観測することにより獲得精度を高めることができる。しかし、広域のモデル構築では飛行コースが長距離となるため多数の部分画像列に分割して処理を行う。そのため入出力データのファイル名や処理パラメータなどの情報(設定情報)は膨大になり、その管理は構築作業を行うオペレータにとって大きな負担となる。つまり自動構築システムを実現するうえで、設定情報の管理機構は各ステップの処理の自動化と同等の重要性を持っている。

市街地のモデルとしては都市の中心部をカバーするだけでも数平方キロメートルから数十平方キロメートルの規模が必要である。しかし、平方キロメートルの単位で構築実験を行って精度を定量的に評価している研究としては文献<sup>9)</sup>があげられる程度であり、処理時間やオペレータの作業負荷を含めた広域での多角的な評価はほとんど行われていないのが実情である。

本論文では空撮映像からの市街地モデル構築に関する構築方式を示すとともに構築システムを提案し、大規模な市街地構築実験による評価結果を示す。これまで筆者らは構築方式を構成するために必要な以下の基礎技術を提案している。

- (1) 空間連鎖復元法：空撮映像から空間的に連続な3次元座標値データ(3次元点列データ)を復元する<sup>10)</sup>。
- (2) 建物群復元法：3次元点列データから市街地の3次元形状モデル(建物群形状モデル)を復元する<sup>11)</sup>。

提案方式ではこれらの基礎技術を利用しており、オペレータの教示情報や地図データなどを利用せず、空撮映像のみから市街地空間モデル(建物群形状モデル)に上面テクスチャと地表面モデルを加えた3次元モデル)を構築することができる。

さらに本論文では設定情報を管理する機構を備えた

構築システムを提案する。提案システムではプロフィールと呼ぶデータ管理ファイルを利用して、データ処理単位ごとに設定情報を管理する。システムが提供するプロフィールの自動生成機能により、専門知識やスキルを持たない少人数のオペレータが、Webブラウザ上で簡易な設定作業を行うだけで広域の構築作業を可能にする。実験では約5平方キロメートルのモデル構築を行い、形状の復元精度、システムの処理時間、オペレータの作業量など多角的に評価を行い、空撮映像による広域な市街地空間モデル構築の実現可能性を示す。

## 2. 市街地空間モデルの構築方式とシステム

### 2.1 構築方式の概要

図1に従って市街地空間モデルの構築方式の概要を説明する。空撮では図1に示すように複数のコースに分けて撮影を行う。提案方式は以下の3段階の処理から構成される。

Step 1: 各コースの空撮映像から空間連鎖復元法<sup>10)</sup>により3次元点列データを復元し、標高によって建物上面部分と地表面部分に分離する。

Step 2: 建物上面部分に対して建物群復元法<sup>11)</sup>により、地上構造物の3次元形状を推定して建物群形状モデルを復元する。さらに、地上構造物の上面形状を画像フレームに投影して上面テクスチャを獲得する。

Step 3: 全コースの地表面部分の3次元点列データを1つのデータとしてまとめて平滑化処理を行い、地表面モデルを生成する。

最後に世界測地系<sup>12)</sup>に従ってテクスチャ付きの建物群形状モデルを地表面モデル上に配置して市街地空間モデルを構築する。以上の各ステップの処理ではオペレータによる教示情報を必要としないため自動実行が可能である。

### 2.2 空撮映像の分割とデータ管理

提案方式の処理フローを図2に示す。空撮映像ではフレームアウトせずに特徴点を追跡できるフレーム数が限られているため、部分的な画像列(画像系列)ごとに処理を行わなければならない。処理の詳細は次節で説明するが、Step 1では画像系列ごとに獲得した3次元情報を飛行コースごとに1つの3次元点列データに統合し、Step 2では画像系列ごとに取得した線分情報を3次元点列データと組み合わせて高精度に3次元形状を復元する。つまり、提案方式では飛行コース単位の情報と画像系列単位の情報を相互に参照しながら構築処理を進める。したがって、入出力データのファイル名や処理パラメータなどの情報(設定情報)

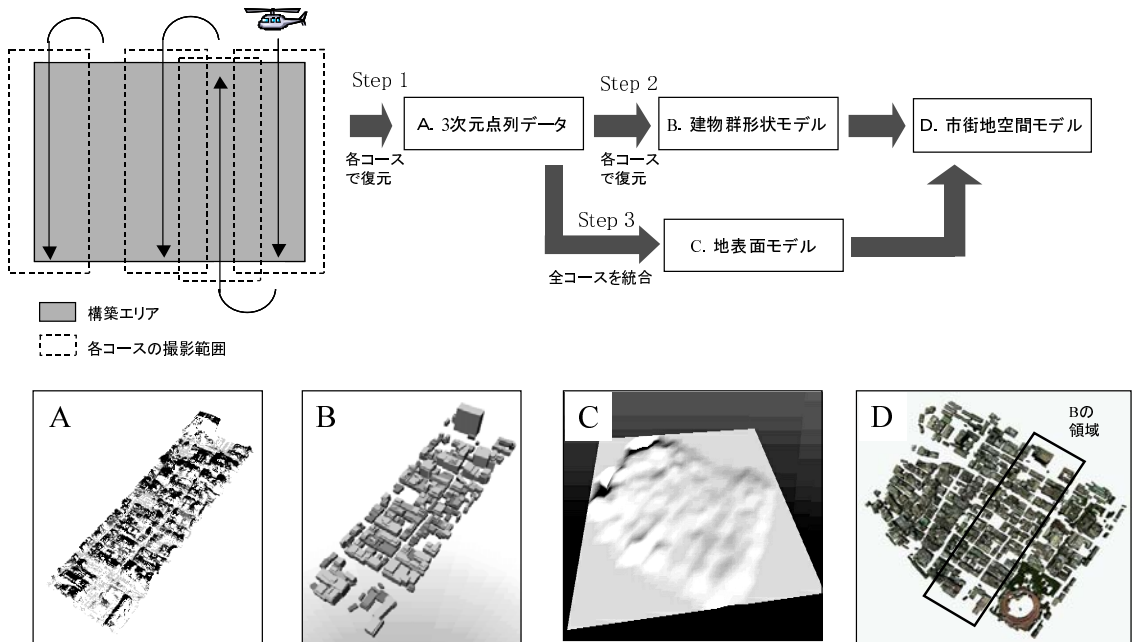


図 1 市街地空間モデル構築方式の概要  
Fig. 1 Outline of reconstruction process.

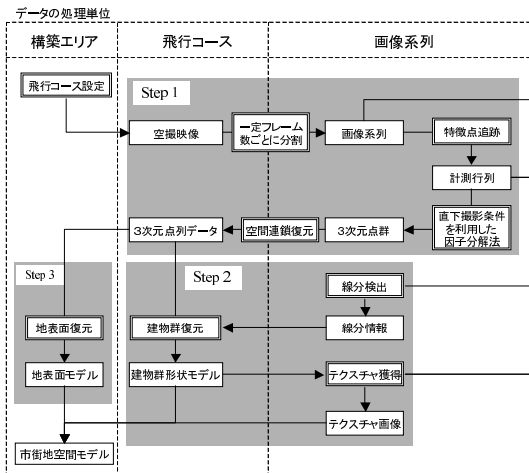


図 2 構築方式の処理フロー  
Fig. 2 Detailed flow of reconstruction process.

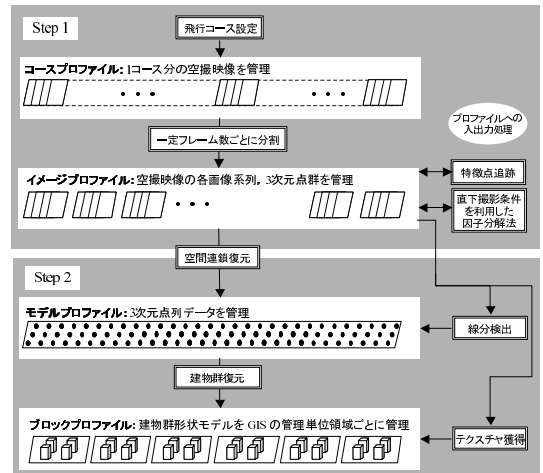


図 3 4 種のプロファイルのデータ管理対象  
Fig. 3 Relations of 4 kinds of profiles.

は処理の実行，処理結果の確認，異常時の対処などで随時必要となる．市街地空間モデルの構築では規模が大きくなるに従って飛行コースの距離が長くなり多数の画像系列に分割される．結果として設定情報は膨大な量になり，各処理が個々に自動化されていても，全体を通じて多大なオペレータ作業を必要としていた．

提案する構築システムでは提案方式のデータ処理単位に対応して設定情報を保存するファイル（プロファイル）により設定情報の管理を行う．プロファイルは

図 3 に示す 4 種類を用いる．Step 1 では飛行コース単位の情報と画像系列単位の情報を管理するためにそれぞれコースプロフィールとイメージプロフィールを用いる．また Step 2 では Step 1 と設定情報の共通項目が少ないため別のプロファイル（モデルプロフィール）によって設定情報を管理する．復元した建物群形状モデルは地理情報システム（Geographic Information Systems: GIS）の管理単位領域ごとに分割し，GIS が利用する設定情報をブロックプロフィールにまとめる．

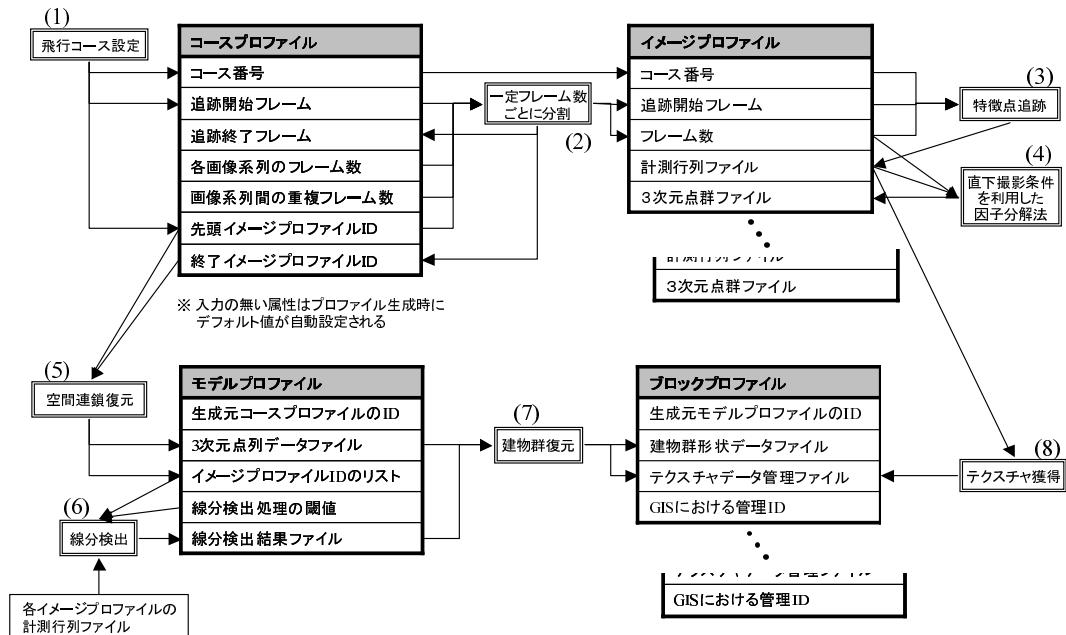


図4 プロファイルに基づく構築処理の流れ  
Fig. 4 Reconstruction process using profiles.

オペレータは最初にコースプロフィールのみを作成し、他の3つのプロフィールは処理過程で自動生成される。広域の構築作業ではイメージプロフィールやブロックプロフィールが多数生成されるが、それらにオペレータが直接アクセスする必要はなく、生成元となった少数のプロフィールだけで構築作業を実施し、設定情報を管理することができる。

### 2.3 プロファイルに基づく構築処理

本節では図4に従ってStep1, 2の詳細を説明する。なお、図4では処理フローの説明に必要な属性だけを示し、以下の説明では図中の処理と対応付けて括弧付き番号を記載する。

#### 2.3.1 3次元点列データの復元

(1) Step 1ではオペレータがコースプロフィールに空撮映像の処理対象範囲を設定する。(2) Step 1の処理を開始すると構築システムは画像系列への分割とイメージプロフィールの生成を自動的に行う。空撮は速度一定で行うため、各系列の画像枚数を一定とする。コースプロフィールには生成したイメージプロフィールの先頭IDおよび最終IDが設定される。構築システムは先頭IDから最終IDまでの各イメージプロフィールに対して以下に述べる処理を進める。各処理プログラムはイメージプロフィールから入力ファイル名や処理パラメータを得て、処理結果のファイル名を保存する。

(3) 空撮映像は高い解像度で地表面を撮影できるため、フレーム画像中に多数の特徴点を発生することで空間的に密度の高い特徴点群を得ることができる。各画像系列に対して特徴点を自動設定し、特徴点追跡を行う。(4) 得られた2次元座標点群(計測行列)から、直下安定の撮影条件を利用した透視投影型の因子分解法<sup>10)</sup>により3次元点群を獲得する。獲得時には移動物体(主に車両)上の特徴点や誤追跡された特徴点を除去し、位置精度の高い特徴点群を獲得する。計測行列および3次元点群は画像系列ごとにイメージプロフィールで管理する。

(5) 地上構造物の位置や大きさはコース上の画像系列の分割とは無関係であるため、3次元点群を空間連鎖復元法によって統合し、1コース分の3次元点列データとしてシームレスに復元する。大きな道路や河川がある場合にはオペレータの判断により3次元点列データを分割して復元する。モデルプロフィールは3次元点列データの復元時に自動生成され、復元に利用された画像系列を管理するイメージプロフィールIDのリストが保存される。

#### 2.3.2 建物群形状モデルの復元

3次元点列データのシームレスな復元によりStep 2では撮影領域を連続的な1つの建物群形状モデルとして復元することができる。建物群復元法では3次元点列データに含まれる同じ高さの3次元点をグルーピ

ングして建物上面を推定する。しかし、画像中の濃淡変化が少ない領域では特徴点が得られない(3次元点列データが復元できない)ため、同一面上の点集合が1つのグループに含まれずに分断されてしまう場合がある。この問題に対して筆者らは、高さが同じで同一線分上にある2点は同じ面に含まれるという規則を導入し、フレーム画像から得た線分情報を利用して3次元点列データの欠落領域を補完する手法を提案している<sup>13)</sup>。

(6) Step 2では最初にイメージプロファイルIDのリストに基づいて画像系列ごとに線分検出処理を行う。具体的には、各画像系列の中央フレームにおいて、3次元点列データに含まれる特徴点の間で画像上の線分の有無を確認する。(7)次に線分情報を利用して特徴点のグルーピングを行い、各グループから建物上面形状を生成し、柱状形状の集合として建物群形状モデルを復元する。復元時の設定情報はモデルプロファイルから取得する。(8)最後に各上面形状を画像フレームに投影してテクスチャ画像を獲得する。構築システムはGISでの管理に適したメッシュ単位領域に建物群形状モデルを分割してテクスチャ画像とともに格納する。同時に、単位領域ごとにブロックプロファイルを生成して形状データのファイル名などの管理情報を記録し、ブロックプロファイルのIDのリストを生成元のモデルプロファイルに登録する。

画像から得られる線分情報は3次元点列データの補完に限らず建物形状の復元精度向上に有用な情報である。レンジデータにおいても画像から抽出した線分と組み合わせる建物形状を復元する手法<sup>14)</sup>が提案されているが、線分の抽出精度と3次元点の位置精度が異なるため、線分と3次元点の関連付けを安定して行うことは難しい。提案方式では各特徴点の画像座標はイメージプロファイルで管理された計測行列から取得でき、高さの近い2点間において線分の有無を確認すればよいので、線分と3次元点の関連付けは比較的簡単な処理で安定した結果を得られる。また、建物上面のテクスチャ画像を獲得する場合にも、計測行列から上面形状の頂点となる特徴点の2次元座標を取得できるため、ずれのないテクスチャ画像を獲得できる。

#### 2.4 市街地空間モデル構築システム

本節ではシステム構成およびオペレータへのインタフェースについて説明する。提案する市街地空間モデル構築システムの構成を図5に示す。構築システムは

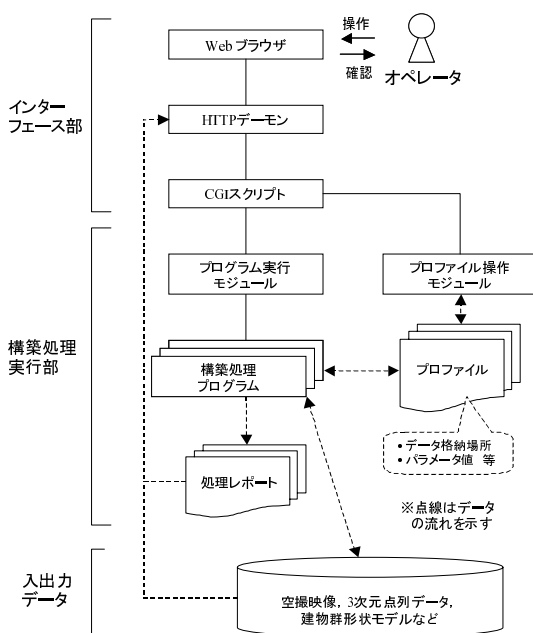


図5 構築システムのソフトウェア構成とデータフロー  
Fig. 5 Software components and data flow in the proposed system.

プロファイルと処理経過を出力するHTMLファイル(処理レポート)を生成する。これら2種類のファイルをWebインタフェースによってオペレータに参照可能とすることで、設定情報の管理および処理結果の確認における作業負担を軽減する。

プロファイル操作モジュールはプロファイルの生成・変更・閲覧・検索・削除の基本機能をオペレータに提供する。全種類のプロファイルにおいて基本機能の操作は共通化されている。プロファイル生成時にプロファイル操作モジュールが必要項目の生成とデフォルト値の設定を行うため、オペレータは最小限の設定作業でプログラムの実行が可能になる。プログラム実行モジュールはプロファイルの自動生成を行い、各構築処理プログラムを図2の処理フローに従って実行する。各プログラムはプロファイルから入力データやパラメータ値を取得し、処理終了後、出力データのファイル名を保存する。あるプログラムが設定した項目を別のプログラムが入力項目として使うことで、各プログラムは連携して処理を行う。

提案システムはボタン1つですべてができあがるという自動化システムではなく、オペレータが適切なタイミングで確認をしながら構築作業を進められるシステムを目的とする。そのため3次元点群の獲得終了時および3次元点列データの復元終了時にプログラム実行モジュールは構築処理を停止して、オペレータに

一般に呼ばれる線分抽出の処理と異なるため本論文では線分検出と呼んでいる。

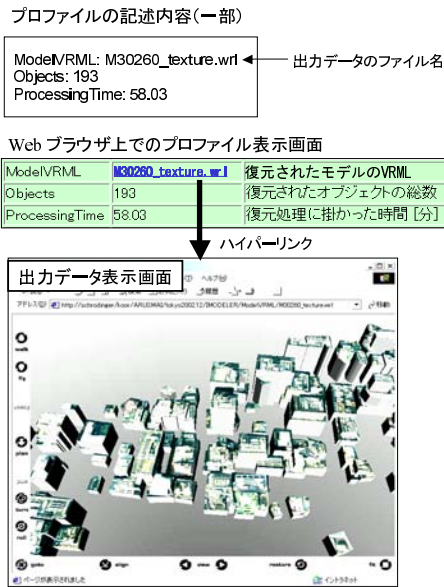


図 6 Web ブラウザ上でのプロフィール表示  
Fig. 6 Displaying profile on Web browser.

処理結果を確認する機会を与える。オペレータはプロフィール表示画面から処理結果を確認し、結果が悪い場合には設定情報を変更して処理を再実行する。プロフィール操作モジュールは Web ブラウザにプロフィールの内容を表示する際に、プロフィールの設定情報を使って入出力データのファイルを特定し、ファイル名表示部分にデータファイルへのハイパーリンクを付加する(図 6)。Web ブラウザはプラグインによって画像や 3 次元モデルを表示できるため、オペレータはデータ格納場所を意識することなく入力データ(空撮画像)および出力データ(3 次元点列データ, 建物群形状モデル)をすべて Web ブラウザ上で確認できる。

### 3. 市街地空間モデル構築実験

#### 3.1 実験概要

空撮ヘリコプタは高度 300 m, 速度 100 km/h を維持して直線飛行した。空撮カメラ(焦点距離 15.3 mm)は防振機能を持ったスタビライザを介して取り付けられており、直下安定の状態上空撮映像を取得した。空撮画像は 30 fps の HD 映像から得た  $1,920 \times 1,080$  画素の時系列画像であり、画像フレームごとにレンズ歪みを補正している。

空撮中の平均高度および平均速度からのずれは最大でも 10.34 m, 0.93 m/s であった。高度の変動によって生じる地上構造物の画像上の拡大/縮小は最大で 3.29% であり、また、1 つの画像系列の画像枚数を 80 枚とすると速度変化による撮影距離の伸縮は最大

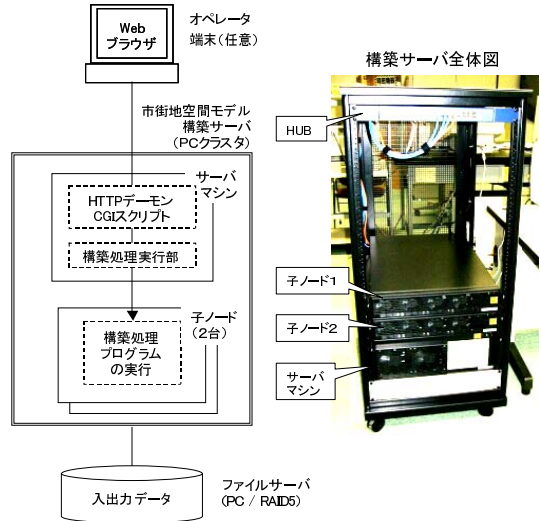


図 7 実験に用いた構築システムのハードウェア構成  
Fig. 7 Hardware components of the proposed system on our reconstruction experiments.

でも  $(0.93 \text{ [m/s]} * 80 \text{ 枚}/30 \text{ [fps]}) = 2.48 \text{ m}$  である。1 つの画像系列の撮影距離 130 m に対して撮影領域の変動はわずかであると見なし、各画像系列の画像枚数を一定 (80 枚) とした。

構築実験は 2 つの地区で合わせて約 5 平方キロメートルの地域を対象とした。2 地区の内訳は地区 A が約 1 平方キロメートル, 地区 B が約 4 平方キロメートルであり、それぞれ約 1,000 軒および約 4,000 軒の建物を含んでいる。飛行コースは地区 A で 9 コース, 地区 B で 18 コースを設定した。

図 7 に実験システムのハードウェア構成を示す。システムの拡張性, 低コスト化, 近年の CPU パフォーマンスの向上を考慮して, PC クラスタでシステムを構築した。図 5 のソフトウェア構成において, 構築処理プログラムの実行は計算機の負荷が高いため, 高性能な 2 台の子ノード (CPU: Pentium 4/2.8 GHz, メモリ: 1 GB, OS: Linux) に処理を振り分けて実行した。プロフィール操作モジュールや HTTP デーモンの処理はサーバマシン上で行い, オペレータへの迅速なレスポンスを確保した。一方で, オペレータは作業しやすい端末を任意に選択し, Web ブラウザを通じてシステムにアクセスした。システム構成は全体を 1 台の PC で実現することも可能であり, また, 子ノードの追加による拡張も容易である。

#### 3.2 建物群形状モデルの復元

##### 3.2.1 提案方式による復元結果

地区 A の 1 コース分 (25 秒間) の空撮映像に Step 1 の処理を適用し, 約  $850 \text{ m} \times 170 \text{ m}$  の領域を復元し

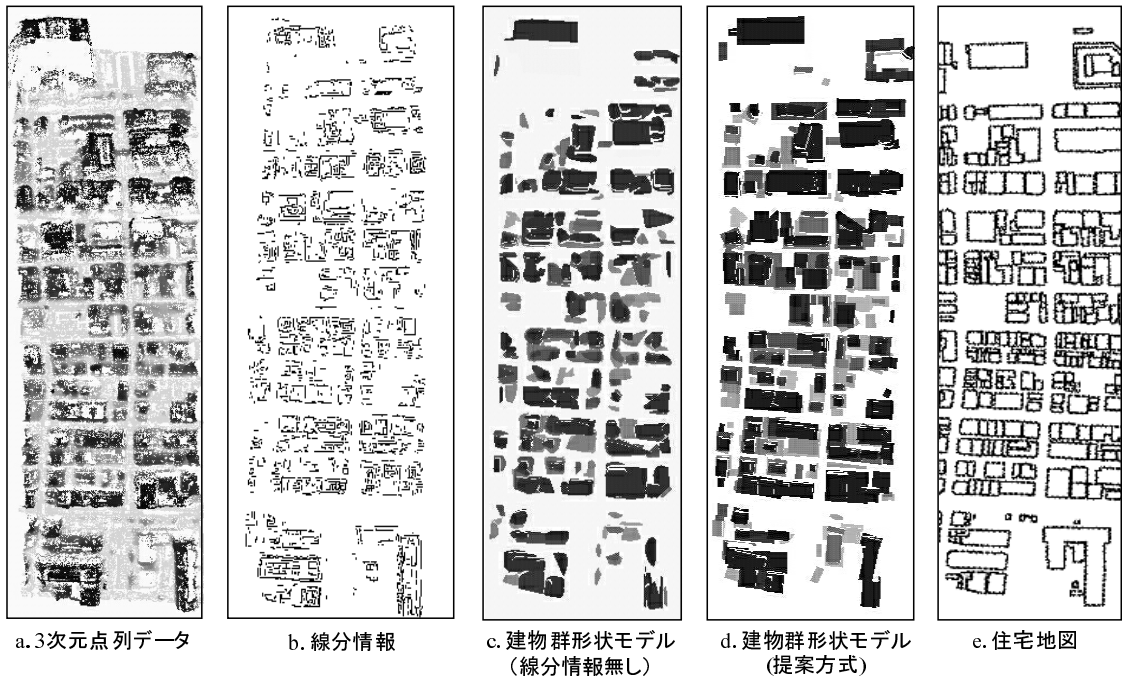


図 8 3次元点列データと建物群形状モデルの復元結果  
Fig. 8 Recovery results of continuous point clouds and building models.

た3次元点列データを図8aに示す<sup>10)</sup>。図では標高が高い特徴点を濃い色で表している。図8aの例では1つのコースプロフィールから18の画像系列およびイメージプロフィールが自動生成され、169,208点の3次元点列データを復元した。引き続きStep2の処理を行い建物群形状モデルを復元した。画像系列ごとの線分検出結果を連結して図8bに示す。線分情報を利用しない場合(図8c)では形状が部分的にしか復元できていないが、提案方式(図8d)では住宅地図との比較により建物形状を正しく復元できていることが分かる。また、画像系列間でずれが生じることなく連続的に建物群形状モデルが復元されており、縦横に伸びる街路を明確に確認できる。比較として空間連鎖復元を行わずに空撮ヘリコプタの測位情報から3次元点群を連結し、建物群形状モデルを復元する実験も行った。復元結果では街路の直線構造を確認できなくなり、標高方向のずれにより一部の地表面領域が建物として復元されてしまった。

続いて空間連鎖復元および線分情報利用の効果について定量的評価を行った。地区Aにおいて住宅地図が入手可能な約1,000m×850mのエリアに対し、図8のコースを含む6コース分の空撮映像を対象に同様の復元実験を行った。評価値としては、復元形状と住宅地図の建物平面形状面積 $S_m$ 、 $S_r$ およびそれらの重

表1 建物群形状モデルの適合率および再現率

Table 1 Recall and precision ratios for recovered building models.

	適合率 [%]	再現率 [%]
提案方式 ( $E_0$ )	52.08	87.02
連鎖復元なし ( $E_1$ )	45.29	82.79
線分情報なし ( $E_2$ )	58.11	73.43
$E_0 - E_1$	+6.79	+4.23
$E_0 - E_2$	-6.03	+13.59

複面積 $S_o$ を求め、適合率( $100 * \sum S_o / \sum S_m$ )と再現率( $100 * \sum S_o / \sum S_r$ )の2つを用いた。適合率は正解形状からはみ出しが少ないと高い値となり、再現率は正解形状に対して復元された面積の割合が大きいと高い値をとる。

連鎖復元前と連鎖復元後のそれぞれの3次元点列データから建物群形状モデルを復元し、適合率と再現率を算出した結果を表1に示す。全体的に適合率が低いのは樹木などの住宅地図にはない地上構造物が存在するためである。適合率、再現率ともに連鎖復元なしよりも提案方式のほうが高い値を示している。空間連鎖復元により正解形状からはみ出す復元領域が少なくなるため、特に適合率が改善されている。一方、線分情報を利用しない場合に対して提案方式の適合率が6%ほど低下した。これは図8cに示したように、線分情報を利用しない場合では部分的にしか復元されない

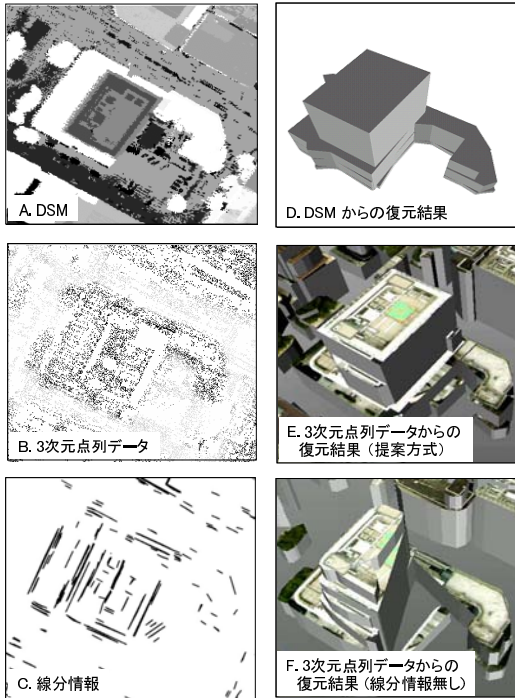


図9 DSM から復元したモデルとの比較

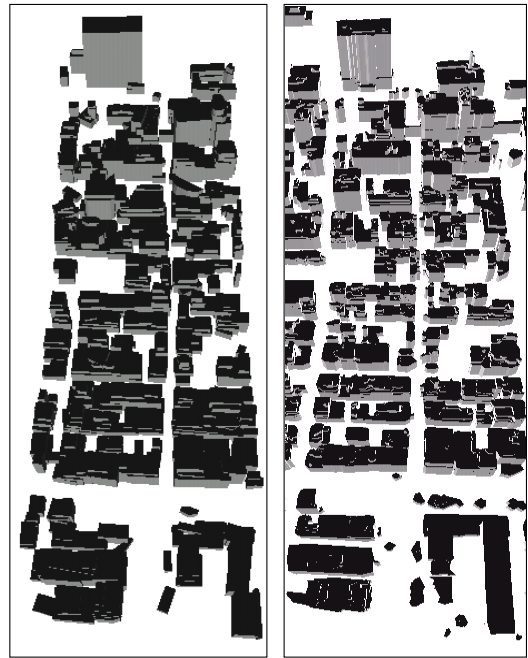
Fig. 9 Comparison with model recovered from range data.

ために正解形状からはみ出し領域が少ないためである。しかし、提案方式では正解形状の全体を復元できているために再現率は13%以上の向上を示し、87.2%の高い値を達成している。

3.2.2 DSM との比較

レーザプロファイラで獲得した標高データ (Digital Surface Model: DSM) および3次元点列データから形状復元を行った結果と提案方式の比較を図9および図10に示す。図9AのDSMは0.5m間隔で格子状に標高が計測されており、異常な標高値は事前に除去されている。3次元点列データ (図9B) はDSMと異なり特徴点の分布が画像のテクスチャに依存しているが、形状周辺部に特徴点が多いため建物の上面形状を認識できる。DSMからの復元結果 (図9D) と図9Eおよび図10の結果から、提案方式ではDSMと同程度の復元結果が得られていることが分かる。さらに提案方式では復元形状と整合性の高いテクスチャを形状情報と同時に獲得でき、形状のリアリティを高めている。参考に、線分情報を利用しない場合 (図9F) では形状を部分的にしか復元できておらず、線分情報を利用することでより正しい形状が得られることが理解できる。

さらに、3次元点列データとDSMのそれぞれから



3次元点列データからの復元結果

DSMからの復元結果

図10 DSM から復元したモデルとの比較 (飛行コース単位)

Fig. 10 Comparison with recovered model using range data over one flight course.

表2 DSMを正解データとした場合の適合率および再現率  
Table 2 Recall and precision ratios compared with DSM.

	適合率 [%]	再現率 [%]
提案方式 ( $F_0$ )	77.83	78.27
DSMからの復元結果 ( $F_1$ )	84.20	73.22
$F_0 - F_1$	-6.37	+5.05

復元した形状モデルに対し、DSMを正解データとして3次元形状品質の定量的な評価を行った。DSMの各計測点を0.5m×0.5mの上面を持つ角柱と見なし、復元形状とこの角柱の体積  $V_m$ ,  $V_r$  およびそれらの重複部分の体積  $V_o$  を求め、3次元形状に対する適合率 ( $100 * \Sigma V_o / \Sigma V_m$ ) と再現率 ( $100 * \Sigma V_o / \Sigma V_r$ ) を算出した (表2)。

DSMには地上の3次元構造物がすべて計測されているため、住宅地図と比較した場合 (表1) と異なり、適合率も高い値を示している。DSMからの復元結果に対し、提案方式では適合率において6%程度の低下が見られるが、再現率では逆に5%向上している。図10から分かるように、本提案方式のモデルが、DSMからのモデルに比べてやや大きめなモデルが生成されたためこのような結果になったと考えられる。



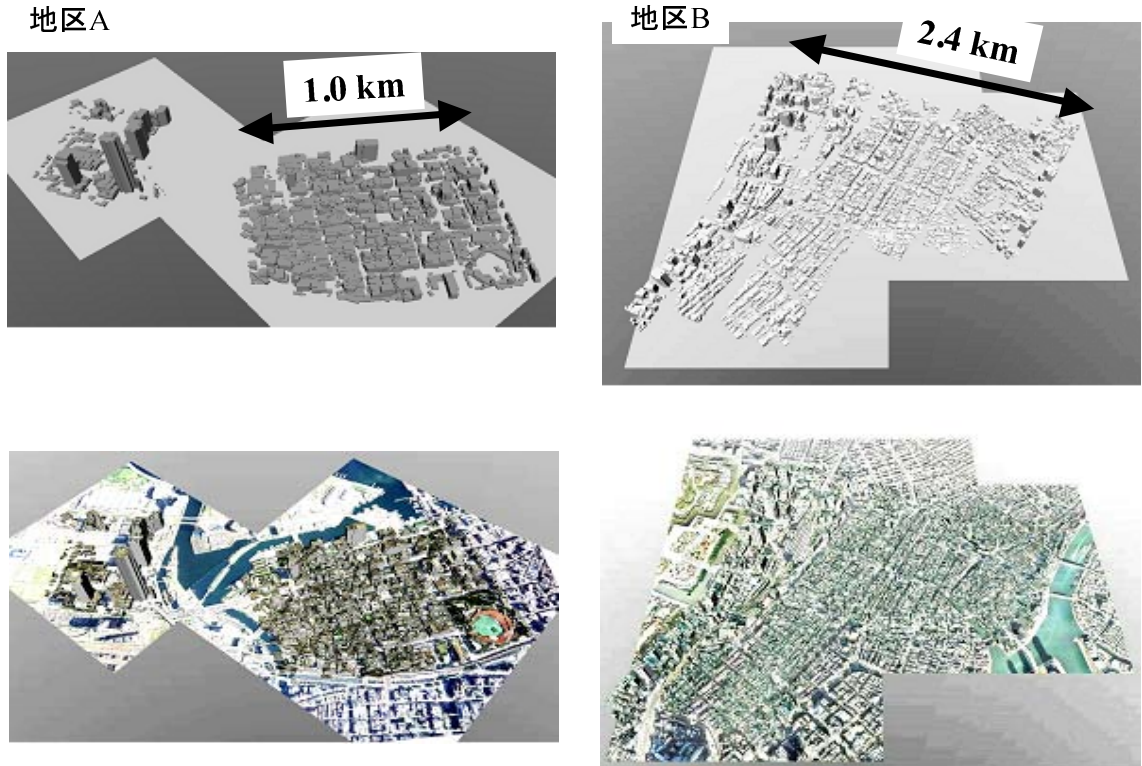


図 11 市街地空間モデル構築結果（上段：テクスチャなし，下段：テクスチャあり）

Fig. 11 Reconstruction results in wide urban areas.

### 3.3 市街地空間モデルの構築結果

地区 A, B において構築した全域の市街地空間モデルを図 11 に示す。構築結果では個々の建物形状が復元されているだけでなく、それらが一体の建物群形状モデルを形成しているため、街路などの線状構造、高層ビル街、低層ビル密集地帯などが明確に確認できる。ここにテクスチャをマッピングすることで市街地の 3 次元景観を再現できていることが分かる。地表面モデルのテクスチャには航空写真を用いた。復元した建物群形状モデルと地表面のテクスチャはよく整合しており、モデル全体に歪みが生じていないことを確認した。なお、航空写真を使わずに空撮映像からオルソモザイクを生成して利用することも可能である<sup>15)</sup>。

各地区の構築処理において生成されたデータおよび処理時間を表 3 にまとめた。処理時間については、2 地区合計で約 5 平方キロメートルの市街地空間モデルを 10 日で構築できた。構築処理は Step 1 では飛行コースごと、Step 2 では 3 次元点列データごとに独立しているため、オペレータは他の領域の処理が終了するのを待たずに処理を開始できた。そのため、つねに子ノード 2 台をほぼ 100%稼働させた状態で構築処

表 3 生成されたデータと処理時間

Table 3 The amount of data and processing time on reconstruction process.

地区名	A	B	合計
構築面積	約 1 km <sup>2</sup>	約 4 km <sup>2</sup>	約 5 km <sup>2</sup>
コース数	9	18	27
3 次元点列データの点数	1,196,038	7,037,858	8,233,896
オブジェクト数	2,127	11,095	13,222
	56.5	181	237.5
処理時間 [時間]	(2 日と 8.5 時間)	(7 日と 13 時間)	(9 日と 21.5 時間)

理を進めることが可能であった。

### 3.4 オペレータの作業

構築処理で利用された設定情報の量はプロフィール数とプロフィールの設定項目数によって示すことができる。各プロフィールは設定項目が定義付けされており、その項目数は固定である。2 つの地区の構築実験で使われたプロフィール項目数を表 4 に示す。今回の実験ではコースプロフィールにおいて処理開始および終了の画像フレームだけが必須の入力項目であり、他の項目は自動設定された。2.3 節で述べたプロファ

表 4 構築処理で利用された設定情報

Table 4 The amount of configuration record on reconstruction process.

	ファイル数	項目数	総項目数
コースプロファイル	33	25	825
イメージプロファイル	952	34	32,368
モデルプロファイル	61	39	2,379
ブロックプロファイル	160	7	1,120

表 5 オペレータの作業時間

Table 5 Summary of manual operation time.

Step	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	合計
回数 (N)	33	102	33	61	8	229
作業時間 [分]						
1 回分 (T)	5	3	2	3	2	15
N × T	165	306	66	183	16	736

イルの自動生成機能により、イメージプロファイルはコースプロファイルに対して約 30 倍の 1,000 個近い数が生成された。なお、コースプロファイルよりもモデルプロファイルの数が多いのは大きな道路や河川で 3 次元点列データを分割して建物群形状モデルを復元したためである。

構築作業は、PC の利用経験はあるが画像処理やコンピュータビジョンの専門知識を持たないオペレータ 1 名によって実施した。Step 1 と Step 2 の作業を以下の項目に分割して作業時間の見積りをを行った。なお各作業の詳細は文献 16) に譲る。

- Step 1-1: 特徴点追跡処理の実行
- Step 1-2: 3 次元点群の獲得処理の実行
- Step 1-3: 空間連鎖復元処理の実行
- Step 2-1: 建物群復元処理の実行
- Step 2-2: 復元結果の確認と再実行

本システムでは作業時間よりも処理時間の方が圧倒的に長いので、オペレータは 1 時間程度の説明後すぐに Step 1-1 を実施し、処理実行中に他の作業の説明を受けることができた。他の作業項目に対してはそれぞれ 30 分程度の説明を行った。

2 地区合計の作業時間を表 5 にまとめた。総作業時間は 736 分 (約 12 時間) となり、1 日平均では 1 時間 14 分であった。Step 1-2 以外の作業はコースプロファイルもしくはモデルプロファイルに設定情報を入力して実行ボタンを押すだけの作業であり、約 10 日間の処理時間と比較してわずかな回数で済んでいる。Step 1-2 の処理結果では画像系列に交通量の多い道路や裸地が含まれると、自動設定された処理パラメータでは獲得精度が不十分な場合があった。これに対し実験システムでは獲得処理終了時の処理レポート表示



図 12 3 次元点群の獲得処理終了時の結果一覧表示

Fig. 12 Result list after acquisition process of 3D point sets.

画面において獲得精度の確認，設定の変更，処理の再実行を画面上で可能にした (図 12)。その結果，Step 1-2 の作業回数は増加したが全体の作業時間は抑えることができた。

#### 4. 考 察

##### 4.1 構築方式について

図 8 および表 1 の結果から、提案方式は空間連鎖復元および線分情報の利用によって建物群形状モデル全体の復元精度を向上させており、住宅地図との比較から、市街地景観の再現に十分な建物群形状モデルを復元することができた。図 9 の例では中央部に画素値が一樣で特徴点を取得できない領域があったが、線分情報を利用することにより建物上面の特徴点が 1 つのグループとして認識されて DSM を利用した場合と同等の復元結果を得ることができた。また、表 2 の 3 次元形状に対する定量的な評価結果に関しても、一般に適合率と再現率はトレードオフの関係にあるため、適合率の低下分と再現率の向上分がほぼ同じであることから、提案方式は総合的に DSM からの復元結果と同程度の品質の 3 次元形状モデルを復元できるといえる。図 10 の結果と合わせ、3 次元点列データと線分情報を組み合わせて利用することにより、空撮映像から DSM と遜色のない建物群形状モデルの復元が可能であると考えられる。

次にコース間の接続について考察する。提案方式では 3 次元点列データおよび建物群形状モデルを世界測地系上に配置することで飛行コースごとのデータを接続している。図 11 の構築結果により大局的には高い整合性を持っていることを確認できた。しかし、空撮ヘリコプタの測位誤差により飛行コース間でずれが生じる場合もあった。対策として、全コースの 3 次元点列データを ICP<sup>17)</sup> などの手法によってシームレスに連結した後、道路や河川などの線状構造物で分割することが考えられる。しかし、そのような構造を見つけ

るには一度は建物群形状モデルの復元が必要となる。処理上の観点では、Step 1 から Step 2 の処理が飛行コース間で独立していれば並列実行が可能であり、PC クラスタを利用したシステムにおいて構築時間を短縮できる。つまり飛行コースごとの復元はデータ管理の容易性から見て現実的な選択であり、ヘリコプタ測位とカメラ位置のキャリブレーション精度向上によって飛行コース間のずれを解消することが望ましい。

#### 4.2 構築システムについて

5 平方キロメートルで 10 日間という構築時間は、平常の市街地建物群の変化速度を考慮すれば、コンテンツ生成に対する時間的制約は緩く、方式やシステムの実現性に問題はないと考える。しかし、都市部全域を構築したい場合や災害時の被害把握などではシステムの構築性能に対する要求が高くなる。これに対し、(1) 今回の実験システムは PC クラスタとして最小の構成であり、子ノードの追加によってシステムの処理能力を容易に拡大できる、(2) 提案方式はコース単位で独立に作業および処理を行うことができる、(3) 現状のオペレータの作業量は 1 日約 1 時間であり、まだ十分な余裕がある。以上の 3 点から、本論文で提案した構築方式および構築システムにより、数十平方キロメートル規模の市街地空間モデルが実用的な時間内で構築可能であるといえる。

次に表 4 に示した設定情報の量について考察を行う。設定情報は人的管理が不可能な量であり、プロファイルによる設定情報の管理機構およびプロファイルの自動生成機能がなければ構築処理はしばしば中断せざるをえなかったと考える。たとえば、設定情報の確認に時間がかかり処理の開始が遅れる、設定を間違えることで構築済みの領域を破壊する、など構築時間に大きな影響を与える事態の発生が予想される。また実験では本システムの特徴として、作業量低減という面の他にオペレータの作業環境改善という面も明らかになった。提案システムでは図 5 の処理レポートによって処理経過を常時確認でき、かつ、すべての作業を Web 画面上で実施できる。Web ブラウザの起動・終了はシステムの処理に影響がなく、Web ブラウザが動作する任意の端末からプロファイルにアクセスできる。そのため、オペレータは 1 つの端末の前で待機する必要がなく、作業の時間と場所を自由に選択できた。

最後に他システムとの比較として、代表的な半自動構築システムである CC-Modeler<sup>3)</sup> では 1 名の熟練オペレータが 1 日に 500 オブジェクトを作成可能である。これに対し、本システムはそれまで作業経験のなかったオペレータが 1 日約 1 時間の作業で 2.6 倍の

構築性能を達成しており、ハードウェア性能の改善によりさらに性能を向上させることができる。ただし、CC-Modeler ではオペレータの教示情報によって自動処理を行う本システムよりも品質の高い形状モデルを復元しており、利用されるアプリケーションやコストによってシステムを選択すべきである。

#### 5. おわりに

本論文では、空撮映像から市街地空間モデルを自動構築する方式およびシステムを提案した。提案方式では、シームレスな 3 次元点列データを線分情報と組み合わせることにより、DSM から復元した場合と同等の、市街地景観の再現に十分な建物群形状モデルを復元することができた。構築システムはデータの処理単位ごとに 4 種類のプロファイルによって設定情報を管理し、プロファイルの自動生成機能により簡易な設定操作および少ない作業量で広域の構築作業を可能にした。実験では作業経験のない 1 名のオペレータによって、PC2 台 10 日間の処理で約 5 平方キロメートルの市街地空間モデルを構築し、処理コストおよびオペレータ作業量の両面において、数十平方キロメートル規模の構築が可能であるとの見通しを得た。

これまで空撮システムの普及および発展が図られていながら、空撮映像は単なる状況確認や放送用のコンテンツとしてしか利用されていなかった。本システムにより既存の空撮システムを市街地の 3 次元モデル構築手段として利用することができ、本研究の重要性は大きいと考える。市街地空間モデルの 3 次元コンテンツとしての利用を考えるとテクスチャをはじめとする建物側面情報のニーズが高く、地上からの市街地情報獲得システムも多数提案されている<sup>18)</sup>。今後は広域のモデル構築が可能な上空系アプローチの長所を活かしながら地上系システムとの連携を検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 室 啓朗, 伊藤永一, 岩村一昭: 立体都市データを用いた空間シミュレーション方式とその火災延焼予測への適用, 情報処理学会研究報告, 97-MPS-16, Vol.97, No.113, pp.1-6 (1997).
- 2) 総務省: 「GIS 構築のための情報通信技術の研究開発」報告書 (2003). <http://www.3dgis.jp>
- 3) Gruen, A. and Wang, X.: CC-MODELER: A Topology Generator for 3-D City Models, *ISPRS Journal*, Vol.53, No.5, pp.286-295 (1999).
- 4) Heller, A., Fua, P. and Connolly, C.: The Site-Model Construction Component of the RA-

- DIUS Testbed System, *Proc. ARPA*, pp.345–356 (1996).
- 5) Alharthy, A. and Bethel, J.: Heuristic Filtering and 3D Feature Extraction from Lidar Data, *IAPRS*, Vol.XXXIV, No.3A, pp.29–34, ISPRS (2002).
- 6) Takase, Y., Sho, N., Sone, A. and Shimiya, K.: Automatic Generation of 3D City Models and Related Applications, *Proc. International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models*, ISPRS (2003). <http://www.mapcube.jp/>
- 7) Grun, A. and Zhang, L.: Automatic DTM Generation from Three-Line-Scanner (TLS) Images, *Proc. Photogrammetric Computer Vision*, Vol.A, pp.131–137, ISPRS (2002).
- 8) 空中ハイビジョン映像計測システム：AHVS. [http://www.aeroasahi.co.jp/spatial/geographic/b9\\_1.html](http://www.aeroasahi.co.jp/spatial/geographic/b9_1.html)
- 9) Shufelt, A.J.: Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction From Aerial Imagery, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.4, pp.311–326 (1999).
- 10) 宮川 勲, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 空撮映像からの透視投影型因子分解法による空間連鎖復元, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-D-II, No.4, pp.942–957 (2004).
- 11) 石川裕治, 宮川 勲, 若林佳織, 有川知彦: MDL原理に基づく3次元点集合からの建物モデル復元, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, No.SIG 9 (CVIM7), pp.64–74 (2003).
- 12) 国土地理院：日本の測地座標系. <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/datum/>
- 13) 石川裕治, 宮川 勲, 若林佳織, 有川知彦: 線分制約を取り入れた3次元点集合からの建物モデル復元手法, 情報処理学会第65回全国大会講演論文集, Vol.2, No.3G-1, pp.61–62 (2003).
- 14) Stamos, I. and Allen, K.P.: 3-D Model Construction Using Range and Image Data, *Proc. CVPR 2000*, Vol.1, pp.531–536, IEEE (2000).
- 15) Zhu, Z., Riseman, E.M. and Hanson, A.R.: Parallel-Perspective Stereo Mosaics, *Proc. 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.345–352 (2001).
- 16) 石川裕治, 宮川 勲, 若林佳織, 荒川賢一: 少人数・非熟練オペレータによる広域な市街地空間モデルの自動構築システム, 情報処理学会研究報告, No.2004-CVIM-142 (2004).
- 17) Besl, P. and McKay, N.: A method of registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239–256 (1992).

- 18) 情報処理学会：テーマ「街を観る(2)街のモデル化と視覚化」, 情報処理学会研究報告, No.2004-CVIM-142 (2004).

(平成16年3月1日受付)

(平成16年9月11日採録)

(担当編集委員 池内 克史)



石川 裕治 (正会員)

平成8年東京工業大学大学院理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。同年NTTデータ通信(株)〔現(株)NTTデータ〕入社。放送型データ通信方式の研究に従事。平成12年5月から平成16年1月まで日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所に勤務し、市街地構造物の形状復元、ならびに、市街地景観の空間モデリングに関する研究開発に従事。現在(株)NTTデータ技術開発本部に勤務。



宮川 勲 (正会員)

平成3年福井大学工学部電子工学科卒業。同年日本電信電話(株)入社。以来、カラーファクシミリにおける複合符号化と入出力色信号処理の研究、ならびに、ファクシミリ機器の開発を経て、コンピュータビジョンに関する研究開発に従事。現在、日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト研究主任。平成14年10月より福井大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。電子情報通信学会会員。



若林 佳織 (正会員)

昭和57年電気通信大学電気通信学部応用電子学科卒業。同年日本電信電話公社〔現日本電信電話(株)〕に入社。以来、ファクシミリ通信網の研究実用化、2値画像変換処理、地図情報処理、認知地図の理解、3次元景観情報獲得・復元等の研究に従事。現在、日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト主任研究員。工学博士(東京大学)。電子情報通信学会、地図情報システム学会各会員。



荒川 賢一（正会員）

昭和61年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話（株）入社。同社基礎研究所，ヒューマンインタフェース研究所，第三部門を経て，平成14年2月より日本電信電話（株）NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト主幹研究員。その間，平成2年3月より平成4年3月まで，CMU 計算機科学部客員研究員。画像処理，コンピュータビジョン，空間情報処理に関する研究開発に従事。電子情報通信学会，日本ロボット学会，AVIRG，IEEE 各会員。

---