Velodyne レーザスキャナを用いた上空からの三次元再構成

塩澤 秀門* 吉田 武史* 深尾 隆則* 横小路 泰義*

3D Reconstruction using Airborne Velodyne Laser Scanner

Hideto Shiozawa*, Takeshi Yoshida*, Takanori Fukao* and Yasuyoshi Yokokohji*

The 3D reconstruction of the terrain by airborne LRF (Laser Range Finder) requires the 3D motion of sensor, however the payload of small airborne platforms, such as radio control models, are highly restricted, and precise inertial motion units are too heavy to be mounted on it. The HDL32E, an LRF recently provided by Velodyne, is light enough to be installed to the airborne vehicle such as a blimp, and has 32 rays for scanning so that it can sense wide range of terrain at one scan cycle which means low dense 3D pointcloud are collected at very short time. This paper proposes the fast and simple method for integrating those low dense pointclouds to high dense pointcloud without any inertial motion sensor. The method uses equal or more than 3 planes not parallel on the terrain, and estimates LRF's 3D motion. The final integration result will be shown after the optimization of laser scanner's motion.

Key Words: Velodyne LRF, 3D Reconstruction, Bundle Adjustment, Plane Information, RANSAC

1. 緒 言

地震などの大規模災害は一度に多くの被災者を生み出し、その際の救助が問題となる。特に地震の場合は建物の崩壊、道路の崩落が起こり、要救助者の発見、救助の妨げとなる状況が生じる。そのため迅速なレスキュー活動が行えず、望ましいとされる3時間以内の救助、または生存率の境とされる72時間[1]以内の救助も難しい。そのため迅速なレスキュー計画の策定に必要な災害後の地形情報の収集が求められている。

地形情報を収集するためには地上の混乱の影響が少ない上空からのセンシングが望ましい。上空からの計測には自動でセンシングを行う UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の研究が行われており、小型飛行機[2]、ヘリコプタ[3]が提案されている。今回の目的では被災者の上空を飛行することを想定しており、さらに綿密な情報収集のために低空飛行が求められる。飛行機、ヘリコプタといった機体はこれらの環境において、トラブル時に大きな事故につながる可能性を持っており、本研究では飛行船を最適なプラットフォームとして採用している。

なお、本研究グループでは、飛行船からの計測とは別に、飛行船の自動制御[4]、自動離着陸制御[5]の研究も行なわれており、実際の運用を想定し、飛行船を操縦できる熟練者がいないことを前提したセンシング環境を構築している。Fig. 1に飛行船、Fig. 2に飛行船に搭載した LRF の外観をそれぞれ示す。

Fig. 1 Blimp

Fig. 2 LRF system

飛行船に搭載するセンサとしては、Velodyne 社の製品 HDL32E を LRF (Laser Range Finder) として採用した。通常の LRF は、1本のレーザを使用した回転走査によりセンサ中心から周囲への距離情報を収集する。したがって得られる情報は二次元的な広がりを持ったデータとなり、レーザの回転軸方向の情報は得られない。それに対して HDL32E では32本のレーザを使用した回転走査を行う。32本のレーザによって従来の LRF では得られなかった回転軸方向に広がりを持った情報も得ることができる。この三次元的な広がりを持った点を多

原稿受付 2013年1月21日

*神戸大学

*Kobe University

■ 本論文は学術性で評価されました。

数計測できる特徴に加え、さらに HDL32E は Velodyne 社製の過去の製品 (13 [kg]) に比べて非常に軽量 (2 [kg]) という特徴がある。本研究ではこれらの特徴に着目して HDL32E を使用している。

三次元再構成は各瞬間で得られた計測点を統合することによってなされる。その統合のため、計測中における機器の位置・姿勢といったモーション推定が課題となる。本論文では、この推定に環境中の平面情報を利用する。これは阪神大震災などの震災で建造物が全壊した状況であっても、倒壊した家屋の一部や道路などには平面が存在しており、震災後であっても十分に利用可能な情報と考えられるためである。

本論文では従来の関連研究との関係を説明した後、計測したデータから平面情報の検出・対応付けについて説明する。本研究は平面の情報を使用して位置・姿勢の算出を行うため、この平面検出・対応付けの部分が基礎の部分となる。次に連続した 2 回の計測について、その間に生じた位置・姿勢の変位量を平面情報から算出する。この変位量は計測間の相対的な変位量となるため、これを絶対座標系における変位量に変換して全体最適化処理を行う。最後に、実験結果では全体最適化の効果をシミュレーションと実験値の両方から示す。

2. 関 連 研 究

三次元再構成を行う手法には、大きく三つ、カメラを用いた方法、カメラと LRF の両方を用いた方法、LRF とその位置・姿勢を求めるための高精度 GPS/IMU (Inertial Measurement Unit) などの外界/内界センサを用いた手法が挙げられる。どの手法においても、計測中における計測機器の位置・姿勢量を推定することが重要な要素となる。

カメラのみを用いた手法ではステレオカメラによる手法 [7] [8] が多く用いられる。カメラを用いた手法では密な情報が得られるため、被災情報の収集手段として望ましい側面を持つ反面、通常のレンズを用いた場合では、センシングできる領域が LRF に比べると比較的狭い領域に限られるという問題がある。

一方、単眼カメラであっても、同一の対象物体を複数枚撮影した画像群から対象の三次元情報を再構築する Bundle Adjustment [9] [10] が提案されている。これは視点の位置・姿勢、計測対象の三次元的構造を粗く求め、それを初期値として視点位置・姿勢と三次元物体の構造とを同時に最適化する手法となる。単体カメラで実行できるため、計測が容易であり有用な手法と考えられるが、処理コストが大きくなるために大規模な三次元再構成を迅速に行うという側面からは課題が残る。

また、カメラと LRF の両方を使用する手法 [11] も提案されている。この手法ではカメラとレーザをバルーンに搭載した FLRF (Flying Laser Range Finder) を開発している。FLRF の単眼カメラを使用したモーション推定 [12] を初期値にし、FLRF の運動を複数の拘束条件を設けることで最適化処理を行う。ここで使用されている LRF は 1 本のレーザを 2 面の鏡面にて反射させ、その両鏡面を回転させることで三次元的な計測を行っている。そのため三次元情報の測定に比較的多くの時間を要しており、この時間の間に生じるバルーンの動きを補正するための手法となっている。

Fig. 3 Example of 3D range data

Table 1 LRF specification

Product Name	HDL32E
Measurement Range	1~70 [m]
Laser/Detector	32 pairs
Virtual Field of View	+10.67~-30.67 [deg]
Horizontal Field of View	360 [deg]
Accuracy	<20 [mm] (one sigma at 25 [m])
Frame Rate	10 [Hz]
Laser Class	Class 1 (eye safe)
Wavelength	905 [nm]
Measurement Method	Time of Flight

LRF と外界/内界センサ (GPS/IMU) を使用してセンサの三次元的な動きを計測する手法は、広く航空計測において用いられている。ただし、この場合に使用される GPS/IMU などの POS (Position and Orientation System) は非常に高精度なものが要求され、角度の要件などは 0.02° の誤差が望ましいとされる。このような高精度の POS は重量が重いものが多く、飛行船のペイロードの制約、安全面、運用面を考慮すると、このようなセンサを付加的に搭載することは難しい。

また、HDL32E が三次元的な情報を取得するため、ICP (Iterative Closest Point) [10] [13]~[16] の使用も考えられる。この手法は、二つの重複する領域のある点群に初期位置を与え、最も近い点をさらに近づけるという処理を繰り返すことで二つの点群の統合を行う。ここで、Fig. 3 に 1 回のスキャンによって得られた LRF のデータ例 (以下、1 回のスキャンによって得られたデータを 1 フレームと呼ぶ) を、Table 1 に Velodyne HDL32E の性能を示す。図は計測点が多数プロットされたものになっており、一見して線のように見えるラインは測定点の集合からなっている。HDL32E が 32 本のレーザを使用するため、計測データもレーザの本数分だけの線が並ぶ形となる。また飛行船の進行方向は、線の方と垂直の方向に進む形になっている。この場合、望ましい統合は、Fig. 3 のような点が飛行船の進行方向に少しだけずれた位置に配置されることである。しかし ICP は点群同士の点対点の対応を求めて統合を行うため、点が密集している線を一致させるように繰り返し計算がなされてしまう。

この ICP の問題に対し、その発展形として点対点の対応でなく、点对平面の対応 [10] [15] [17] を使用する方法もある。これは点の局所的な周辺点から算出した法線ベクトルを用いて、点ほどの局所的な対応でなく、周辺の勾配情報を利用した比較的広い範囲での対応をとる手法となる。しかし、この方法であっても今回の LRF の点群に用いるには適していない。Fig. 3 を見ると、計測ラインの方向と、それに垂直となる方向とでは計

Fig. 4 Flow chart

測点の疎密の差が非常に大きいことが分かる。法線ベクトルを求めるためには最低でも二次元的な広がりを持った点群が必要となるが、このデータでは局所領域では点群は一次元的な広がりになり、二次元的な広がりを持つ点群を範囲指定すると局所的な領域でなくなる。このトレードオフに加えて、今回のデータ点の疎密は測定位置によっても大きく異なるという問題もある。Fig. 3 のラインの間隔は一定ではなく、さらにライン上であっても場所に依じて点が疎な場所と密な場所がある。局所領域の法線ベクトルを求めたとしても、データによって、その法線ベクトルの精度が大きく異なり、多数のフレームを扱った際に安定した結果を出力することは難しい。

本研究では、これらの問題を回避し、計測したデータの中の平面情報を利用した統合を行う。計測環境中に平行でない 3 面以上の平面が計測されていることを前提とし、計測した 1 フレーム中の 3 平面を用いて幾何学的性質から隣接するフレーム間の相対的な位置・姿勢量の計算を行う。さらに、この位置・姿勢量を初期値とし、Bundle Adjustment を使用した全体最適化処理を行う。最後に最適化された位置・姿勢により、元の疎な点群を密な点群に統合して三次元差構成とする。Fig. 4 に、以上で説明した本研究での処理の流れを示す。

3. 平面の検出・対応付け

平面の情報は同次座標系の 4 要素 3 自由度のベクトルとして扱う。同様に三次元上の点座標 $\mathbf{X}^T = [X \ Y \ Z]$ も同次座標系として $[\mathbf{X}^T \ 1]^T$ として扱う。この場合、平面と点の関係は、

$$\mathbf{P}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

となる。なお、ここで $\mathbf{P}$ は $\mathbf{P} = [\mathbf{N}^T \ b]^T$ と分解でき、 $|\mathbf{N}| = 1$ のときに、この最初の 3 要素 $\mathbf{N}$ は平面の法線ベクトル、最後の 4 要素 b が平面の位置を示すバイアス量となる。ベクトル $\mathbf{N}$ と b の三次元空間上の概念図を Fig. 5 に示す。図中上部にある座標系の原点が LRF のセンサ中心を示しており、 $\mathbf{N}$ と b が、それぞれ平面の傾きと原点からの距離を表していることが分かる。

3.1 平面の検出

まず計測された 1 フレームに存在するすべての平面ベクトル $\mathbf{P}$ を算出することを目的とする。1 フレーム中には複数の平面が含まれているため、一つの平面に着目すると他の平面を

Fig. 5 Normal and bias

構成する点群はノイズとして考えるべき情報となる。このようにノイズが多い環境に適した手法として、ここでは RANSAC (RANdom Sample Consensus) を用いたロバストな手法を使用する。

RANSAC では最初にランダムに同一直線上にない 3 点をサンプリングする。この 3 点によって特定される平面を暫定的に決定し、暫定平面が他の点群とどの程度の一致度 (Consensus) を得ているかを計算する。この一致度を評価指標とした上で、ランダムに選択、暫定平面の算出、評価を繰り返し、最終的に最高評価を得た平面を点群と適合する平面として抽出する。この手法は繰り返し計算のために処理コストが高いが、外れ値を除外した評価を行うことができるため処理結果はロバストになる。

ランダムにサンプリングした 3 点を通る平面 $\mathbf{P}$ の計算では、サンプリングした点 $\mathbf{X}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ ($i = 1, 2, 3$) を並べた行列

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

を用意し、 $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ の最小固有値に対応する固有ベクトルとしてベクトル $\mathbf{P}$ を求める。なお、この計算では上記の法線ベクトルとバイアス量の関係が保持されないため、算出後に $\mathbf{P}$ の法線部のノルムが 1 となるように正規化することで、バイアス量が物理的な意味を持った値になる。

次に一致度として、フレーム内の全点群に対して式 (1) に基づき内積を計算する。正規化後の $\mathbf{P}$ に対して、ある点との内積を計算した場合、計算結果は平面とその点との距離に相当する。計算値が完全に 0 となることはないため、ここで閾値を設けて平面と一致しているかを判別する。なお閾値は、HDL32E が 25 [m] の距離で誤差 ± 20 [mm] 以内という性能と、飛行船からの計測は上空 30~40 [m] の距離であることを考慮し、40 [mm] と設定している。検出された平面上にある点をフレーム内の点群から除外し、他の平面を繰り返し求める。

ここでの処理の目的は平面を抽出することにあるが、後の処理のためには、平行でない平面を多く抽出することが重要となる。平行度合いは平面同士のなす角で表せるため、点との一致度の高い平面のみを抽出するのではなく、先に抽出した平面とのなす角が大きい平面を抽出することが重要となる。つまり、 $\mathbf{P}_{new} = [\mathbf{N}_{new}^T \ b_{new}]^T$ を新たな平面候補として、すでに検出された平面との比較を行う。すでに検出された平面の法線 $\mathbf{N}_{exist}$ とのなす角を θ とすると、 $|\mathbf{N}_{exist}| = 1$ 、 $|\mathbf{N}_{new}| = 1$ から $\cos(\theta) = \mathbf{N}_{exist}^T \mathbf{N}_{new}$ となるため、この値を基準とした選別を

Fig. 6 Result of plane detection

行う。角度による選別を導入することで先に平行でない平面を優先的に検出することができる。ここでは角度 45 [deg] を閾値として使用した。

3.2 平面グルーピング

1 フレーム内の平面検出が行えた次の処理では、隣接するフレーム間での平面の対応付けを行う。ここでの処理で誤対応が生じると、後の処理に大きな影響を及ぼし得る。

求めた平面ベクトルには特徴的な情報は含まれておらず、その法線方向と原点からの距離からなるベクトル情報となる。この情報から平面の対応付けを行うことは本来困難であるが、ここでは各フレームにおいてフレーム間の動きが微小なものであると仮定して対応付けを行う。なお、HDL32E のスキャン周期は 10 [Hz] であり、最大 5 [m/s] の速度で移動する飛行船に対する仮定としては十分なものとなる。

Fig. 6 に平面検出を行った結果を示す。これは Fig. 3 の点群に対して 3.1 節の平面検出処理を行った結果となり、同一平面の領域を区分したものになる。ここでは地面の領域に着目する。地面として検出された平面は、図中の A, B の領域となる。すなわち、このデータ例では地面に二つの平面が検出されていることが分かる。これは実験環境において、地面の領域にアスファルトで舗装された領域とそうでない領域とが混在しており、さらに草などが点在していたことが原因と考えられる。

これは 1 フレームにおいて平面検出をした例となるが、次のフレームにおいては地面が一つ、もしくは三つ以上の平面が地面から検出される可能性も高い。このようにフレーム間において平面の面数には過不足が生じ得るため、これが誤対応の原因となる。

この問題に対して、似た位置・角度となる平面が複数求めた場合、それらの平面を一つの平面として算出し直す方法が考えられる。しかし、似た平面が複数得られた背景には計測環境中の（草などの）問題が含まれている可能性を考慮すると、環境の問題によって得られた平面を平均化して統合することは平面ベクトルそのものの検出誤差を生み出すことにつながる。

先に述べたとおり、類似する平面ベクトルの中から適した対応付けを行うことは困難である。ここでは 1 対 1 の対応は付けず、類似した平面のグルーピングを行い、グループ同士の対応を行うのみで留める。後に誤対応の可能性を考慮した処理を施す際に、ここでのグループ対応を利用する。なお、グループの対応付けには、平面の代表点 $\mathbf{p}$ を用いる。ここでの代表点とは、原点から平面への垂線と平面との交点 $\mathbf{p} = -b\mathbf{N}$ のことを指す。代表点の近い平面同士をグループとし、さらにグループ内の最もコンセンサスの高い平面の代表点をグループの代表点とする。隣接フレームとの対応付けもグループ代表点の近いもの同士を対応付ける。本研究の前提から、ここでの処理結果では三つ以上のグループが生成・対応付けされているとする。

4. フレーム間の位置・姿勢推定

前章において、平面の 1 対 1 の対応付けは行っていないが、ここではまず平面の対応を用いて幾何学的性質から 2 フレーム間の位置・姿勢の変位量を推定する方法について説明する。実際の計算では対応付けが必要になるため、計算段階で対応付けを行いつつ最適な位置・姿勢変位量を計算する。これを繰り返すことで、全フレームにおける位置・姿勢の推定が可能になる。なお、ここでは簡単のために 2 フレーム間における位置・姿勢の推定について説明する。

以下では、最初に計測中心の位置・姿勢と平面との幾何学的な関係について説明し、次に、その算出方法、最後に、平面の対応付けを考慮した処理について説明する。なお、ここでの表記では、1 フレームめの情報を通常の文字で、隣接する 2 フレームめの情報をダッシュ付の文字で表す。

4.1 平面と位置・姿勢の関係

3 面以上の平面の対応が求められているとすると、フレーム間における相対的な位置・姿勢の変位量は幾何学的な関係から求めることができる。仮に 1 フレームめの点 $\mathbf{X}$ が 2 フレームめの座標系において観測されたとすると、その位置 $\mathbf{X}'$ は、

$$\mathbf{X}' = R\mathbf{X} + \mathbf{T} \quad (3)$$

として表される。ここで、 R は第 1 フレームから第 2 フレームへの回転量を表す 3×3 の回転行列、 $\mathbf{T}$ も同様に第 1 フレームから第 2 フレームに移動する 3×1 の平行移動ベクトルとなる。これに加えて、式 (1) の内積の関係より、ある平面 $\mathbf{P}$ と、その次のフレームで対応する $\mathbf{P}'$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} &= \mathbf{P}'^\top \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{P}'^\top \begin{bmatrix} R\mathbf{X} + \mathbf{T} \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{P}'^\top \begin{bmatrix} R & \mathbf{T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

という関係になり、3 章で述べた $\mathbf{P}^\top = [\mathbf{N}^\top b]^\top$ の関係から、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^\top \mathbf{N}' \\ \mathbf{T}^\top \mathbf{N}' + b' \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。さらに要素ごとの対応は、

$$R^\top \mathbf{N}' = \mathbf{N} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}^\top \mathbf{N}' = b - b' \quad (7)$$

となる。平面ベクトル $\mathbf{P}$ は 1 フレームにつき 3 面以上求めてあるため、複数の法線ベクトル $\mathbf{N}_i$, $\mathbf{N}'_i$ と、バイアス量 b , b' を用いて、式 (6) から回転行列 R を、式 (7) から平行移動量 $\mathbf{T}$ を推定する。

4.2 位置・姿勢の推定方法

3 章によって 3 面の平面が検出されていたとすると、それらの法線ベクトルとバイアス量を用いて式 (6) は、

$$\begin{bmatrix} N_1^T \\ N_2^T \\ N_3^T \end{bmatrix} R = \begin{bmatrix} N_1^T \\ N_2^T \\ N_3^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

として表せ、逆行列によって R を算出することができる。また同様に、式 (7) は、

$$\begin{bmatrix} N_1'^T \\ N_2'^T \\ N_3'^T \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} b_1 - b_1' \\ b_2 - b_2' \\ b_3 - b_3' \end{bmatrix} \quad (9)$$

と表せ、この T も R と同様に逆行列によって計算することができる。

4.3 対応付けを考慮した処理

3.2 節で求めた平面のグループ同士の対応では、4.2 節の計算は行えない。しかし平面ベクトル自体は特徴的な要素を持たず、対応付けたとしても、その対応が正しいものか判断することも難しい。ここでは RANSAC を再び使用する。RANSAC にはノイズにロバストという特徴のほかに、コンセンサスという評価基準を設定できる特徴がある。

前節の位置・姿勢推定に必要な平面の数は 3 平面となる。ここでの RANSAC ではランダムサンプリングを行わず、3 平面の対応付けとして、考え得るすべての組み合わせに対して暫定的な R , T を算出する。その算出結果が正しいものであれば、他の平面ベクトルにおいても適切な変換が行われるため、平面の代表点 p の隣接フレーム間の最近傍点誤差が小さくなる。これをもって平面の組み合わせの評価基準とし、同時に R , T の評価としても扱う。

この方法は一見、組み合わせパターンが膨大となるように思えるが、今回のデータにおいては 2 フレーム間に共通して得られる平面数は 6~10 面程度となっている。そのうちの 3 平面を抽出したすべての組み合わせを考えてもその数は ${}_{10}C_3 = 120$ 程度となり、組み合わせ数は少ないことが分かる。また 3.2 節において求まっているグループ対応の制限により処理回数さらに少なくなる。加えて、 R , T の推定に必要な平面は平行でないことが条件であるため、法線ベクトルを並べた行列

$$B = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

を用意し、この行列式の値の絶対値を基準とした選別も行う。なお、 $|\det(B)|$ の値の閾値としては 0.9 を使用した。

この処理によって、最も評価の高い R , T と、最適な平面の組み合わせを得ることができる。これらの情報は次の全体最適化処理に利用される。

5. 全体最適化

4 章で求めた R と T はフレーム間の相対的な位置・姿勢情報である上に、逐次的な計算によって誤差が蓄積し、位置・姿勢情報はフレームを追うごとにドリフトしていく。この問題に対して、本研究では Bundle Adjustment [9] [10] を使用した全体最適化を行う。

Bundle Adjustment は、主に画像に対して用いられる手法であるが、最近においては、より一般的な誤差の最小化問題を定

式化する方法と考えられている。ここでは観測値と推定値の誤差関数を定義した後、初期値を設定することによって計算する。

ただし、位置と姿勢の推定においては、両者が微小な値である場合は、その変位は位置と姿勢のどちらか一方のみを用いても、ある程度再現できるという特徴がある。これは今回のような微小な変位を最適化する際に、互いに干渉し合う位置と姿勢の最適化を分けて実行する必要性を示唆している。本研究では、姿勢角の情報のみを全体最適化して求めた後、その結果を用いて T_w を推定し直す。なお、添字の w は絶対座標系としてのワールド座標を表しており、第 1 フレームの LRF 座標系をワールド座標系として設定する。

平面ベクトル、各フレームの位置・姿勢情報をまとめたベクトルを q とすると、最小化する関数 $E(q)$ は、

$$E(q) = \frac{1}{2} \|e(q)\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m e_k^2 \quad (11)$$

と表される。ここで、 $e(q)$ は、観測値と推定値の誤差を表すベクトル関数、 m は $e(q)$ のベクトルの次元数、 e_k はベクトル関数 $e(q)$ の要素となる。

Bundle Adjustment では各フレームの姿勢だけでなく、ワールド座標中の真の平面も最適化して推定することになる。ここではワールド座標中における真の平面を推定平面と表記する。この推定平面の法線を各フレーム座標系のベクトルに変換し、実際に計測された平面の法線ベクトルと差分をとることで誤差を定義する。つまり式 (11) の e_k の内、1 から 3 番めの要素を表すと、

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = N_{w1} - R_{1w} N_{11} \quad (12)$$

となる。ここで、 N_{w1} はワールド座標系における第 1 番めの平面に対する推定法線ベクトル、 N_{11} は第 1 平面を 1 フレームめの座標系で観測した観測法線ベクトル、 R_{1w} は 1 フレームめの座標系からワールド座標系への回転を表している。推定法線ベクトル N_{w1} と $R_{1w} N_{11}$ は、ワールド座標系における同一な平面の法線を表している。このうち N_{11} は 3.1 節においてすでに算出されており、式 (12) に対する推定対象となるパラメータは、 N_{w1} に対して 3、 R_{w1} に対して 3 の計 6 パラメータとなる。4 番め以降の e_k についても、 N_{12} , R_{w1} , N_{w2} を用いて同様の形をとり、 $e(q)$ はすべての観測平面と推定平面の誤差を列挙したベクトル関数となる。簡単のため、Fig. 7 に二

Fig. 7 Schematic 2D diagram for optimization

次元の図でパラメータ同士の関係を示す。ワールド座標系と、 i 番めのフレーム座標系は異なるため、同じ平面に対する法線ベクトルであっても、その方向は異なる。図では実線で示す法線ベクトルは実線の座標系で、破線の法線ベクトルは破線の座標系で見ることになる。 i 番めのフレーム座標系を回転 R_{iw} にて変換し、式 (12) の式によって誤差を定義する。この図では一つの平面についての図となるが、 i 番めのフレームにあるすべての平面に対して、この誤差を列挙し、それを全フレームに対して繰り返す。そのため、その誤差ベクトルは、 i 番めのフレームで計測された平面の数を a_i 、フレームの総数を b とすると、 $m = 3 \sum_{i=1}^b a_i$ の要素数となる。推定対象となるパラメータ数は、ワールド座標中に存在する平面 (推定平面) の数を c 面とすると、 $3c + 3b$ となる。この問題の解法は複数提案されているが、本研究では Levenberg-Marquardt 法を使用する。

なお、回転行列 R_{iw} ($i = 1, 2, \dots$) は 9 要素の行列であるが、その自由度は 3 となる。これは Rodrigues の公式によって表現する。

Bundle Adjustment では計算の最初に初期値を設定する必要があるため、4 章において算出された姿勢情報を初期値として設定する。この初期値はワールド座標系における姿勢角であり、1 フレームめの LRF 座標系をワールド座標系と設定しているため、他のフレームは 1 フレームからの相対姿勢の蓄積で設定する。また推定平面の初期値については、各平面が初めて観測されたときの観測値をワールド座標系に変換したものを使用する。

位置の変位量 T_{iw} は最適化された真の平面の法線ベクトルを用いて各平面のバイアス量 b を算出し直した後、式 (9) によって再計算する。

以上で各フレームにおける R_{iw} 、 T_{iw} が算出された。これにより、式 (3) を用いてフレームの点群を一つの座標系に統合し、三次元再構成を行う。

Bundle Adjustment は計算時間が課題とされることが多いが、本手法ではフレーム中で抽出した平面を評価式として使用している。そのため、その評価式は観測した平面の数に応じて増える。フレーム数や環境によって平面の数は変化するが、今回のデータを例にとると、100 フレームほどの統合で使用した平面の総数は 200 程度となった。一方、画像では 5M ピクセルの画像 100 枚で、評価式となる特徴点の数が 40 万点を超える値になり、計算量が大きく異なることが分かる。

6. 実験

フレーム間の位置・姿勢推定は幾何学的関係から一意に求めるため、その推定結果は平面の検出性能に依存することになる。ただし平面の検出に誤差は必ず生じ、誤差を低減する処理にも限界があるため、全体の精度に大きく貢献するのは全体最適化処理となる。以下ではシミュレーションにより Bundle Adjustment の全体最適化の結果を示し、屋外実験にて実測したデータにより三次元再構成の結果を示す。

6.1 シミュレーション実験

Bundle Adjustment による最適化処理の精度を検証するシミュレーションを行う。位置・姿勢に関する初期値は式 (8)、(9)

Fig. 8 Simulation result

にて計算されているとし、その値を初期値として最適化を行った場合をシミュレートする。

シミュレーションでは、仮想的に地面と、地面に対し 50° 以下の角度をなす 7 平面を設定する。これは地震などの災害によって倒壊した建築物の平面を想定したものになる。これら平面に対して LRF 中心の真の位置・姿勢を設定する。この真値に対して 0 を中心とした正規分布に従うノイズを加えて位置・姿勢推定の初期値とし、また観測されていると想定する平面群に対しても、真の平面ベクトルを基準に同様な正規分布に従う誤差を与える。なおフレーム数は 30 フレームと設定した。

Fig. 8 にシミュレーション結果を示す。グラフの線は真値に対する誤差をグラフ化したものになる。破線は初期の推定誤差を示しており、実線は最適化後の推定誤差を示している。本手法では回転量の推定精度を高めるために平行移動量の最適化は行わない。したがって Fig. 8 も回転に対するシミュレーション結果を示している。なお三次元回転量は、回転の中心回転軸と、その軸周りの回転量として表現できる。さらに微小な回転量の場合は、回転中心軸の方向の誤差よりも回転量の大きさの方が支配的な影響を及ぼすため、Fig. 8 では回転量の誤差を示している。

ここで、初期値の誤差平均が $14.2 [\text{deg}]$ であることにに対し、推定値の誤差平均は $11.4 [\text{deg}]$ となっている。この平均値では大きな改善は確認できないが、Fig. 8 から、初期値の誤差はフレームが進むにつれ誤差の蓄積により大きな変動を持つことが確認できる。一方、推定値の誤差は一定の値に収まっている。三次元上の回転誤差は回転量だけでは確認できないため、推定後の回転軸と真値との誤差について確認したところ、真値より一定のオフセットを保った形で最適化されていることを確認した。このオフセットを修正した場合の平均誤差は $2.2 [\text{deg}]$ となっている。真値からのオフセット量を推定することは現実には不可能となる。しかし三次元再構成に求められる推定では、真値そのものではなく、真値と同様の変化を推定することが重要となる。このことから、全体で安定した最適化が行えていると結論付けることができる。

6.2 屋外計測実験

飛行船からの計測実験を鹿児島市七ツ島にある株式会社 IHI 場外離着陸場にて行った。施設内に一軒家程度の大きさを持った建物があり、その建物の上空を飛行船で飛行しながら地表の計測を行った。高度は約 $30 [\text{m}]$ 、速度は $1 \sim 5 [\text{m/s}]$ の速度で計

測した。実験環境の全体図を **Fig. 9** に示す。これは実験環境を上空からの視点で表した概略図であり、図中の番号 1 の矢印は飛行船が辿った経路、番号 2 および 3 は環境中の建築物、番号 4 は点在する樹木の植え込みやフェンス、番号 5 は実験によって計測された領域であり、番号 6, 7 は後に示す全体の統合結果の視点と方向、番号 8~10 は後に示す局所的な統合結果の領域となる。LRF は飛行船の下部に取り付けられ、飛行船の鉛直下向き方向より飛行船前方へのピッチ角を持たせた形で設置されている。そのため番号 5 の領域のように飛行船の前方方向が広く計測される。また、番号 2 の建物の外観を **Fig. 10** に示す。この建物は高さ 3 [m] 程度の平屋建てのものであり、**Fig. 3** にて計測されている構造物はこの建物にあたる。また、番号 3 に相当する建物は高さ 30 [m] を超える IHI 保有の格納庫であ

Fig. 9 Experimental field

Fig. 10 Measured object

り、その外観は **Fig. 1** の背景として確認できる。これは後の実験結果で示される特徴的な構造物となる。フレーム統合実験に用いるフレーム数は約 100 フレームであり、その計測時間は約 10 [s] である。

まず 3, 4 章の処理にて、各フレームにおける相対的な位置・姿勢の情報を用いたフレーム統合結果を **Fig. 11** に示す。統合結果は三次元情報として得られるが、この結果は、統合した三次元情報を **Fig. 9** の番号 6 の矢印の視点から、地面を水平になるように表示した結果となる。そのため地面の領域は線状に表示されるはずであるが、図中の左下に見られるように、地面が一致しておらず、複数のフレームが間違った角度によって統合されていることが分かる。これは逐次的な推定によるドリフトが原因となっている。

この結果を初期値として 5 章による最適化を行い、その位置・姿勢情報を用いたフレーム統合結果を **Fig. 12 (a)**, **12 (b)** に示す。**Fig. 12 (a)** は **Fig. 11** と同じ視点から表示した結果であり、**Fig. 12 (b)** は **Fig. 9** の番号 7 の矢印の視点からの近景となる。**Fig. 12 (a)** からは初期推定の統合では一致していなかった地面の領域が線状に表示されていることが分かる。また **Fig. 12 (b)** からは建物屋根などの構造が再現されていることが確認できる。しかし一部、外れた位置に統合されているフレームも見受けられる。全体としては、最適化処理によって位置・姿勢の推定結果が大きく改善されていることが分かる。

なお **Fig. 12 (a)** の中央部にある建物が **Fig. 10** の建物となり、その右側に格納庫、左側には樹木の存在が確認できる。

統合結果の一致度を評価するため、地面の平面に対して、全フレームの法線ベクトルとバイアス量の偏差量を示す。全フレームのワールド座標系における法線ベクトルの角度偏差の平均は 0.45 [deg]、バイアス量の標準偏差は 68.70 [mm] となった。ただし法線ベクトルについては標本平均として全フレームの地面に対する法線ベクトルの算術平均を使用し、標本平均ベクトルと観測ベクトルのなす角を角度偏差としている。また局所的な

Fig. 11 Frame integration using initial estimation

Fig. 12 Frame integration after optimization

Fig. 13 Local point cloud

統合結果として、Fig. 13 に Fig. 9 の番号 7～9 の小領域を拡大した図を示す。この図は各領域の点群を切り出し、地面を水平になるように表示した図になる。各平面は、幅約 15 [m]、奥行き約 6 [m] となるように切り取っている。Fig. 13 (a)～13 (c) の点の密度が異なるのは、統合される際に使用されたフレーム数が全領域の両端では少なくなるためである。Fig. 13 (a), 13 (b), 13 (c) におけるデータ点数はそれぞれ約 6,000, 31,000, 4,000 点となる。このうち Fig. 13 (b) に着目すると、他の統合された平面と比べて、離れた位置に配置された 2 平面が確認できる。その他多数のフレームが集中している平面群の最上面と最下面との距離は約 0.3 [m] であり、Fig. 13 (b) にて outlier と記された平面は最下面から約 1.0 [m] の距離を持った位置に配置されている。なお、再構成された領域の全体面積は約 3,950 [m²] であった。

使用した Velodyne HDL32E では、秒間 700,000 点程度の計測点を 10 [Hz] でスキャンするため、1 フレームの点群総数は 70,000 点程度となる。しかし、今回の実験では LRF を Fig. 2 のように飛行船下部方向に設置しているため、360 [deg] の回転計測範囲のうち 30～40% 程度の情報を使用している。以上において、iMac (Intel Core i7 2.93GHz 64bit, メモリ 8 [GB]) を用い、数値計算ソフトウェア MATLAB による計算で処理時間は約 20 分であった。

7. 結 言

本研究では、Velodyne 社製の 32 ラインを一度に計測する LRF を用いた場合のフレーム統合の手法として、LRF の情報のみを利用し、平面情報に基づくフレーム統合手法を提案した。まず RANSAC を用いた平面検出により、各フレーム内で計測されている平面の情報を算出し、その平面情報によってフレーム中の相対的な位置・姿勢の変位量を推定した。この結果は誤差を多く含み、さらに相対的な変位量のため絶対座標からすると誤差が蓄積していくという問題がある。この問題に対処するために、相対的な推定値を初期値とした Bundle Adjustment による全体最適化処理を行った。ここで微小な変位量を精度良く推定するため、全体最適化では回転情報のみの最適化を行った。最終推定結果を利用して平行移動量も求め、それらの情報から全フレームを統合して三次元情報を再構成した。実験結果では最適化処理が有効に誤差を修正することを示し、三次元再構成結果も良好であることを示した。

本手法の処理時間 20 分中の約 12 分ほどを平面検出に費やしている。これは RANSAC を導入する際に、あらかじめフレーム間にある平面の数、その平面を構成する点の割合などが不明なため、RANSAC による繰り返し計算を多く設定していることに起因する。一方、シミュレーションにて災害時を想定した状況においても全体最適化が有効性であることを示した。しか

し倒壊した建物の側面が通常時に比べて小さく、また多くの平面が検出され得ることを考慮すると、平面検出のロバスト性および高速検出についての検討が必要と考えられる。また本手法は平面情報を用いることが前提となっているが、実際の災害現場では場所によって平面の少ない場所が点在することもある。その小領域を計測したときに統合できるフレームが途切れてしまうため、途切れて再構成された複数の三次元モデルを再統合する手法の考案も課題となる。

本論文では GPS/IMU などの別センサを使用しない形での報告を行った。これにより複数本レーザの LRF のみによる三次元再構成の可能性を示している。今回用いた LRF は三軸センサ、GPS が内蔵されており、それらのデータを用いることで、処理をより簡便に、高速に行うことも考えられる。

謝 辞 本研究は、(財)セコム科学技術振興財団、(公財)JR 西日本あんしん社会財団の助成により実施した。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構：“レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発”，大都市大災害軽減化特別プロジェクト，III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化，（平成 17 年度）報告書，2006。
- [2] H. Bendea, P. Boccardo, S. Dequal, F.G. Tonolo, D. Marenchino and M. Piras: “Low Cost UAV for Post-Disaster Assessment,” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp.1373–1380, 2008.
- [3] S. Thrun, M. Diel and D. Hahnel: “Scan Alignment and 3-D Surface Modeling with a Helicopter Platform,” The 4th International Conference on Field and Service Robotics, 2003.
- [4] H. Saiki, T. Fukao, T. Urakubo and T. Kohn: “Hovering Control of Outdoor Blimp Robots Based on Path Following,” Proc. 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp.2124–2129, 2010.
- [5] H. Saiki, T. Fukao and T. Kohn: “Automatic Landing Control of Outdoor Blimp Robots,” 9th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2009), 2009.
- [6] D.C. Herath, S. Kodagoda and G. Dissanayake: “Simultaneous Localisation and Mapping: A Stereo Vision Based Approach,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.922–927, 2006.
- [7] T. Yoshida and T. Fukao: “Dense 3D reconstruction using a rotational stereo camera,” 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.985–990, 2011.
- [8] H. Badino and T. Kanade: “A Head-Wearable Short-Baseline Stereo System for the Simultaneous Estimation of Structure and Motion,” IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA), 2011.
- [9] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: ‘Bundle adjustment—a modern synthesis,’ Vision Algorithms: Theory and Practice. pp.298–375, Springer, 2000.
- [10] 岡谷貴之、八木康史、斎藤英雄：コンピュータビジョン最先端ガイド 3. pp.1–66, アドコム・メディア, 2010.
- [11] A. Banno, T. Masuda, T. Oishi and K. Ikeuchi: “Flying Laser

Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Application in Bayon Digital Archival Project,” International Journal of Computer Vision, vol.78, pp.207–222, 2008.

- [12] M. Han and T. Kanade: Perspective factorization methods for euclidean reconstruction, Technical report in Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-99-22, 1999.
- [13] P.J. Besl and N.D. McKay: “A Method for Registration of 3-D Shapes,” Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.14, no.2, pp.239–256, 1992.
- [14] Y. Chen and G. Medioni: “Object modelling by registration of multiple range images,” Image and Vision Computing, vol.10,

no.3, pp.145–155, 1992.

- [15] S. Rusinkiewicz and M. Levoy: “Efficient Variants of the ICP Algorithm,” Proc. of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.145–152, 2001.
- [16] D. Aiger, N.J. Mitra and D. Cohen-Or: “4-Points Congruent Sets for Robust Pairwise Surface Registration,” ACM Transactions on Graphics, vol.27, no.3, #85, pp.1–10, 2008.
- [17] K. Low: Linear least-squares optimization for point-to-plane icp surface registration, Technical report, University of North Carolina, TR04-004, 2004.

塩澤秀門 (Hideto Shiozawa)

2002 年大分大学工学部知能情報システム工学科卒業。2002～2003 年米国カーネギーメロン大学私費留学。2005 年大分大学大学院工学研究科知能情報システム工学専攻博士前期課程修了。2009 年神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程に進学。レーザを用いた三次元情報の構築に関する研究に従事。情報処理学会の学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

吉田武史 (Takeshi Yoshida)

2007 年神戸大学工学部機械工学科卒業。2008 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。2010 年同大学院博士後期課程に進学。ステレオカメラを用いた三次元再構成などのコンピュータビジョンに関する研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会の学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)

深尾隆則 (Takanori Fukao)

1992 年京都大学工学部航空工学科卒業。1994 年同大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了。1996 年同大学博士後期課程中退。同年助手となり。同大学大学院情報学研究科助手を経て。2004 年神戸大学工学部機械工学科助教授。2007 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授。この間、2001～2003 年米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。ロボティクスなどに関する研究に従事。博士(情報学)。システム制御情報学会、日本機械学会、自動車技術会、情報処理学会、IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

横小路泰義 (Yasuyoshi Yokokohji)

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学。同大学工学部オートメーション研究施設助手。応用システム科学教室助手を経て。1992 年機械工学教室助教授。2005 年同大学機械理工学専攻准教授。2009 年神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。1994 年 4 月から 1996 年 3 月まで米国カーネギーメロン大学客員研究員。工学博士。遠隔操縦システム、ハプティックインタフェース、ロボットハンド等の研究に従事。システム制御情報学会、計測自動制御学会、IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)