

木登りセンサ:

時空間距離画像を利用した狭隘部の三次元モデル化

松井 健[†] 小野 晋太郎[†] 池内 克史^{††}

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻

^{††} 東京大学大学院 情報学環学際情報学府

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 生産技術研究所

E-mail: †{matsu-ken,onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本論文では、「木登りセンサ」という新規の三次元計測機構を提案する。このセンサは、従来の商用レンジセンサではその寸法や視野角の限界により計測が困難であった狭隘部を計測するために設計された。木登りセンサは 2 台のラインスキャンレーザレンジセンサを市販のリフトに装着し、リフトの上下運動に伴って対象物を計測する機構となっている。スキャナの移動速度は時空間距離画像を用いることにより推定され、正確な三次元モデルを形成することが可能となる。このセンサを歴史的文化遗产のデジタル保存の一環としてカンボジアのバイヨン寺院で運用したところ、計測結果から、正確な三次元モデル獲得と速度推定手法の有効性が示された。

キーワード 三次元モデリング, 歴史的文化遗产, レーザレンジセンサ, 時空間距離画像

The Climbing Sensor:

3-D Modeling of a Narrow and Vertically Stalky Space

by Using Spatio-Temporal Range Image

Ken MATSUI[†], Shintaro ONO[†], and Katsushi IKEUCHI^{††}

[†] Information and Communication Engineering,

Graduate School of Information Science and Technology,

The University of Tokyo

^{††} Graduate School of Interfaculty Initiative in Information Science,

The University of Tokyo

Institute of Industrial Science, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN

E-mail: †{matsu-ken,onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a novel type of 3-D scanning system named ‘Climbing Sensor’. This system was designed for scanning narrow and vertically stalky spaces. The climbing sensor equips a platform with two line scanners on a lift, and they scan the whole target while the lift moves vertically. By using spatio-temporal range image we can accurately calculate the speed of the platform, with which correct 3-D models can be constructed. We applied this system to the Bayon Temple in Cambodia. The results proved that the system gives a sufficiently accurate 3-D model and the effectiveness of our proposed system and speed estimating process.

Key words 3-D modeling, Cultural assets, Laser range finder, Spatio-temporal range image

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の革新的な進歩により、画像処理やコンピュータビジョンの研究は高い注目を集めている。その中でも、実世界の対象を計測することによってその三次元モデル

を作成する研究は、コンピュータビジョンの中でも最も盛んに行われているものの一つである。レーザスキャナによって得られる高精度の幾何データは学術調査や娯楽分野への応用など多岐にわたって使用されている。

対象物をモデリングする主たる応用例としては、何百年も前に

建造された歴史的文化遺産が挙げられる。これらの文化遺産は雨風にさらされ、また、地震や火事など自然災害によって、時間の経過と共に劣化していく。更なる劣化から守り、修復を行うためには、正確な文化遺産のモデルが必要となる。世界的に見ても歴史的に重要な物体の三次元モデリングは重要視されている [12]。われわれはこれまで奈良や鎌倉の大仏 [2]、廣目天、フゴッペ洞窟などのモデリングを行ってきた。

現在われわれは、カンボジア・アンコールトム遺跡のバイヨン寺院のモデリング [3] を進めている。計測には、市販の Cyrax 2500 [11] やわれわれが考案した Floating Laser Range Sensor [6] などのセンサを用いている。大部分の領域はこれらのセンサによりモデル化を行ったが、バイヨン寺院には通常の市販のレーザセンサでは、その視野角の制限やセンサの寸法に対して十分な場所を確保できないために、計測が困難、あるいは非常に非効率な範囲が多々あり、そのすべてを計測することができていないという問題に直面している。球状に測定を行う Z+F 社の IMAGER [21] などを使用することにより視野角の問題や寸法の問題を解決することはできるが、測定場所により点密度が大きく異なるといった問題や、測定原理が位相差を用いることによる距離の曖昧性の問題が生じてしまう。

そこで、この問題を解決するために、われわれは全く新しい「木登りセンサ」という計測システムを開発し、問題となる視野角や狭さの問題も解決できるようにした。木登りセンサは、2 台のラインスキャナを装備する基盤を市販の梯子型リフトに取り付けることにより、基盤がリフトに沿って上下運動をしている間に計測を行うことができる。基盤の上下運動の速度は必ずしも定数ではなく、梯子を立てかける状態に応じて計測ごとに異なる。一方のセンサから得られる、われわれの新しい概念である時空間距離画像を用いることによって、推定段階で誤差が蓄積しない、正確な速度算出を行うことができる。

以下は本論文の構成である。まず、関連研究について 2 で述べ、次に木登りセンサの構成について 3 でまとめる。4 では時空間距離画像について述べ、5 で正確な三次元モデルを獲得するためのアルゴリズムをまとめる。われわれの提案手法によってモデリングされた結果を 6 で示す。最後に、結論と今後の課題を 7 で述べる。

2. 関連研究

移動体から対象物を計測する手法は複数存在する。移動体の 1 つの例としてヘリコプターがある [4] [16]。これらの手法ではヘリコプターが移動している間に対象物を連続して 1 次元的に計測を行っている。これらの手法に共通する問題点は、ヘリコプターの微小な振動のため周期的な歪みが生じ、その歪みを除去する必要性があることである。

歴史的文化遺産を計測し、モデルを作成する状況では、ヘリコプターによる計測は安全上の問題からあまり適切ではないと考えられる。特に、われわれの場合においては、計測箇所空間が限られており、ヘリコプターを飛ばすという手法は現実的ではない。

ヘリコプターを利用する手法に類似した方法として、気球を

利用する手法も考案されている [6]。この手法では、ヘリコプターの場合に比べてセンサの移動速度が遅いため、2 次元的に計測を行うことが可能である。このセンサが考案された背景としては、地上固定型のセンサによる計測が困難である大規模物体の上部を計測することが挙げられる。ヘリコプターを利用する手法と比較しての利点は、移動体の速度が遅いため歪みの補正が容易になる点である。また、計測対象物の上部に広大な空間が必要となり、われわれの場合においては利用することが困難である。

大きな街などの対象物を計測する際には、移動体として、車を用いる手法が提案されている。自己位置を推定する方法としては、GPS や慣性センサなどの外部機器を利用する方法がある [20] ほか、より正確な位置を獲得するために、2 台の 1 次元センサを利用する手法も考案されている。例えば、一方のスキャナは移動体の移動と共に対象物全体を計測し、もう一方のスキャナは移動方向に対し平行に計測を行う。連続する移動方向と平行なスキャンを比較することによって、移動体の相対的な位置関係を求めることが可能である。しかし、この手法は連続する 2 つの計測結果のみの相対関係から移動体の速度を連続的に計算するため、全体の速度の推定において誤差が蓄積する問題がある。[8] [9] では、正確な街の建造物の輪郭が得られる航空写真に車載センサから得られるモデルを合わせることでこの問題を解決している。

このようにラインスキャンを使用する際の問題はロボットの分野において SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) として知られる。SLAM は基本的には拡張カルマンフィルタを用いる手法によって改善されており [10] [17]、近年の傾向は、この手法を拡張し、より高速に広範囲をモデリングするアルゴリズムが考案されている [13] [14]。

われわれが提案する木登りセンサにおいても、垂直方向となる移動方向に、平行なラインスキャンを用いる手法を考える。しかし、ここでは移動体の自己位置を推定する手法としてより単純で独自の手法である時空間距離画像 [5] を利用する。

3. 木登りセンサの構成

市販のセンサには計測が困難な空間を計測するために、われわれは商用の伸縮自在な梯子を装備するリフト (メディコム社製、Nobitec LiftNPL-4200 [15]) を移動体として使用した。この梯子型リフトを使用することにより、センサは狭隘部を上下方向に運動することが可能となる。われわれはこのセンサを「木登りセンサ」と命名した。この梯子型リフトはウィンチにより上下方向に運動する。リフトの仕様は表 1 の通りである。

リフトには 2 台の SICK センサ (LMS200 [18]) を互いに垂直に配置した。LMS200 の仕様は表 2 の通りである。LMS 200 を利用した理由は、その軽量性、小型性、そして移動速度に比べて十分な計測周波数、さらには広い計測視野角 (FOV) である。一方のセンサを移動方向に対して垂直に配置し、もう一方は平行に配置した。2 台のセンサの外観を図 1 に示す。

木登りセンサの梯子は壁に立て掛けられ、2 台のセンサで計測を行いながらリフトが上下する。LMS200 はラインスキャン

表 1 Nobitec Lift の仕様

最大吊上荷重	100kgf
最高揚程	3200mm
使用電源	AC100V 50/60Hz
消費電力	870W
吊上げ速度	25m/min (0.417m/s)
外形寸法	H4380 × W1210 × D509mm
製造元	Medicom Corporation

表 2 Specifications of the LMS200 Scanner.

計測手法	Time of flight, Line-scan
計測周波数	37.5Hz
計測視野角 (FOV)	100° / 180°
角度分解能	0.25° / 0.5° / 1.0°
分解能	10 mm
Systematic error	± 15 mm
Laser class	1
計測範囲	80 m
質量	4.5 kg
外形寸法	L156 × W155 × H210 mm

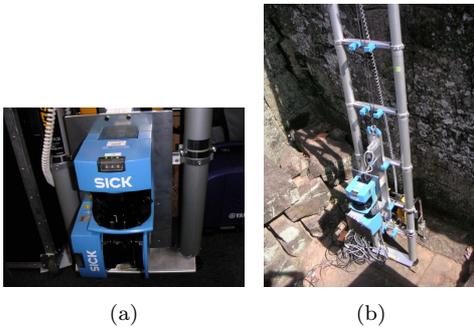


図 1 (a) 基盤に装着された 2 台の LMS200 (b) 木登りセンサの外観

を行うため、水平スキャンは移動に伴い計測対象の全体形状を計測し、垂直スキャンは 2 台のセンサ位置の時間的推移を求める際に利用される。木登りセンサの外観は図 1(b) の通りである。この木登りセンサによって、十分な水平方向の視野角を保持しながら、空間的な制限も解決し、測定点の点密度を一様にする事が可能となった。

リフトがウインチによって移動する速度は 25m/分である。しかし、梯子が壁に立て掛けられる際の傾きは計測毎に異なり、それに伴い摩擦の大きさも異なると考えられ、さらに発電機から供給される電源も一定であるとは限らないため、仕様書に書かれている速度は正確ではない。そこで垂直スキャンを利用することにより、正確なセンサの移動速度を求めることを考える。

4. 時空間距離画像

ここでは時空間距離画像の概念とその特徴、用法について述べる。時空間距離画像とはラインスキャンによる距離データの集合からなる一種の距離画像である。例えば、移動体が水平方向に移動しながら水平方向に連続してラインスキャンを行い、その計測結果を時間軸に沿って適当な間隔で平行に並べると、

図 2(a) のように時空間距離画像を得ることができる。同様に、移動体が垂直方向に移動した場合においては、垂直スキャンを並べることによって図 2(b) のような時空間距離画像を得ることができる。

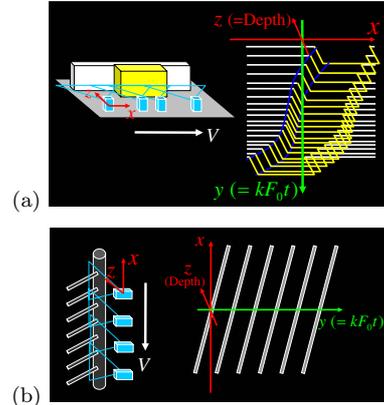


図 2 時空間距離画像の基礎概念

時空間距離画像には興味深い特徴がある。時空間距離画像は図 2 の x 座標で表される計測対象の空間的な特徴だけでなく、 y 座標で表される移動の時間的な連続性も併せ持つ。すなわち、時空間距離画像を y 座標に沿って眺めることにより、センサが時間経過とともにどのように移動したのかを知ることができる。さらに、時空間距離画像においては各点の奥行き位置が分離されており、したがって時空間距離画像中では各点が複数のクラスタ面を形成する。

クラスタ面を形成するという特徴はすなわち、クラスタ毎のエッジ抽出が容易になるということである。このエッジを用いることによって、移動体の移動速度は以下の式によって計算することができる。

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{kF_0 \Delta t}{\Delta x} = \frac{kF_0}{V} \quad (1)$$

ここで m はエッジの傾きを表し、 x - y - z 座標値は図 2 のように定義する。 x は計測方向、 z は奥行き方向、 O はレーザ源を表す。 F_0 はセンサの計測周波数で、 k は任意に決める時系列上での時空間距離画像におけるスキャンの配置間隔である。ここで、時空間距離画像は極座標系でなく、デカルト座標系で表されていることに注意されたい。

以上の手法により、エッジの傾きを得ることができれば移動体の移動速度を求めることができる。本手法はフレーム間の比較を行っていないため、この手法によって、誤差の蓄積を抑えることができる。移動速度を求めることなく、自己位置を推定しようと試みると、フレーム間の比較が必要となり、誤差の蓄積が問題となるが、速度を求めることにより、誤差の分散させることが可能となり、それゆえに正確なモデルを作成することが可能となる。

5. 三次元モデル作成のための自己位置推定アルゴリズム

まず、木登りセンサから距離画像を獲得するアルゴリズムの

概略を示す．アルゴリズムの概略は図 3 の通りである．

- (1) 垂直スキャンを用いて時空間距離画像を作成する
- (2) 時空間距離画像の両端の無意味なデータを削除する
- (3) ソーベルフィルタとベクトルを用いて時空間距離画像からエッジを抽出する
- (4) エッジのラベリングを行う
- (5) 複数のエッジの傾きを主成分分析によって獲得する
- (6) エッジの長さによって重み付けを行う
- (7) 重み付けされた傾きの平均値を求める
- (8) 傾きをセンサの移動速度に変換する
- (9) センサの自己位置を計算する

以上の手順を順を追って説明する．

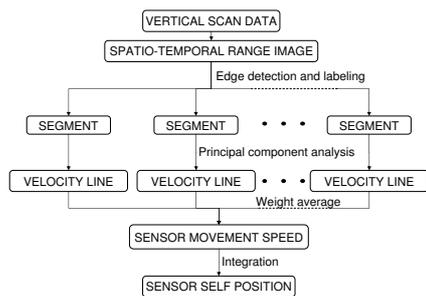


図 3 自己位置推定処理の概略図

5.1 時空間距離画像の作成

2 台のセンサが同時に垂直方向に移動しているため、垂直スキャンから得られるデータからセンサの時系列上での推移を獲得することができる．LMS200 は 1 次元計測を行うため、垂直スキャンから得られるデータを並べていけば、図 4 のような時空間距離画像を獲得することができる．データを並べる間隔は図 4 における y に対応するが、任意に決めることができる．図から見てわかるとおり、時空間距離画像のエッジは顕著に現れている．しかし、計測は移動開始前と移動停止後においても行われていたため、得られる時空間距離画像の両端には無意味なデータが含まれている．センサや同期を取るハードウェアを梯子に装備することによって移動開始点と終了点を検出することは可能であるが、ここではソフトウェア的に前後のフレーム差分をとり、その際が閾値以下であればセンサが移動していないと判断した．

5.2 エッジ抽出

移動時のみのデータから得られる時空間距離画像から、エッジの抽出を行った．これにはソーベルフィルタとベクトルを用いた．

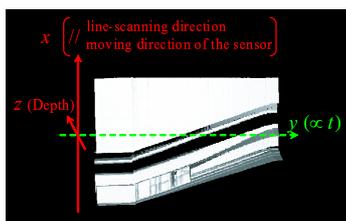


図 4 時空間距離画像

5.2.1 ソーベルフィルタを用いたエッジ抽出

ソーベルフィルタには垂直方向と水平方向の変化を検出する 2 つの行列がある．これらを画像に対し適用すれば、結果から画像のエッジの方向と強さを計算することが可能となる． 3×3 のソーベルフィルタの行列には以下のものを用いた．

$$K_h = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, K_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ソーベルフィルタは通常、濃淡画像に用いられることが多いが、われわれは今回輝度値の代わりに距離値に使用した．1 スキャンから得られるデータは極座標系 $p = (r, \theta)$ で表されているが、簡単にデカルト座標系 $c = (x, y, z)$ に関係式 $x = r \sin \theta$, $z = r \cos \theta$ を用いて変換することができる． y 座標値は時系列上にスキャンを並べる間隔である k を用いることで容易に求めることができる．距離画像 $p = (x, y, z)$ に対し、各計測点は何スキャン目かを表す m と、特定スキャンの中のどの点かを表す n を添え字とし、 $p_{m,n}$ と表すことができる．ソーベルフィルタを $p_{m,n}$ とその点の周りにある 8 点 $p_{m-1,n-1}, p_{m-1,n}, \dots, p_{m+1,n+1}$ に適用することによって、エッジの強さを求めることができる．得られるエッジの強度を閾値と比べることによってエッジを抽出することができる．

5.2.2 ベクトルを用いたエッジ抽出

次に、ベクトルを用いたエッジ抽出を検討する．ここでは注目点とその上下左右の点のなす角度に注目した．図 5 に見られるように、注目点に対し上の点へのベクトルと下と点へのベクトル v_1, v_2 を

$$v_1 = c_{m,n+1} - c_{m,n}, v_2 = c_{m,n-1} - c_{m,n} \quad (3)$$

とし、それらの成す角度を求めた．同様に注目点とその左右の点を結ぶベクトルからなす角度も計算し、それらのいずれかが以下の条件を満たせばエッジとして抽出した．

$$\frac{\pi}{12} < angle < \frac{11}{12}\pi \quad (4)$$

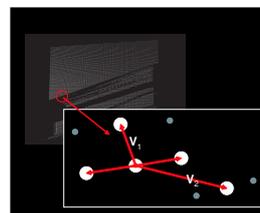


図 5 エッジ抽出の際に使用するベクトル

5.2.3 2 種類のエッジ抽出の組み合わせ

上で記した 2 種類のエッジ抽出方法を組み合わせることで、より精度の高い抽出を行うことを目指した．漏れなくエッジを抽出するために、エッジ抽出の判別条件を甘くし、両手法のエッジ検出でエッジと検出されるものを抽出した．



図 6 木登りセンサで計測を行った箇所

5.3 移動体の速度の計算

エッジの傾きからは移動体の速度を計算することが可能である。梯子型リフトの構造から、センサの移動は直線状にあり、さらにリフトの上下運動はモーターに接続されたウィンチによって行われることから、速度は一定とみなした。しかし、仕様書に記されている速度 $25m/分 = 0.4167m/秒$ を用いるのではなく時空間距離画像から得られる速度を使用することとした。

まず、最初にソーベルフィルタとベクトルを用いて得られた複数個のエッジをラベリングした。ラベリングされたエッジごとに主成分分析し、得られる主成分を用いることでエッジの傾きを導いた。主成分は計測点の共分散行列 Σ の固有値問題として導くことができる。

$$\Sigma U = U \Lambda \quad (5)$$

$$\Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \quad (6)$$

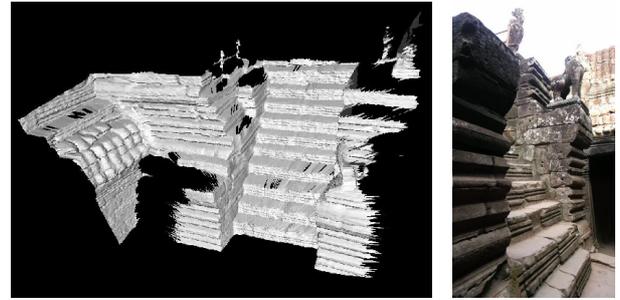
ここで、 x_i はエッジにおける計測点で、 \bar{x} は x_i の平均を表し、 U は主成分ベクトルから成る直交行列、 Λ は固有値行列である。

検出されたすべてのエッジに対し、傾きを求め、移動体の速度を式 (1) により逆算する。ここで、エッジが長ければ長いほど誤差が分散され精度が上がると考えられるので、エッジの長さで重み付けを行い重み付けされた傾きの平均値から速度を求めた。

6. モデリング結果

われわれは木登りセンサを用いてカンボジアのバイヨン寺院の計測を行った。われわれの研究室では数種類のセンサを用いて3年間にわたって寺院の計測を行ってきたが、三次元モデルには計測箇所の空間的制約によってデータを取ることができない場所が残っていた。図6のような、市販のレーザセンサでは空間的制約と視野角の制限から計測が困難であった狭隘部を木登りセンサを用いて計測を行った。上で示したアルゴリズムを用いて、移動体の速度自己位置を推定し、その結果に応じて水平方向のスキャンを並べることによって図7(a)のような三次元モデルを作成することができる。

推定した速度の正確性を確認するために、われわれは木登りセンサから得られる距離画像と地上固定型センサ (CYRAX2500) から得られる距離画像を ICP アルゴリズム [1], [19] を用いて位置合わせした。図8から見てわかるとおり、2枚の距離画像は位置合わせされている。固定センサから得られる距離画像は正確と見なせるため、推定速度の精度も十分に高いと考えられる。



(a)

(b)

図 7 (a) 垂直スキャンから計算される間隔で水平スキャンを並べることにより、獲得された三次元モデル (b) 実際の計測箇所

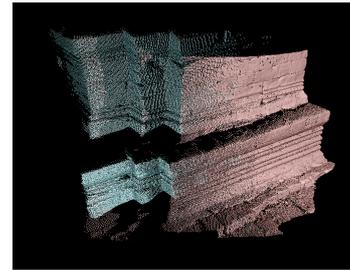
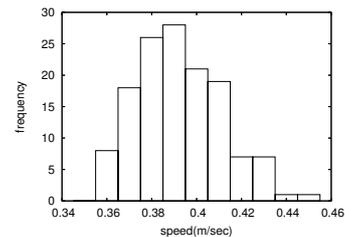


図 8 位置合わせされた距離画像:赤点が地上固定型センサから得られる3次元モデル, 淡青点が木登りセンサから得られる三次元モデル



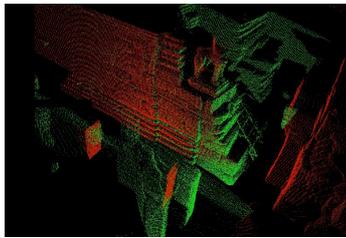
Avg. = 0.387 m/s SD = 0.0190 m/s

図 9 推定速度のヒストグラム

また、速度推定処理の有効性を明確化するために、異なった算出速度を得た計測結果に対して位置合わせを行った。図9が示す通り、スキャンごとに移動速度が少なからず異なることがわかる。これは、梯子が壁に立て掛けられており、その傾きが計測ごとに異なり、移動に伴う摩擦一定ではなく、リフトの移動速度も異なると考えられる。移動速度が異なる場合であっても、図10のように、それぞれの距離画像が問題なく位置合わせされる。計算によって得られる速度のいずれも仕様書の速度とは異なることにも注意されたい。木登りセンサの速度はリフトの状況に大きく影響を受けるが、位置合わせした結果から、われわれが提案したアルゴリズムによって梯子の傾きによらず正確な速度を導くことができたことがわかった。

7. まとめ

本論文では、木登りセンサという新たなセンサを提案した。このセンサを用いることにより、従来の商用センサでは設置箇所の空間的成約や視野角の限界により計測が困難あるいは非常



speed (m/sec)	scan 1 (green)	0.3504
	scan 2 (red)	0.4081
	仕様書	0.4167

図 10 異なる計算速度を位置合わせした結果．速度は約 5cm/s 程異なるが，結果から位置合わせが上手くいくことがわかる

に非効率であった狭隘部を効率的に計測することができる．移動体からの計測における問題点として挙げられる自己位置の推定に関しては，移動方向と平行方向にラインスキャンを行うことにより，誤差を蓄積させず，より正確な速度を求める手法を提案した．

木登りセンサから得られる距離画像と地上固定型センサから得られる距離画像の対応が十分に取れていることから，移動体の速度が十分な精度で算出されていることを確認した．また，木登りセンサから得られる 2 枚の距離画像に関して，算出される速度が異なった場合においても位置合わせされることから算出速度の精度が高いことを確認した．

ほとんどの距離画像では問題なく位置合わせが可能であったが，一部の距離画像には位置合わせすることができないものも存在した．この要因として考えられるのは，エッジ抽出が失敗していることや，エッジの傾きを正確に算出していないことなどが挙げられる．

今後の展開としては，[7] に示される，位置合わせの際に位置と姿勢だけでなく，同時に形状パラメータを求める方法を用いて，現状で位置合わせ不可能な距離画像の位置合わせを行うことを考えている．この手法を用いることにより，同部分を地上固定センサで計測が可能であるという条件の下で，正確な移動体速度とそれに伴う正確な距離画像を獲得することが可能となる．

また，本論文で提案したアルゴリズムはセンサの移動速度を等速であることを必要としていない．このアルゴリズムの主な利点は，時空間距離画像を利用することにより，移動速度を求めることが可能となり，自由に運動する物体の速度を逆算できる点にある．木登りセンサの場合においては，センサが直線的に，さらにモーターを利用して移動していることから，等速を仮定することが妥当であった．さらに発展するためには，移動体が自由運動を行った場合においても速度が逆算可能なより一般化された実装が必要となる．

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」，および日本学術振興会科学研究費補助金 (No.16・10876) の支援により行われた．

文 献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence (PAMI)*, 1992.
- [2] Daisuke Miyazaki et al. The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation. In *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, 2000.
- [3] Katsushi Ikeuchi et al. Bayon digital archival project. In *Int'l Conf. on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM)*, 2004.
- [4] Sebastian Thrun et al. Scan Alignment and 3-D Surface Modeling with a Helicopter Platform. In *The 4th International Conference on Field and Service Robotics*, 2003.
- [5] Shintaro Ono et al. Self-Position Estimation for Virtual 3D City Model Construction with the Use of Horizontal Line Laser Scanning. *International Journal of ITS Research (ITSJ)*, pages 67–75, 2004.
- [6] Yuichiro Hirota et al. DESIGNING A LASER RANGE FINDER WHICH IS SUSPENDED BENEATH A BALLOON. In *Proc. The 6th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, 2004.
- [7] Yuichiro Hirota et al. Flying Laser Range Finder and its data registration. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2004.
- [8] Christian Früh and Avideh Zakhor. Fast 3D Model Generation in Urban Environments. In *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2001.
- [9] Christian Früh and Avideh Zakhor. Constructing 3d city models by merging ground-based and airborne views. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2003.
- [10] S. Clark H.F. Durrant-Whyte G. Dissanayake, P. Newman and M. Csroba. *An experimental and theoretical investigation into simultaneous localisation and map building (SLAM)*. 2000.
- [11] Leica Geosystems HDS. Cyrax 2500. http://hds.leica-geosystems.com/products/cyrax2500_specs_CE.html.
- [12] M. Levoy. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. In *SIGGRAPH*, 2000.
- [13] D. Koller B. Wegbreit M. Montemerlo, S. Thrun. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In *Proc. AAAI National Conf. on Artificial Intelligence*, Edmonton, Canada, 2002.
- [14] S. Thrun M. Montemerlo. Simultaneous localization and mapping with unknown data association using fastslam. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [15] Medicom Corporation. Nobitec Lift NP-4200. <http://www.kss-co.jp/nobitec/lift>.
- [16] Ryan Miller and Omead Amidi. 3-D Site Mapping with the CMU Autonomous Helicopter. In *The 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 1998.
- [17] M. Self R. Smith and P. Cheeseman. *Estimating uncertain spatial relationships in robotics*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [18] SICK AG. LMS200. <http://www.sick.de/de/en.html>.
- [19] Zhengyou Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 13:119–152, 1995.
- [20] H. Zhao and R. Shibaski. Reconstruction of Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners. In *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001.
- [21] Zoller+Fröhlich. IMAGER 5003. http://www.zf-laser.com/e-produktvorteile_hw.html.