

## 時空間距離画像を利用した自己位置推定による 効率的な広域空間モデルの構築

小野晋太郎<sup>†</sup> 川崎 洋<sup>††</sup> 影沢 政隆<sup>†</sup> 池内 克史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 池内研究室 Ee-405

<sup>††</sup> 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255 二十一世紀機構棟

E-mail: †{onoshin,kagesawa,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp, ††kawasaki@mm.ics.saitama-u.ac.jp

あらまし 新しい概念である時空間距離画像を提案し、これを利用して効率的に都市空間の三次元モデルを構築する手法を提案する。垂直および水平方向のラインスキャンを行うレーザレンジセンサを計測車両に積載し、走行しながらデータを取得する。垂直方向のデータからはシーンの三次元形状自身を取得し、水平方向のデータからは、車両の自己位置を取得する。水平方向のデータを時間軸に沿って積層すると、対象シーンの断面空間的特性と時間的連続性を同時に表現した時空間距離画像が得られる。これを解析することにより、計測車両の速度および自己位置を GPS などの外部装置によらず得ることができる。この情報を利用して、垂直方向のレンジデータを正しい位置に合わせることもできる。

キーワード EPI, レーザレンジセンサ, 自己位置推定

## Efficient Construction of Extensive Area Model by Self Position Estimation using Spatio-Temporal Range Image

Shintaro ONO<sup>†</sup>, Hiroshi KAWASAKI<sup>††</sup>, Masataka KAGESAWA<sup>†</sup>, and Katsushi IKEUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Ee-405 Ikeuchi Lab., IIS, Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

<sup>††</sup> Faculty of Engineering, Saitama University 255 Shimo-Ohkubo, Saitama-shi, 338-8570 Japan

E-mail: †{onoshin,kagesawa,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp, ††kawasaki@mm.ics.saitama-u.ac.jp

**Abstract** This paper proposes an efficient way to get correct 3D geometric model of urban scene through a novel notion of Spatio-Temporal Range Image. We mount a vertical and a horizontal line-scanning laser range finders on our vehicle. The vertical one is for acquiring the scene geometry itself, and the horizontal one is for acquiring the self-position of the vehicle. Laminating horizontal-scanning data along time axis, we can follow temporal continuity of cross section of the scene geometry. Analyzing this range image, we can estimate the velocity or the self-position of the vehicle without any external devices as GPS. With this information, we can align the position of the vertical scanning lines.

**Key words** EPI, Laser range sensor, Self-positioning

### 1. ま え が き

仮想空間内に広域空間の三次元モデルを構築することは、CV, CG, VR, MR など多くの領域において興味深い研究対象となっている。特に都市空間のモデルは、都市計画、防災、ITS など様々な分野への応用が期待されている。

このような広域のシーンは、オクルージョンや解像度の問題から単一のセンサで一度にその形状やテクスチャを取得することは難しい。これに対する一般的な解決法の一つとして [3] の

ように定点からの計測と移動を繰り返して計測後にデータを統合する方法がある。この方式では得られるデータは比較的密で正確であるが、広域にわたる対象を計測する場合は長い時間を必要とする。

この欠点を克服する有力な方式として、センサを車両 [5]、ヘリコプタ [6]、飛行機 [7] などの移動体に搭載して連続的に計測を行う方法がある。この方式は効率的で広大な環境を計測するのに適しているが、移動体の速度や自己位置を何らかの手法によって取得する必要がある。

自己位置を得るための最も一般的な解法は [4] のように GPS や INS などの装置を用いることである。これは非常に簡単であるが、位置の精度は場の状況、特に GPS 電波の受信状況に大きく依存している。都市の地上レベルでは建造物や高速道路の高架による遮蔽の影響から、その精度は充分ではない。

その他の解法として、Frueh らによるラインスキャンを行うレーザレンジセンサを計測車両に搭載して水平方向にスキャンを繰り返し、1 フレーム毎にスキャン結果のマッチングを行って計測車両の挙動を算出する方法 [8] がある。Frueh らはこの手法を利用してテクスチャ付きの三次元都市空間モデルの構築を行っている [9], [10]。

我々は 大まかな位置取得には外部装置を用いる方法が、精細な位置取得には Frueh らの考え方が有力であると考えている。すなわち、GPS などのデータはセンサの初期位置として利用し、精細な位置取得は搭載したレンジセンサのデータを幾何学的に処理して得る。具体的には [8] と同様に水平方向にスキャンを繰り返すラインレーザレンジセンサを用いる [8] と異なるのは、1 フレーム毎にマッチングを行うのではなく、フレーム毎の時間的連続性を考慮した処理を行う点である。我々は、既存の動画画像解析手法であるエピポーラ平面画像 (EPI) から、対象の空間的特性と時間的連続性を同時に表現することができる時空間距離画像を提案し、これを利用してセンサの自己位置を推定する。

この推定手段は、位置が直接に得られる GPS、加速度を 2 回積分して得られる INS に対して、車輪パルスセンサと同様に速度を 1 回積分して位置を得る手段の一種である。しかし、車輪パルスセンサはタイヤ径の仮定値と真値の差に比例して誤差が累積する。本手法は対象の相対移動を自己位置の変化として直接に利用するため、このような誤差は発生しない。同様な考え方を利用した推定手段としては対地速度計があり、これは前述の [8] に近い。本手法はさらに、時間的な連続性から誤差の影響をできるだけ小さくしようとしたものである。

## 2. 時空間距離画像

新しい概念である時空間距離画像を提案する。これは、エピポーラ平面画像 (EPI) から派生したものである。ここではまず EPI について説明し、後に時空間距離画像について述べる。

### 2.1 エピポーラ平面画像 (EPI)

EPI 解析は、動画画像から対象の幾何形状を復元する古典的手法として知られている [1], [2]。EPI は、高さ 1 ピクセルのラインカメラ映像をフレーム毎に並べることで (あるいは、通常の二次元のカメラ映像をフレーム毎に奥方向に並べ、その水平切断面として) 得られる。

図 1 のようにカメラが水平方向に移動すると、EPI の各フレームにおいて、同じ実空間上の点は連続したエッジを描く。この画像にはさまざまな傾きを持ったエッジが含まれている。この傾き差はカメラが移動して生じた視差によるものである。図 2 は、カメラが地点  $C_1$  から  $C_2$  に移動した際に生じる視差を表したものである。

これより、対象  $P$  の奥行き  $D$  と視差  $\Delta u$  は、カメラの移動

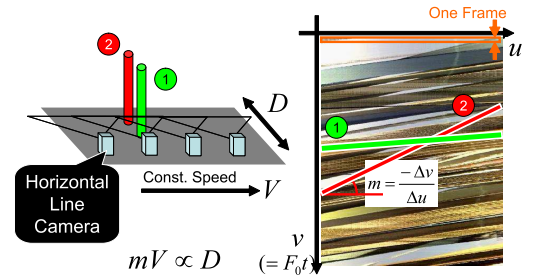


図 1 エピポーラ平面画像 (EPI)

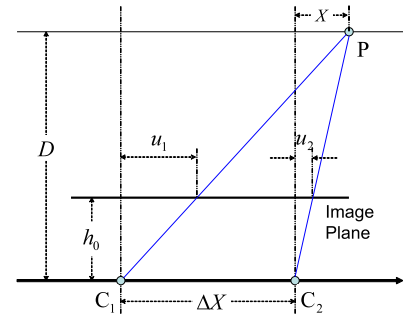


図 2 ラテラルモーション

距離  $\Delta X$  と以下のように関係づけられる。

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \frac{hX}{D} - \frac{h(\Delta X + X)}{D} = -\frac{h}{D}\Delta X \quad (1)$$

また、エッジの傾き  $m$  は、そのエッジを描いた点の奥行き  $D$  と以下のように関係付けられる。

$$m = \frac{-\Delta v}{\Delta u} = \frac{-F\Delta t}{-\frac{h}{D}\Delta X} = \frac{F}{hV} \cdot D \quad (2)$$

ここで  $V$  はカメラの移動速度、 $F$  はカメラのフレームレートである。この式により、 $D$  は  $m$  から推定することができる。すなわち、カメラ映像から対象空間の幾何形状をある程度復元することが可能である。

エッジの検出は通常、画像の二値化と、画像中の直線検出手法であるハフ変換によって行われる。このため EPI 解析ではエッジが直線、すなわちカメラが等速直線運動をすることが仮定されていることが多い。

### 2.2 時空間距離画像

ここでは、新しい概念として時空間距離画像を提案し、その特徴や利用法、位置付けについて述べる。

#### 2.2.1 定義と特徴

時空間距離画像は EPI においてラインカメラの代わりにラインスキャンレーザレンジセンサを用いて得られる距離画像である (図 3)。対象の空間的特性と、移動しながら計測したことによる時間的な連続性が同時に表現されるのが特徴である。この距離画像ではエッジの傾き  $m$  がそのままセンサの動きを表す。

$$m = \frac{-\Delta y}{\Delta x} = \frac{-kF\Delta t}{-\Delta X} = \frac{kf}{V} \quad (3)$$

ここで  $V, \Delta X, F$  はそれぞれセンサの移動速度、移動量、スキャン周波数、 $k$  はスキャンラインを並べる間隔である。

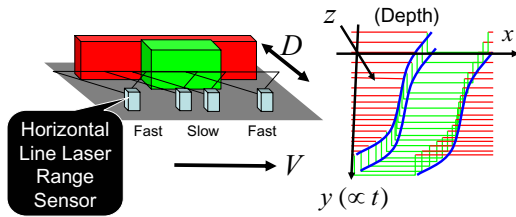


図 3 時空間距離画像

表 1 EPI と時空間距離画像

	EPI	時空間距離画像
(a) 計測デバイス	カメラ	レンジセンサ
(b) 奥行き情報	未知	既知
(c) 奥行きとエッジの傾き	依存	無関係
(d) 画像内の点の並び	一様 (格子状)	非一様 (クラスタを形成)

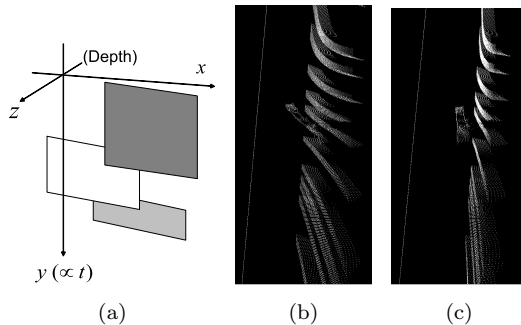


図 4 時空間距離画像中の各点が形成するクラスタ面。(b)(c)は図 6 (a)を右側から見たもの。

また、表 1 のように EPI と比較してさまざまな特徴がある。(b) はレンジセンサの本質的な特性によるもの、(c) はレンジセンサがカメラのように投影面を持たないことによるものである。(d) は、濃淡画像である EPI では画像の構成単位が格子状に並んでいるが、時空間距離画像の各点はそうではないことを意味する<sup>(注1)</sup>。但し、それらの点は図 4 のようにクラスタ面を形成する。これは (b) に加え、レンジセンサの移動毎に対象がオーバーラップして計測されるためである。

### 2.2.2 解析と利用

EPI において未知の量は各点の奥行き値であり、これは式 2 によって画像中のエッジ傾きとカメラの移動速度から推定することができる。濃淡画像では直線以外のエッジを安定に抽出することは難しいため、通常はカメラを等速直線移動させる。

一方、時空間距離画像では各点の奥行き値は既知である。画像中のエッジ傾きと奥行きは無関係であるが、センサ移動速度  $V$  とは式 3 の関係がある。そこで、逆にエッジ傾きからセンサの移動速度を未知数として推定することが考えられる。時空間距離画像では内部の点群がクラスタ面を形成するため、これらの面を幾何的に分離することは難しくなく、そのエッジは直線でも検出することは容易である。すなわち一定値ではなく、速度の時間変化を推定することができる。また、対象との距離が時空間距離画像から得られるため、センサの移動経路も

(注1): この意味で厳密な距離画像とは異なる。

直線に限らず曲線であっても推定することができる。このように、時空間距離画像を解析することによってレンジセンサを自己位置推定に利用することができる。次章では具体的な手法を説明する。

### 2.2.3 位置づけ

ここで、時空間距離画像の位置付けは表 2 のように考えることができる。2 枚の濃淡画像 (エリア画像) から対応点探索により対象の三次元形状を復元するのはステレオマッチングである。これを水平ライン画像として時間順に並べると EPI となり、時間的連続性を考慮しつつ対応点を探索できる。一方、2 枚の距離画像 (エリア画像) から対応点探索により距離画像 (を出力したレンジセンサ) どうしの位置関係を取得するのはアライメントである。これを水平ライン画像として時間軸を付加すると時空間距離画像となり、時間的連続性を考慮しつつ自己位置を推定できる。

表 2 時空間距離画像の位置付け

	濃淡画像	距離画像
エリア画像・2枚	ステレオマッチング	アライメント
ライン画像・連続複数枚	EPI	時空間距離画像

## 3. 自車位置の推定と広域空間モデルの構築

本章では、時空間距離画像を解析することによってセンサの動きを推定する具体的手法を説明し、続いて我々のデータ収集システムについて述べる。

### 3.1 自己位置推定アルゴリズム

今回はセンサの移動速度は任意に変化するが、経路は直線であるとすると、図 5 にセンサの移動速度および自己位置推定の流れを示す。以下に詳細を述べる。

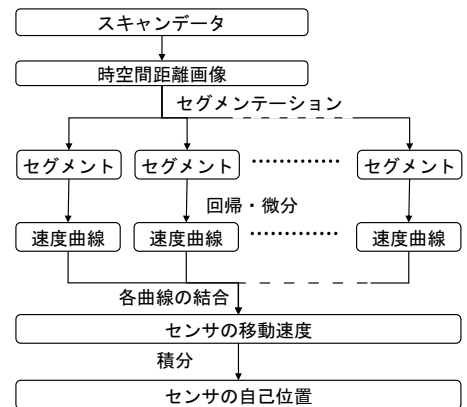


図 5 センサ自己位置・速度の推定処理の流れ

#### a) Step 1.

水平スキャンレンジデータをフレーム毎に垂直方向に並べて時空間距離画像を得る (計測システム詳細は次節)。

#### b) Step 2.

時空間距離画像内の各点が形成するクラスタ面をセグメントに分ける。前節に述べたように、距離画像中の各点はクラスタ面を形成している (図 4)。図 6 に結果の例を示す。各セグメントは計測車両の推移を表現している。

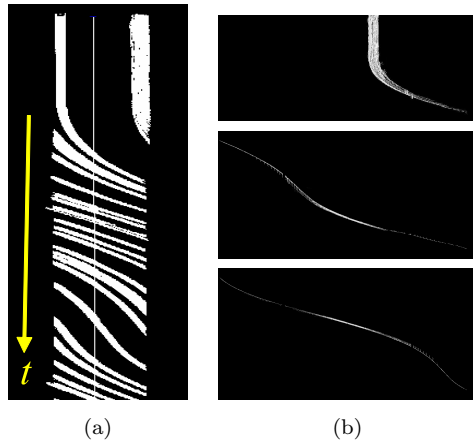


図 6 時空間距離画像のセグメンテーション；(a) 元画像を正面から見たところ．(b)(c) 切り分けたセグメント．

c) Step 3.

得られたセグメントにはそれぞれ対象物体がセンサの可視範囲を時間に伴って推移する様子が表現されている．これはセンサを積載した移動体の位置・速度変化に他ならない．しかし、これらのセグメントは測定誤差に伴うノイズから一様な面とはなっていない．また、スキャン角の分解能やスキャン周波数が有限であることから、レーザの照射点は離散的に分布しており、各セグメントのエッジも滑らかではない．

一方で本研究では、レンジセンサは計測車両に搭載している．一般に自動車はその機械的な加速・減速の原理から、意図的に急発進・急停止を行わない限りその速度変化は滑らかであると考えられる．そこで、本研究ではレンジセンサは連続した速度変化をするものと仮定し、得られた各セグメントに対して回帰的に曲線を当てはめる．

d) Step 4.

回帰曲線は計測車両の推移を表現しているが、これらは各々のセグメント内においてのみ有効である．曲線は解析的に式で表されており、各々の局所区間における位置変化を表している．したがって、これらを解析的に微分することで各セグメント毎の速度曲線を得ることができる．この速度曲線を滑らかに連結することによって、起点から終点までの速度履歴および位置履歴を得る．

### 3.2 データ収集システムと広域空間モデルの構築

図 7 に我々のデータ計測車両を示す．車両には 4 台のレーザレンジセンサが搭載されている．1 台は時空間距離画像を得るために水平方向にスキャンラインを描くように設置する．他の 3 台は建物などの三次元形状を取得するため、垂直方向に設置する．この 3 台はオクルージョンを減らすためそれぞれ異なる方位角をもたせる．対象のモデルは垂直方向のスキャンラインをフレーム毎に並べることで表現できる．計測車両が等速度で走行する場合は等間隔に並べればよいが、任意の速度で走行する場合は、センサの自己位置から適切な位置にスキャンラインを並べる必要がある．センサの自己位置は時空間距離画像を利用して推定する．これにより実空間の形状を正しく復元することができる．

表 3.2 に積載しているレーザレンジセンサの仕様を示す．JIS 規格の定めるレーザ保護クラスは 1 であり、目に安全な出力レベルである [13] ．

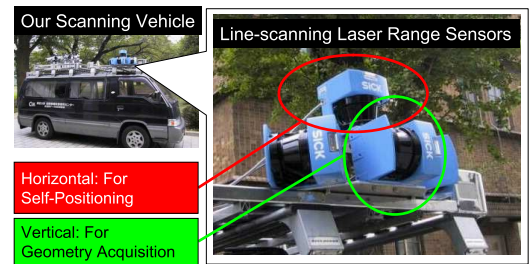


図 7 データ計測用車両

表 3 レーザレンジセンサの仕様

計測原理	Time-of-flight 方式
スキャン周波数	最大 75Hz
スキャン角度	100° / 180°
スキャン角分解能	0.25° / 0.5° / 1.0°
測定分解能	10 mm
測定精度 (代表値)	± 35 mm
レーザ保護クラス	1
製造元	ジック株式会社 [14]

## 4. 実験と考察

### 4.1 実験

提案手法の有効性を確かめるため、実際にレンジセンサを計測車両に搭載して路上を走行し、速度推定と対象形状の復元を試みた．走行したのは東京大学駒場リサーチキャンパス内、生産技術研究所前の道路である (図 8) ．



図 8 計測対象 (東京大学生産技術研究所): 柱は等間隔で、6m 毎に並んでいる．

### 4.2 結果

図 9 に回帰の様子を示す．本実験では各セグメントは人手により抽出し、エッジには 6 次多項式を当てはめた．実験によって得られた推定速度曲線および評価用の速度曲線を図 10 に示す．評価用のデータは、後に示す図 12(a) のモデル (推定結果反映前) において隣接する柱のピッチ (6m; 実測値) と、ピッチ間に含まれた垂直スキャンラインの本数から求めた．

推定した速度と評価データは概ね合致しており、本手法が速度推定に有効であると言える．一方で、特に極大点および極小点において顕著に差が現れており、最大で 8 ~ 12 程度の誤差を生じている．



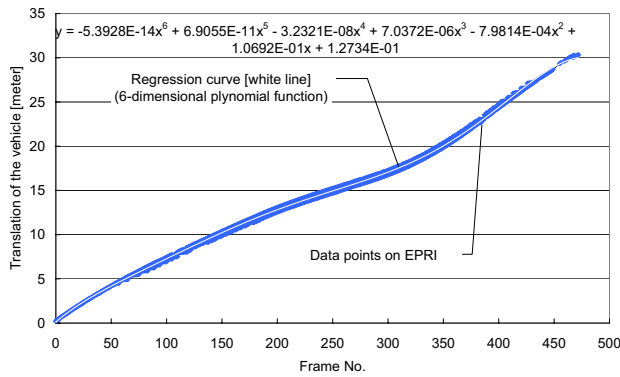


図 9 回帰による速度の推定

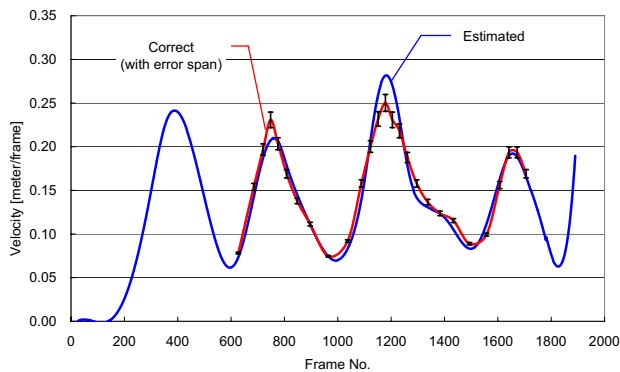


図 10 速度の推定結果

次に、得られた推定結果に基づいて、垂直スキャンラインを並べることで建物の形状を復元した。図 12 にそれぞれ速度推定処理の適用前 (a, b, c) と適用後 (a', b', c') の復元結果を示す。適用前の復元図とは、垂直スキャンラインを等間隔に並べた場合の復元図であり、本来は等間隔である柱が不等間隔に並んでいるが、推定後の復元図では図 8 と同様に、柱が等間隔に並んでいる。また、図 11 に復元結果の全体図を示す。垂直方向のスキャンラインの間隔が計測車両の走行速度に適應して配置されている。

#### 4.3 考察

推定結果には、最大で 8 ~ 12% 程度の誤差が生じていた。考えられる原因としては、以下が挙げられる。

- 単一の多項式による回帰：回帰式は必ずしも多項式である必要はない。移動体 (車両) の運動特性を考慮した回帰式を検討する必要がある。
- 単一セグメント内で完結した処理：今回の実験では推定速度曲線の算出は個々のセグメントにおいて内部で完結した処理を行い、最後にそれらを滑らかにつなぐ手法をとった。しかし、それぞれのセグメントに対してその近傍のセグメントは、互いに近い速度を表現しているとはずである。従って回帰式を求める段階でセグメント間の連続性を制約に入れ、複数のセグメントから同時に速度を推定することで精度向上が見込まれる。
- 反射率の不利用：今回用いたレンジセンサからはレーザ反射率の情報を得ることはできないが、それが可能であるレンジセンサを用いれば、時空間距離画像中には凹凸による幾何的なエッジに加え、反射率によるエッジも現れる。これを利用す

れば対象物体が平坦な面からもエッジが得られ、密にセグメントをとることで精度向上が見込まれる。

## 5. むすび

本稿ではまず、新しい概念である時空間距離画像を提案した。この距離画像の特徴は、対象空間の空間的特性と時間的連続性を同時に表現していることである。また、これを解析することによってセンサの移動速度が推定可能であることを示し、その具体的手法を述べた。この手法によれば、フレーム毎のスキャン結果をマッチングする方法よりも全体的な傾向を考慮した上で速度を推定することができると思われる。

さらに、水平方向のレンジセンサを自己位置獲得に、垂直方向のレンジセンサを対象空間の形状取得に利用するし、それらのデータおよび解析結果を統合することで都市空間モデル構築するシステムを考案した。また、屋外での実験を通して、この方法により計測車の位置に応じて正しい位置に対象空間の形状を復元できることを確認した。一連の推定処理はすべて、GPS などの外部装置を一切用いることなく行うことができる。

今後の課題としては、先に述べた精度向上のほか、以下の事項が挙げられる。

- 自由走行経路の場合の実験：走行経路を自由走行経路に対応させる。この場合は時空間距離画像内の各点群が形成する面が平面から曲面となるが、これを解析することで自由な自転車走行経路を推定する。
- 様々な対象空間における実験：本実験では対象空間は柱のある建物であり、時空間距離画像が明白なセグメントに分かれていた。今後はさらに樹木などの多い一般的な対象空間において実験を行い、本手法の有効性を評価する。
- オクルージョンの考慮：本実験ではオクルージョンについては考慮しなかったが、実際にはオクルージョンが生じた場合、時空間距離画像内のエッジに変化が現れると考えられる。
- 他データと統合：GPS データや既存の地図データとのマッチングを行う。
- 複数レンジセンサの自動キャリブレーション：各センサの設置位置・姿勢は、[11], [12] に提案されているようなパラメータ付き位置合わせの手法を利用して時空間距離画像を解析ことによって、計測車の移動速度と同時に推定することが可能であるとえられる。
- 精度・品質と適正な用途に関する考察：モデルの構築結果に要求される精度・品質は、概形の取得から文化遺産の保存までその用途によって大きく異なる。計測条件と精度限界から適正な用途について考察する。

## 文 献

- [1] R.C. Bolles, H.H. Baker, D.H. Marimont, "Epipolar-plane image analysis: an approach to determining structure from motion", International Journal on Computer Vision, vol.1, pp.7-55, 1987
- [2] H.H. Baker, R.C. Bolles, "Generalizing epipolar plane image analysis on the spatio-temporal surface", International Journal on Computer Vision, vol.3, pp.33-49, 1989
- [3] K. Ikeuchi, Y. Sato, K. Nishino, R. Sagawa, T. Nishikawa, T. Oishi, I. Sato, J. Takamatsu and D. Miyazaki, "Mod-

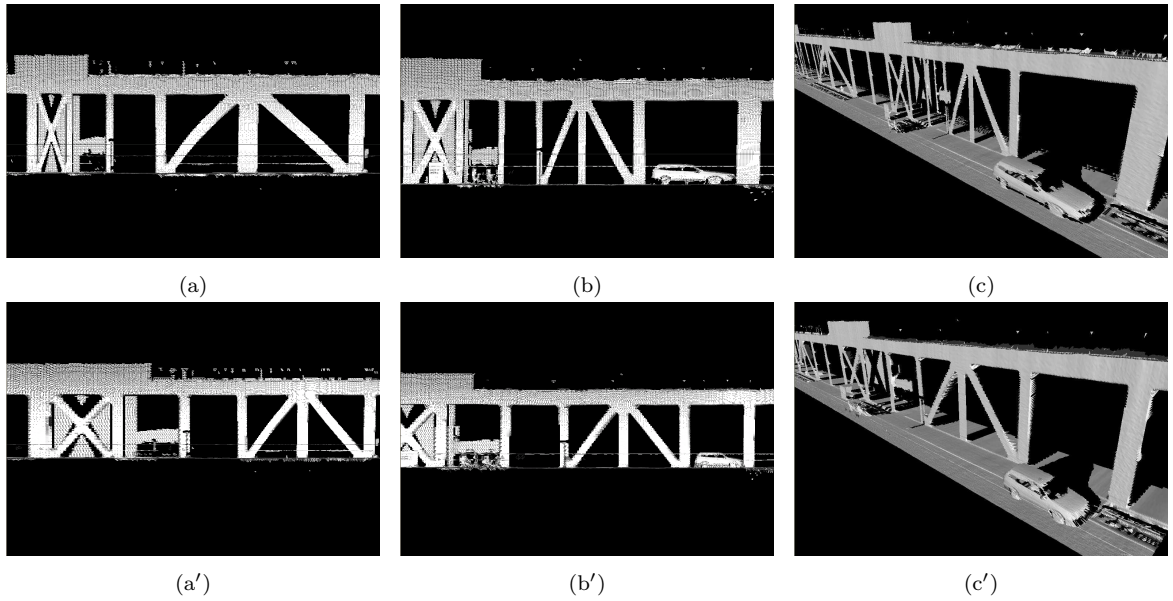


図 11 復元結果の詳細 . (a,b,c) : 速度推定結果適用前 , (a',b',c') : 適用後

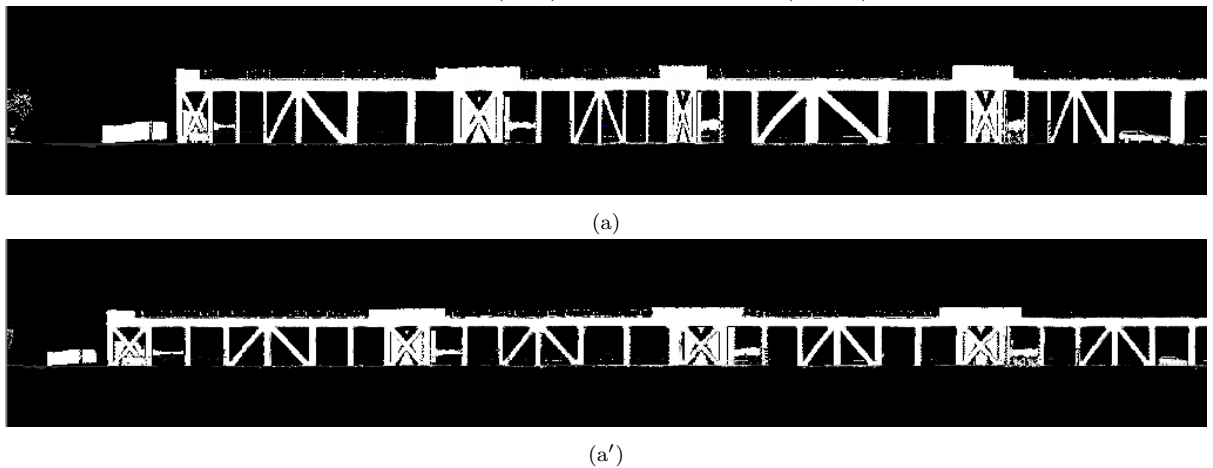


図 12 復元結果 . (a) : 速度推定結果適用前 , (a') : 適用後

- eling Cultural heritage through Observation”, Proc. IEEE 1st Pacific-Rim Conference on Multimedia (PCM), Sydney, Australia, Dec. 2000
- [4] H. Zhao, R. Shibasaki, “Reconstructing Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners”, Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM), Quebec, Canada, May 2001
- [5] H. Kawasaki, A. Miyamoto, Y. Ohsawa, S. Ono, K. Ikeuchi, “Multiple Video Camera Calibration using EPI for City Modeling”, Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Juzu Island, Korea, Jan. 2004
- [6] 政春尋志, “ヘリコプター搭載レーザースキャナーによる都市三次元情報の計測”, 写真測量とリモートセンシング, vol.39, no.2 2000
- [7] 織田和夫, “レーザースキャナと空中写真による自動都市モデル構築”, 第 1 回 ITS シンポジウム, Dec. 2002
- [8] C. Frueh, A. Zakhor, “Fast 3D Model Generation in Urban Environments”, Proc. IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Baden-Baden, Germany, Aug. 2001
- [9] C. Frueh, A. Zakhor, “3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans”, Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Kauai Hawaii, USA, Dec. 2001
- [10] C. Frueh, A. Zakhor, “Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views”, Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Madison, USA, Jun. 2003
- [11] E. Boyer and J. S. Franco, “A Hybrid Approach for Computing Visual Hulls of Complex Object”, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Madison, USA, Jun. 2003
- [12] 増田智仁, 倉爪亮, 池水美都, 西野嘉章, 池内克史, 「パラメタ同時推定位置合わせ手法の開発」, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), Jul. 2002
- [13] JIS 規格番号 C6802, 日本工業標準化調査会 (Japanese Industrial Standard Comitee; JISC) <http://www.jisc.go.jp>
- [14] ジック株式会社 (SICK AG), <http://www.sick.co.jp>, <http://www.sick.de>