

時空間距離画像の提案・考察と街のモデル化への応用

小野 晋太郎^{*1} 川崎 洋^{*2} 池内 克史^{*1}

抄録：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ができる。

Proposal and Consideration of Spatio-Temporal Range Image and its Application to City Modeling

Shintaro Ono^{*1} Hiroshi Kawasaki^{*2} Katsushi Ikeuchi^{*1}

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.

1 はじめに

仮想空間内に三次元の都市モデルを構築は、コンピュータビジョン/グラフィクス、仮想現実感、センシング、建築など、多くの領域において非常に興味深い研究対象となっている。都市空間のモデルは、都市計画、防災、景観シミュレーション、高度交通システムなど、様々な分野への応用が期待されている。近年では、携帯電話の電波状況シミュレーションに応用される例も見られる。

都市空間程度の大規模なシーンは、単一のセンシングデバイスで一度にその形状やテクスチャを取得することは困難である。これは、現在の製品レベルのセンサでは、対象全体をオクルージョンなく、かつ十分な解像度で計測できるものが存在しないからである。この問題に対す

る一般的な解決手法は、以下の二通りに大別される。

- “Stop-and-go” scanning
- “Continuous” scanning

“Stop-and-go” scanning は、[3] に代表されるように、定点から対象を計測し、離れた点に移動し、計測するという作業を繰り返す方式である。この方式では定点から計測を行うため、得られるデータは比較的密で、正確である。一方、都市空間のように広域に渡る環境を計測する場合は非常に長い時間が必要である。

“Continuous” scanning は、“Stop-and-go” scanning の欠点を克服する有力で効率的な方式である。これはセンサを車両 [5]、ヘリコプタ [6]、飛行機 [7] などの移動体に搭載して計測を行う方式であり、広大な環境を計測するのに適している。しかし、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。

^{*1} 東京大学 The University of Tokyo

^{*2} 埼玉大学 Saitama University

自己位置を取得するための最も一般的な解法は、[4]のように、移動体に GPS や INS といった外部の装置を搭載することである。これは非常に単純で簡便な手法であり、容易に移動体の自己位置や速度を得ることができる。しかし、位置の精度はその場の状況、特に GPS 電波の受信状況に大きく依存している。GPS 信号へのスクランブル付加が解除されて以来、状況は改善したが、都市の地上レベルでは建造物や高速道路の高架によるオクルージョンもあり、十分な精度とはいえない。

その他の解法として、C.Frueh [8] によるものがある。これは、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についてマッチングを行って計測車両の自己挙動を算出するものである。C.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]。

我々はコンピュータビジョンの視点から見て、大まかな位置取得には外部装置を用いるのが簡便であるが、精細な位置取得には C.Frueh らの手法の考え方が有力なものであると捕らえている。すなわち、GPS などの外部装置はセンサの初期位置を与えるものとして利用し、精細な位置取得は得られた幾何データを計算幾何学的な処理によって得るというものである。具体的には自己位置情報は、同様に水平方向にスキャンを繰り返すセンサを計測車両に搭載して取得する。しかし、我々の手法が [8] と比較して特徴的であるのは、それぞれのスキャンフレームの時間的連続性を考慮している点である。我々は、既存の動画解析手法であるエピポーラ平面画像 (EPI) から、新しい概念である時空間距離画像を提案する。時空間距離画像は、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。我々は、これを利用して計測車両の自己位置を推定する。

本稿は 5 章からなる。2 章では、先に述べた時空間距離画像の概念を、EPI と比較しながら述べる。3, 4 章では、時空間距離画像を計測車両の自己位置推定に応用する手法について説明し、実際に屋外で実験を行い、推定結果をもとに正しい三次元都市空間の復元を行う。最後に 5 章でまとめとする。

2 時空間距離画像

本章では、新しい概念である時空間距離画像を提案する。時空間距離画像は、対象の空間的特性と時間的連続性を同時に表現した距離画像である。この概念は、エピポーラ平面画像 (Epipolar Plane Image, EPI) から派生し

たものである。ここではまず、EPI 解析について説明し、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

エピポーラ平面画像 (EPI) 解析は、特にコンピュータビジョンの分野において、動画像を解析する基本的な手法としてよく知られている。EPI の基礎概念は [1, 2] によって提案され、数多くの応用研究が知られている。EPI は、 $n \times 1$ ピクセルのラインカメラ画像を時間軸に沿って垂直に積層することで得られる*3。

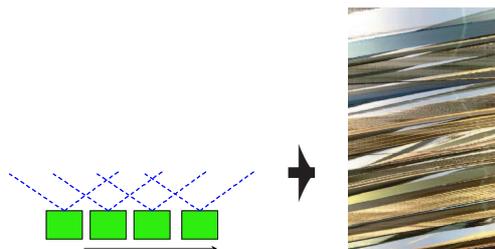


図 1: エピポーラ平面画像 (EPI)

図 1 に示すように、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。このエッジ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。この傾きの差は、カメラが水平方向に移動して生じた視差によるものである。図 2 は、カメラが C1 から C2 に移動した際に生じる視差を表したものである。この図より、対象の奥行き D と視

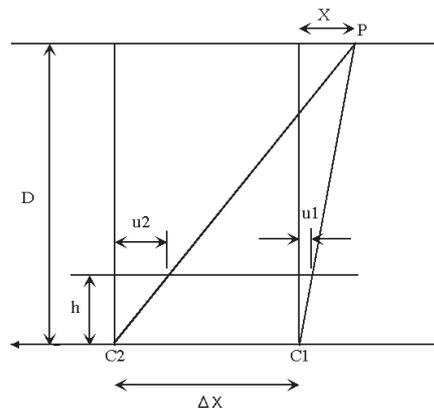


図 2: ラテラルモーション

差 u は、カメラの移動距離 ΔX と以下のように関係づけられる。

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

*3 あるいは、二次元のカメラ画像を時間軸に沿って奥方向に並べ、その水平切断面としても得られる。

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。

$$mV \propto D \quad (2)$$

ここで、 V はカメラの移動速度である。この式から、 D は m, V から推定することができる。すなわち、カメラだけ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 解析においてはエッジが直線である必要があり、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。

2.2 時空間距離画像

2.2.1 定義と特徴

ここでは、新しい概念として時空間距離画像を提案し、その特徴を EPI と比較しながら述べる。時空間距離画像は EPI と同様の方法によって得られるが、センサをラインカメラではなく、レインスキャンレーザレンジセンサとしたものである。図 3 は時空間距離画像の概念を示したモデル図である。

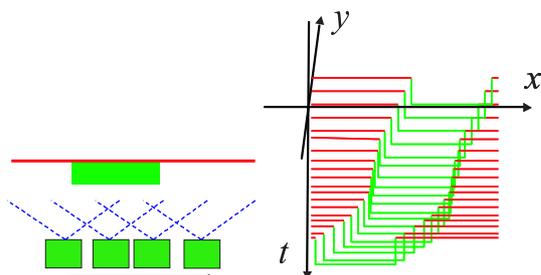


図 3: 時空間距離画像

表 1: EPI と時空間距離画像

	EPI	時空間距離画像
計測デバイス	カメラ	レンジセンサ
奥行き情報	既知	未知
奥行きとエッジの傾き	依存	無関係
センサの移動	等速・直線	非等速・曲線も可
画像内のピクセル	一様	非一様

表 1 は、EPI と時空間距離画像を比較したものである。時空間距離画像には、EPI と比較してさまざまな特徴がある。

1. センサから対象までの奥行きは既知である。
2. ある点の奥行きと、その点が距離画像上で描いたエッジの傾きは無関係である。
3. センサの移動速度は必ずしも等速と仮定しない。

1. は、レンジセンサの本質的な特性によるものである。
2. は、レンジセンサは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。通常の EPI では、エッジの傾き差はカメラの投影面の存在によって発生する。時空間距離画像では、隣接したスキャンフレームの間に特徴点が移動したように観測される距離は、 V をセンサの移動速度、 f をセンサのフレーム周波数とすると V/f と表される。EPI における式 2 に対し、時空間距離画像では以下の式が導かれる。

$$mV = \text{const.} \quad (3)$$

3. は、時空間距離画像におけるエッジは EPI と比較して簡単に検出することができるためである。EPI では、エッジの検出にはハフ変換が用いられ、したがってエッジは直線である必要があった。すなわち、カメラは等速で移動するものと仮定されている。一方で時空間距離画像では、内部の点群はいくつかのクラスタ面を形成する。これらの面を幾何的に分離することは難しくない。したがって、それらのエッジは直線でも検出することは容易である。これは、センサが必ずしも等速で移動することを仮定しないことを意味する。

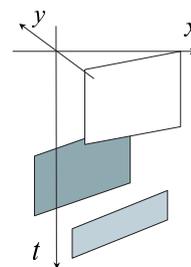


図 4: 時空間距離画像中の各点はクラスタ面を形成する

2.2.2 応用

次に、時空間距離画像を応用方法について述べる。EPI では各点の奥行き値は未知数であり、カメラが等速直線運動をするという仮定の下に、式 2 によって推定することができた。

一方、時空間距離画像では各点の奥行き値が既知であるため、EPI 解析と手法によって逆にセンサの移動速度を未知数として推定することができる (式 3)。これにより、センサの水平位置も推定することが可能である (図

5 左). 加えて, センサの水平位置については, センサが直線運動をすることを仮定する必要がない. これは, 対象との距離が時空間距離画像から得られるためである (図 5 右).

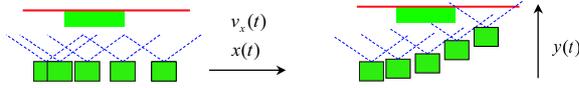


図 5: 時空間距離画像を利用したセンサ自己位置の取得

このように, 時空間距離画像を解析することによって, レンジセンサをある種の「測位システム」として活用することができる. 3 章では, センサの自己位置を推定する具体的な手法を説明する.

2.2.3 位置づけ

時空間距離画像は表 2 のように位置づけることができる. 2 枚の濃淡画像 (マトリクス画像) から対応点探索により三次元情報を取得するのはステレオマッチングである. これを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 (マトリクス画像) から対応点探索により位置関係を取得するのはアライメントであり. これを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る.

表 2: 時空間距離画像の位置づけ

	濃淡画像	距離画像
マトリクス画像・2 枚	ステレオマッチング	アライメント
ライン画像・時系列複数枚	EPI	時空間距離画像

3 自己車両位置の推定と都市モデル構築

前章では, 時空間距離画像を提案し, それを解析することによってセンサの動きが推定できることを示した. 本章ではその具体的な手法を説明し, 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. 図 6 にセンサの移動速度および自己位置推定の流れを示す. この処理は以下のように記述される.

1. スキャンデータを取得し, 時空間距離画像を作成する.

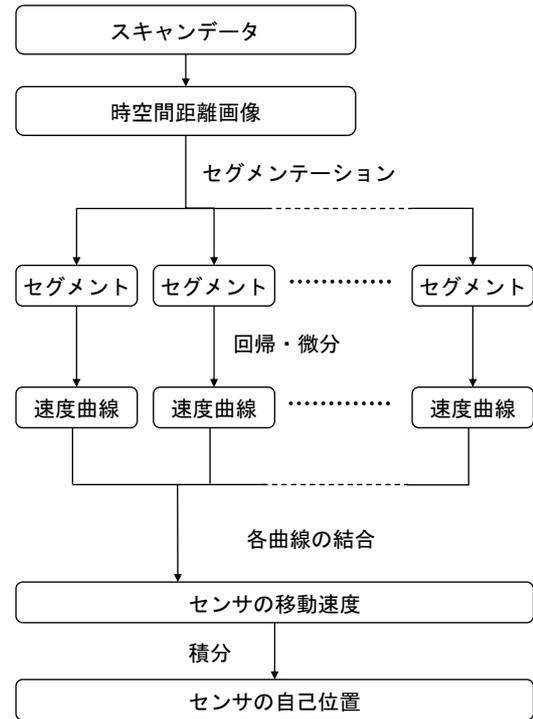


図 6: センサ自己位置・速度の推定処理の流れ

2. 時空間距離画像中のクラスタ面についてセグメンテーションを行い, 分離する.
3. それぞれのセグメントに, 回帰的に曲線を当てはめる.
4. セグメント毎の曲線を微分したものを滑らかに連結する.

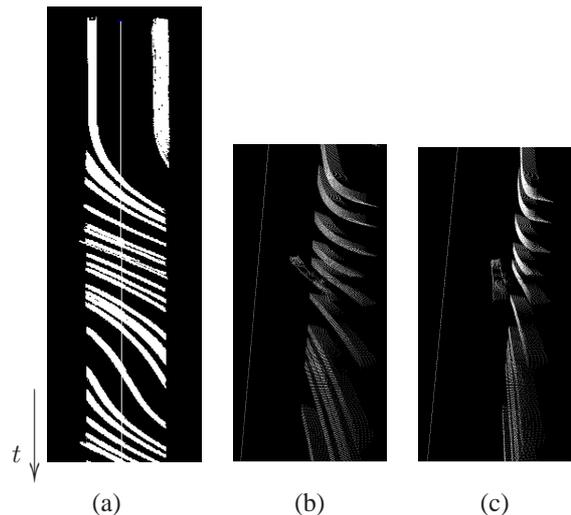


図 7: 時空間距離画像の実例; (a) 対象の空間的特性と時間的連続性が同時に表現される. (b)(c) 各点はクラスタ面を形成する

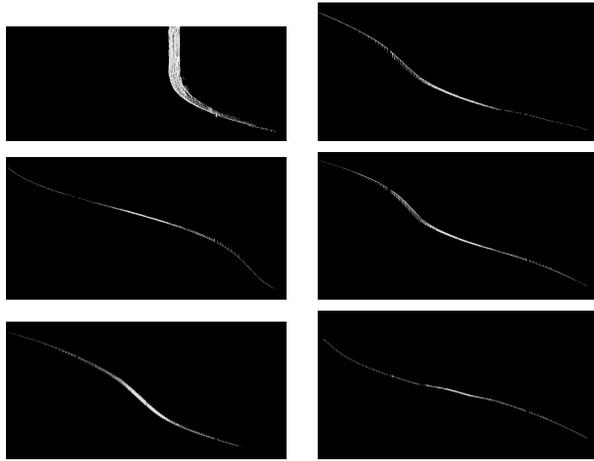


図 8: セグメンテーションを行った時空間距離画像

以下に詳細を述べる。

Step 1: 図 9 のように、ラインスキャンレーザレンジセンサを計測車両に搭載する。システムの詳細は次節に述べる。時空間距離画像は水平方向のスキャンレンジデータを垂直方向に積み重ねることによって作成できる。

Step 2: 前章に述べた通り、時空間距離画像内の各点は図 7 のようにクラスタ面を形成する。ここでは各クラスタをセグメントに切り分ける。図 8 にセグメンテーションの結果を示す。各セグメントは計測車両の推移を表現している。

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。

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都市モデルの構築

図 9 に我々の計測車両とデータ収集システムを示す。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 台は都市空間内の建物などの三次元形状を取得するため、水平方向に設置する。

表 3 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]。計測原理は Time-of-flight 方式であり、レーザ光の伝播時間から距離を計測する。



図 9: 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
測定確度 (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]

都市空間のモデルは、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構築することができる。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先に述べた水平方向のスキャン結果から推

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．

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用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 B 棟前から F 棟前までである (図 10)．



図 10: 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．

図 11 に回帰の様子を示す．本実験では各セグメントに 6 次多項式を当てはめた．

これにより、図 12 のようにセンサ移動速度の時間変化を推定することができる．実験によって得られた推定速度曲線と、評価用速度曲線を図 12 に示す．評価用のデータは、後に示す図 13(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、その間隔を描くのに必要としたスキャンラインのフレーム数から求めた．

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．

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 14 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、仮に計測車両が等速度で走行したとみなし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．推定後の復元図では、図 10 と同様、柱が等間隔に並んでいる．また、図 13 に復元結果の詳細図を示す．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．

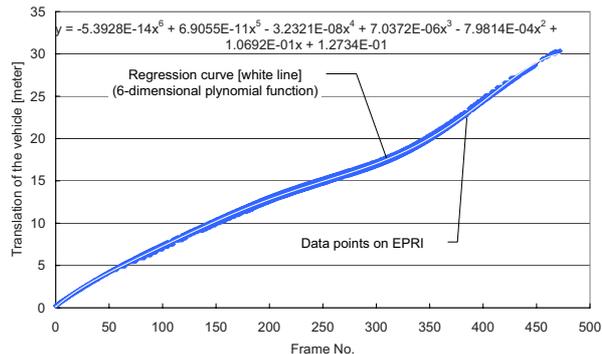


図 11: 回帰による速度の推定

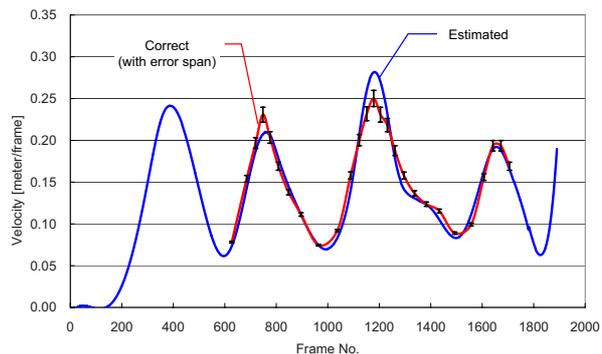


図 12: 速度の推定結果

4.2 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繋ぐ手法をとった．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必ずである．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

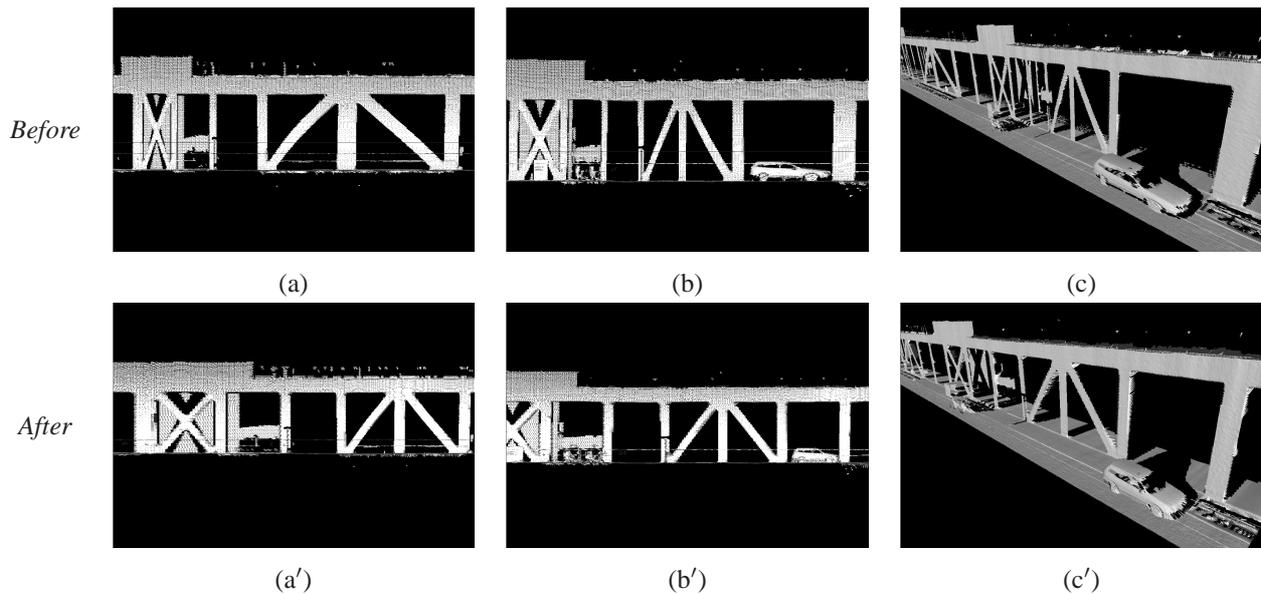


図 13: 復元結果の詳細 . (a,b,c) : 速度推定結果適用前 , (a',b',c') : 適用後

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 おわりに

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を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．
- テクスチャマッピング：
レンジセンサのほか，イメージセンサも計測車両に搭載して同時に映像を取得し，幾何モデルとテクスチャを統合する．
- 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，エピソード平面距離画像内のエッジに変化が現れると考えられる．
- 複数センサの自動キャリブレーション：
センサの設置位置および姿勢は，[11, 12] に提案されているようなパラメ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考えられる．
- 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．

参考文献

- [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, 1, 7-55, 1987
- [2] H.H.Baker, et.al : “Generalizing epipolar plane image analysis on the spatio-temporal surface”, International Journal on Computer Vision, 3, 33-49, 1989
- [3] K. Ikeuchi, Y. Sato, K. Nishino, R. Sagawa, T.Nishikawa, T.Oishi, I.Sato, J.Takamatsu and D.Miyazaki, “Modeling Cultural heritage through Observation”, Proc. of IEEE first Pacific-Rim Conference on Multimedia, 2000.12
- [4] Huijing Zhao, Ryosuke Shibasaki: “Reconstructing Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners”, International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM), 2001
- [5] 小野 晋太郎, 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫: 「EPI 解析による複数ビデオカメラの画像統合」コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM), 2003.3
- [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, 2002
- [8] Christian Frueh, Avideh Zakhor: “Fast 3D Model Generation in Urban Environments”, IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2001
- [9] Christian Frueh, Avideh Zakhor: “3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans”, Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2001
- [10] Christian Frueh, Avideh Zakhor: “Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views” Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2003
- [11] E. Boyer and J. S. Franco: “A Hybrid Approach for Computing Visual Hulls of Complex Object”, Computer Vision and Pattern Recognition, 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), 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>

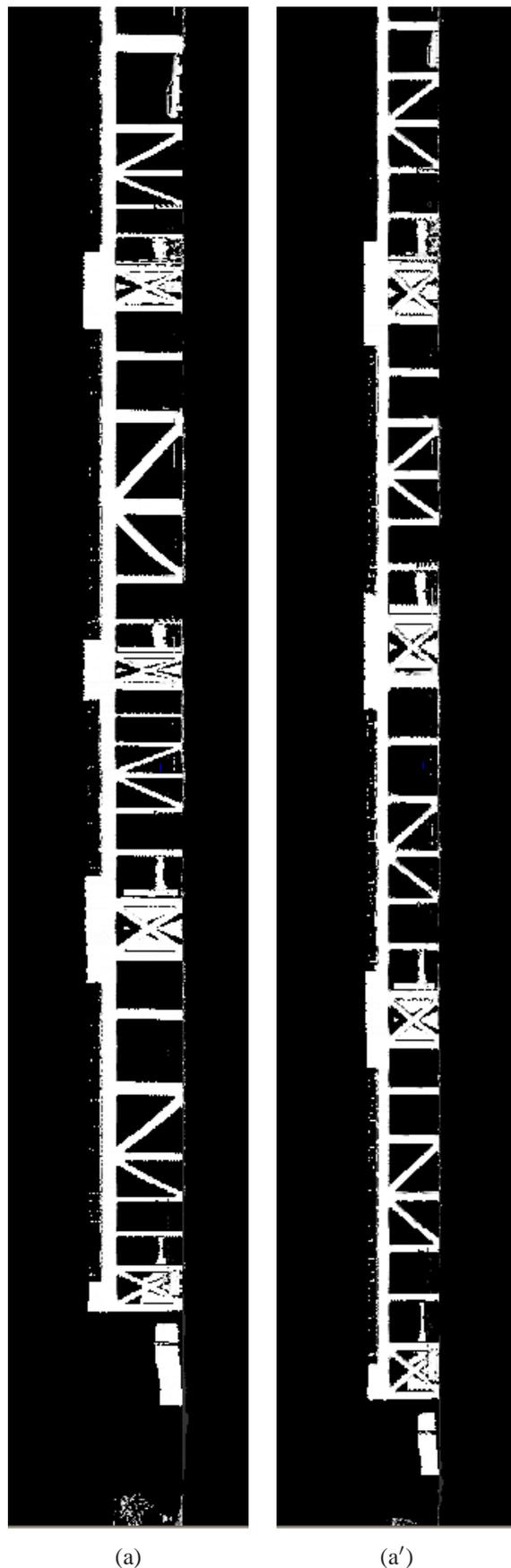


図 14: 復元結果 . (a) : 速度推定結果適用前 , (a') : 適用後