センサ統合による無人ヘリコプター搭載型マッピングシステム

Unmanned Helicopter borne 3D Mapping System based on Multi-Sensor Integration

長井 正彦*・柴崎 亮介*・陳 天恩*

熊谷 秀夫**・水上慎太郎**

*Masahiko NAGAI, Ryosuke SHIBASAKI, Tianen CHEN,
Hideo KUMAGAI and Sintaro MINAKAMI*

Abstract : In this research, we propose an automatic 3D mapping system based on multi-sensor integration that is a combination of IMU (FOG), GPS, laser scanner and digital camera. An automatic mapping means that direct geo-referencing is achieved automatically without any ground control points, which accurately measures ground coordinate values. 3D model is reconstructed by laser scanner as 3D point cloud data, while texture is acquired by digital camera from the same platform simultaneously. The accurate trajectory of the platform with attitude changes is determined through the integration of GPS/IMU and digital camera. All the measurement tools are loaded on the unmanned helicopter, RPH2, which is made by Fuji Heavy Industries Ltd. A method of 3D mapping by integrating all the sensors from an unmanned helicopter is focused in this paper.

1. はじめに

3次元GIS、ナビゲーション、デジタルアーカイブ、シミュレーション、コンピュータゲーム等の多くの分野で、実世界をより忠実かつ詳細に表現する3次元空間情報のニーズが広がっている(趙ら, 2002)。3次元データを取得する方法は、すでに多くの手法が実用化され、さらに様々な新しい手法の研究が行われている。近年の技術進歩と共に、デジタルカメラ、マルチスペクトルメーター、レーザスキャナ、レーザレンジファインダー、GPS(全地球測位システム)、IMU(慣性航法装置)等の様々なセンサが開発・改良され、計測技術やセンサの高精度化や小型化、低価格化は飛躍的に進んでいる。

これらのセンサをうまく組み合わせることができれば、低価格で機動性が高く、しかも十分な精度を有する3次元データ計測システムを構築できる可能性があ

る。しかしながら、現在利用されている3次元データ取得システムは、ほとんどが比較的少数のセンサを用いた「単独システム」であり、今までの3次元計測手法において精度をより向上させるためには、より高価な高精度センサを利用するという方策をとっているために、計測センサが効果的に統合されていない。また、計測精度はセンサ個々が保有している精度に依存し、センサ統合による精度向上やシステム全体の低価格化の検討はなされていない。

マッピング技術に関しては、写真測量の原理を利用して、高精度かつ高密度に3次元情報を抽出する手法が従来から行われてきたが、基準点の設置や地物の影や隠蔽などの撮影条件によっては3次元空間データの自動取得が困難である。そこで対象物の3次元情報を直接自動計測できるレーザスキャナを用い、マッピングの効率化や自動化が進められてきているが、IMUやGPSの技術に依存する割合が多くなるため、マッピングの精度がIMUやGPSの精度に依存してしまい、従来の写真測量技術が有効に利用されていないという問題点もある(村山ら, 2004)。また、GPSは基線解析により精度良く位置情報を得ることができるが、更新間隔は1秒程度と遅く、外部依存型のシステムであり、

* 東京大学空間情報科学研究センター

** 多摩川精機㈱

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 44, NO. 6, 2005

図1 無人ヘリコプター（富士重工製：RPH 2）

多くの場合レーザマッピングには利用できない。IMUは外部情報に依存しない自律システムとして、姿勢の変化量を計算するジャイロと加速度を検出する加速度計により位置を計測することができるが、ドリフトエラーの影響が大きく、低価格のIMU単独でのマッピングへの利用は難しい（Kumagaiら，2000）。

本研究では、従来のマッピング技術の利点を共有し、それぞれの欠点を補うマッピングシステムの開発をす

る。センサを統合することにより高精度のマッピング精度を保ちながらも、民生用デジタルカメラ、低価格レーザスキャナ、GPS、低価格・中性能IMUを統合し利用することで、システム全体の低価格化や小型化を検討する。特に本研究では計測システムの手軽さ（低価格化）、機動性（小型化）、容易さ（自動化）に焦点を当てた新しいモバイルマッピングシステムの開発を行う。さらに計測したそれぞれのデータを統合し、高精度のデジタルサーフェスモデルを構築する。また計測プラットフォームとして無人ヘリコプターを利用する（図1）。無人ヘリコプターは、従来のプラットフォームでは困難であった低い高度からの計測を安全かつ容易に行えると期待される。

2. 計測システムの開発

本研究では簡便で迅速な計測を目的とするとともに、手軽で機動性のあるシステムを目指す。ゆえに、

表1 センサの緒元

	IMU	GPS	レーザスキャナ	デジタルカメラ
機種	TA7544 (光ファイバージャイロ：FOG) 多摩川精機社製	G12 Ashtech 社製	LMS291 SICK 社製	EOS D60 キャノン社製

特徴	FOGは、高精度ポジショニングで一般的に利用されているリングレーザジャイロと比較して、価格、性能ともに一桁下のランクに位置するが、MEMS（Micro Electro Mechanical System）技術の発達により、小型かつ低価格な中・低精度のIMUが市場に出ると予測されているため（多摩川精機，2002），MEMS型IMUと同等性能のFOGによるシステム開発は意義がある。	IMUと比べて自立性や連続性は低いが、高精度のデータを取得できるようになり、特に航空機やモバイルマッピングの分野ではGPSやIMUは単独では使用されない現状にある。	レーザスキャナは対象物の3次元情報を直接自動計測でき、その有効性がすでに証明されている（趙ら，2000）。近年の技術進歩に伴い、レーザスキャナの低価格化が進み、現在では数十万円での購入が可能になっている。	民生用デジタルカメラが量産され比較的 low 価格で購入できるようになった。すでに民生用デジタルカメラを用いた様々な研究がなされ、民生用デジタルカメラを使った写真測量への利用の有効性が証明されている（近津ら，2001）。
特性	計測範囲：±200°/s 角度：±0.1° 角速度：±0.05°/s 加速度：±0.02m/s ²	水平精度：30cm 加速度：20G 最大速度：1,000knts	観測角：100° 分解能：0.25° 最大測定距離：80m 計測頻度：19Hz	画素数：3,072×2,048 焦点距離：24mm シャッター速度： 1/2,000秒 シャッター間隔：9秒
重量	1,000g	400g	4,000g	700g
価格	150万円	40万円	40万円	15万円

対する回転角速度を算出し、初期位置からの移動角度を求め位置を算出する。位置情報が決定すると自転角速度成分が計算できるので、実際の角度信号から自転角速度成分を除去することにより地球座標における位置の変化を計測することができる(熊谷ら, 2002)。今回の研究で使用した IMU は 200Hz でデータを取得するために、これらの計算も 200Hz という速い動きに対して計算することも可能である。

IMU の場合、位置のドリフト(時間的変化)が最大の問題点である。IMU のドリフトよりも精度の高い GPS の信号を用いて IMU の誤差を算出し、その誤差を用いて IMU の各誤差を推定し、誤差がなくなれば位置精度も向上するので、GPS と IMU の統合は最適となる。GPS と IMU の統合をするためにカルマンフィルターを用いる。カルマンフィルターに入力されるデータのうち、GPS のデータは基線解析が行われたもので、IMU のデータは純慣性演算が行われたものである。ここで使用するカルマンフィルターは状態推定フィルターで、観測値(GPS)から IMU のそれぞれの誤差を統計的に推定するアルゴリズムである。状態方程式(式1)と観測方程式(式2)により確率システムの統計的性質について示す。ここで、 X_t は状態ベクトル、 Z_k は観測ベクトル、 w_t と v_t は白色雑音ベクトルとし、 D_t 、 H_t は行列であり時間 t に依存している。

$$X_{t+1} = D_t X_t + w_t \quad \text{式 1}$$

$$Z_k = H_k X_k + v_k \quad \text{式 2}$$

$$t=0, 1, \dots$$

また本研究では、カルマンフィルターの演算を以下のステップの繰り返しにより行う。

- ☐ 共分散値の初期化と推定量の初期化
- ☐ GPS 受信状況の把握と観測式の決定
- ☐ 観測値の算出
- ☐ カルマンゲインの計算
- ☐ 推定量の算出
- ☐ 共分散値の更新
- ☐ 共分散値の計算

3.2 自動バンドルブロック調整による画像の絶対標定

本研究では、デジタルカメラで撮影された画像をもとに、GPS/IMU の累積されたエラーを補正することを目的の一つとしている。GPS/IMU を補正するため

に、まずデジタルカメラによって撮影されたデジタル画像の標定を行い、デジタルカメラの位置と姿勢を算出する。

本研究では、大量の画像を効率的に処理するための自動手法を検討する。自動で画像標定を行うには、あらかじめ画像間の位置関係が特定されている必要があるが、本研究では、GPS/IMU の統合による慣性演算の結果である位置・姿勢を利用し、自動バンドルブロック調整を行う。自動バンドルブロック調整ではバンドル調整と共面条件を組み合わせた結合調整法を利用する。結合調整法は地上基準点測量が不要であるためにデータ処理の自動化が可能になる。共面条件では 2 本の空間直線が同一平面に含まれるという条件が成立する。IMU/GPS の統合により求められたデジタルカメラの位置・姿勢(画像標定の近似値)をもとに、共面条件からタイポイントは写真上のエピポラライン上にあると仮定する。このエピポララインの周りに検索範囲を指定し、この検索範囲の中でタイポイントを検出するための画像マッチングを行い、タイポイントの自動抽出を行う。これらのタイポイントを用いて、バンドルブロック調整により画像標定を行う。本研究では、8 モデル×6 コースの絶対標定の同時解を求める。

3.3 IMU/GPS/デジタルカメラの統合による高精度位置・姿勢の決定

本研究で使用している IMU (FOG) は相対方位角を検出することはできるが、真方位を検出することはできない。つまり、従来の慣性演算では、計測を行う前に GPS/IMU のアライメントを行って、真方位を検出しなければならない。高精度の IMU では GPS/IMU のアライメントでは ZUPT 処理(zero velocity update)を行い、速度が“0”であるという情報をもとに、地球の自転を検出し GPS/IMU の真方位の検出を行っている。また、従来の航空測量等で用いられる IMU では、電子コンパスなどにより真方位の検出をし、その情報を GPS/IMU の慣性演算に取り込んでいるが、十分な精度で真方位を検出するには至らず、飛行を開始して速度情報等をもとに、カルマンフィルターの処理の中で真方位を完全に推定し終わるまでは精度の良い結果は得られない。

本研究では、自動バンドルブロック調整により、高精度の位置と姿勢を求めることができる。さらに、こ

図5 GPS/IMU/デジタルカメラの統合

の位置と姿勢は絶対標定が行われたものであるので、真方位が検出されている。本研究では、この自動バンドルブロック調整により求められたデジタルカメラの位置と真方位を含む姿勢をカルマンフィルタによるGPS/IMUの慣性演算と統合させる。図5にGPS/IMU/デジタルカメラの統合の概念図を示す。GPS/IMUの情報と同様に、自動バンドルブロック調整の結果を0.1Hz(デジタルカメラによる画像の取得頻度)でカルマンフィルタに入力され、位置、姿勢、方位が初期化される。

3.4 レーザレンジデータの座標変換

無人ヘリコプターから計測を行っている間、搭載されたセンサは継続的に動いており、その位置と姿勢を時間と共に変化させている。計測時のセンサの位置や姿勢の連続的な変化はIMU/GPS/デジタルカメラを統合することにより精度よく求めることができる。このセンサの位置や姿勢とキャリブレーションにより得られたそれぞれのセンサ間の相対的な位置・姿勢の関係により、レーザレンジデータの座標変換を行い3次元モデルの構築を行う。

ヘルムート変換式は回転、平行移動量、縮尺を補正する変換式である。一般的には2次元で用いられることが多く、コンパレータ座標系から指標座標系を求める時に用いられる。ここでは、レーザスキャナにより求められた計測値(コンパレータ座標系)を、IMUの座標(指標座標系)にヘルムート変換式を用いて変換する。本研究では式3にある3次元のヘルムート変換式を利用し3次元の座標変換を行う。レーザスキャナの計測値($X1$, $Y1$, $Z1$)を、IMU(Rt , St)を用いて変換する式である。スケールファクター(s)、相対姿勢(R)、相対位置(S)は、レーザスキャナとデジ

図6 DSM

タルカメラの相対的な関係で、キャリブレーションによってあらかじめ求められている。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = s \times R \times R_t \times \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{bmatrix} + S + S_t \quad \text{式 3}$$

R_t : IMU/GPS/デジタルカメラの姿勢

S_t : IMU/GPS/デジタルカメラの位置

($X1$, $Y1$, $Z1$) : レーザスキャナ計測値

3.5 DSMの構築

式3のヘルムート変換式により座標変換されたレーザレンジデータは絶対座標を持っているが、テクスチャー情報を持たない点の集まりである。そこで、デジタルカメラにより取得された画像を用いてレーザレンジデータにテクスチャーの情報を貼り付ける。デジタルカメラにより取得された画像は、バンドルブロック調整により絶対標定が行われている。レーザレンジデータは、この画像のバンドルブロック調整の結果により補正されたIMU/GPS/デジタルカメラの統合結果を用いてヘルムート変換されているために、座標変換されたレーザレンジデータと絶対標定された画像は精度良く重なる。図6に構築したDSMを示す。

4. 位置・姿勢計測精度の検証

4.1 実験の諸元

無人ヘリコプターに搭載した計測システムからデータを取得する際には、高精度の画像標定を行う必要がある。デジタル画像の撮影範囲や連続する画像のオーバーラップ率、デジタルカメラのシャッター間隔をもとに計測速度や撮影高度を決定する。また、撮影高度

表 2 実験の緒元

計測高度	50m
計測速度	1.6m/s
計測範囲	80m (進行方向) ×90m (幅)
モデル数	8 モデル× 6 コース
デジタルカメラ：撮影範囲	47.3m (進行方向) ×31.5m (幅)
デジタルカメラ：地上分解能	1.5cm
オーバーラップ率	70%
サイドラップ率	50% (15m 間隔で飛行)
レーザスキャナ：スキャン幅	120m
レーザスキャナ：地上分解能	30cm

は、レーザスキャナの最大測定距離も考慮し決定する。
表 2 に実験の諸元を示す。

4.2 自動バンドル調整

ここで、GPS/IMU を標定要素の近似値として用い、
マッチングによりタイポイントを自動設置した自動バ
ンドルブロック調整による絶対標定の精度検証を行
う。この精度検証は、本研究で提案している絶対標定

の有効性を示すものである。基準点を 8 モデル× 6
コース内に均一に分散して配置し、トータルステー
ションにより計測された基準点と、それらの基準点に
対応する自動バンドルブロック調整により求められた
基準点の座標を比較し、その誤差を求めることにより
精度検証を行う。表 3 に自動バンドルブロック調整の
精度検証の結果を示す。この結果によると、X 軸方向
の平面は約 5 cm の誤差があり、Y 軸方向の平面は約
10cm の誤差があり、さらに高さ方向の誤差が約16cm
である。

精度検証は、従来の基準点を利用し、手作業でタイ
ポイントを設置したバンドルブロック調整を行い、そ
の結果と比較することにより行う。従来の手作業によ
る手法では、X 軸方向の平面は約1.8cm の誤差、Y 軸
方向の平面は約1.6cm の誤差、さらに高さ方向の誤差
が約14cm である。平面方向の誤差が数 cm 大きくな
り、自動バンドルブロック調整による絶対標定の方が、
従来手法よりも若干制度が悪いと考えられるが、
GPS/IMU による統合の場合、精度は GPS の精度に
依存するとされ(多摩川精機, 2002), GPS/IMU によ
る統合の精度 (約30cm) と比較すると、自動バンドル
ブロック調整により得られた精度は GPS/IMU を補

表 3 自動バンドルブロック調整の精度検証

(単位：m)									
基準点 No.	基準点 (X)	基準点 (Y)	基準点 (h)	自動バンドル 調整 (X)	自動バンドル 調整 (Y)	自動バンドル 調整 (h)	誤差 (X)	誤差 (Y)	誤差 (h)
1	-11193.977	-25634.338	43.197	-11193.956	-25634.337	42.733	0.021	0.001	0.464
2	-11183.018	-25637.129	42.903	-11183.056	-25637.161	42.944	0.038	0.032	0.141
3	-11173.826	-25639.645	42.849	-11173.883	-25639.719	42.954	0.057	0.074	0.105
4	-11162.471	-25642.662	42.788	-11162.535	-25642.784	42.905	0.064	0.122	0.117
5	-11149.337	-25646.23	42.747	-11149.406	-25646.415	42.705	0.069	0.185	0.142
6	-11191.888	-25626.436	43.158	-11191.843	-25626.47	42.859	0.045	0.034	0.299
7	-11181.053	-25629.473	42.979	-11181.053	-25629.54	43.047	0	0.067	0.068
8	-11172.17	-25631.944	42.91	-11172.182	-25632.035	43.005	0.012	0.091	0.095
9	-11162.446	-25634.822	42.798	-11162.468	-25634.95	43.049	0.022	0.128	0.251
10	-11146.794	-25638.299	42.83	-11146.809	-25638.474	42.744	0.015	0.175	0.086
11	-11189.846	-25619.937	43.14	-11189.763	-25619.982	42.98	0.083	0.045	0.16
12	-11178.933	-25622.631	42.983	-11178.887	-25622.693	43.179	0.046	0.062	0.196
13	-11170.569	-25624.923	42.924	-11170.543	-25625.013	43.097	0.026	0.09	0.173
14	-11160.683	-25626.974	42.895	-11160.647	-25627.106	43.06	0.036	0.132	0.165
15	-11145.225	-25630.81	42.868	-11145.199	-25631.005	42.861	0.026	0.195	0.007
16	-11187.676	-25611.033	43.146	-11187.555	-25611.076	43.114	0.121	0.043	0.132
17	-11176.563	-25614.229	43.063	-11176.473	-25614.312	43.209	0.09	0.083	0.146
18	-11168.23	-25616.687	42.989	-11168.144	-25616.783	43.15	0.086	0.096	0.161
19	-11159.017	-25619.338	42.908	-11158.942	-25619.456	43.132	0.075	0.118	0.224
20	-11143.597	-25623.954	42.879	-11143.52	-25624.128	42.912	0.077	0.174	0.133

平均誤差 0.05045 0.09735 0.16325

正するには十分な精度であると考えられる。

4.3 GPS/IMU/デジタルカメラの統合による位置・姿勢演算の結果

図7にIMU, GPS, デジタルカメラを統合したセンサの軌跡を示す。カルマンフィルターを用いてGPS/IMU/デジタルカメラは統合され、200Hzの位置と姿勢として出力される。従来のGPS/IMUのみの統合では、統合後の精度はGPSに依存するが、IMU/GPS/デジタルカメラ統合の場合、統合後の精度は画像の絶対標定の精度に依存すると考えられる。画像の絶対標定の精度検証の結果から、地上座標の精度は5cmから10cmであるので、センサの姿勢角精度は0.0013°から0.0025°になる。つまり、中精度の光ファイバージャイロを使用しているにもかかわらず、高価格なリングレーザジャイロと同等の姿勢角精度を得ることができる。

ここで、デジタルカメラによって撮影された画像の標定結果をカルマンフィルターに入力するGPS/IMU/デジタルカメラを統合した慣性演算の結果と、

図7 IMU/GPS/デジタルカメラの軌跡

図8 方位角の比較

従来のGPS/IMUのみにによる慣性演算の結果を比較し、ポジショニングの精度や方位角精度等、本手法の有効性について確認する。

図8に方位角を比較した図を示す。実線がGPS/IMU/デジタルカメラ、破線がGPS/IMUによる慣性演算を行った結果の方位角変化をそれぞれ示す。GPS/IMU/デジタルカメラでは、画像標定による正確な方位角が入力されるので、計測を開始した時点から高精度の方位角が決定できる。一方、GPS/IMUによる慣性演算では、計測を始めて徐々に方位角の精度が高くなっていき、最終的にGPS/IMU/デジタルカメラの慣性演算による方位角と重なる。GPS/IMUの統合によるカルマンフィルターによる状態推定では、徐々に精度が上がる特徴がある。よって、本研究で提案したGPS/IMU/デジタルカメラの統合し、画像標定の結果を入力することにより、高精度の方位角が計測開始直後から得ることができる。図9にロール角の比較、図10にPitch角の比較を示す。方位角と同様に、図9と

図9 Roll 角の比較

図10 Pitch 角の比較

図11 軌跡の比較

図10においても、本研究で提案する GPS/IMU/デジタルカメラの統合により、計測開始直後から精度の良い情報を得ることができる。従来の手法では、計測を行う前にアライメントを行い、方位角等のセンサの初期姿勢を決定するが、前述した様に高精度の結果を計測開始直後から得ることは難しい。本手法により、これらの手間を省くことができる。

次に、図11にフライトの軌跡を比較した図を示す。座標系は日本測地系の9系である。実線がGPS/IMU/デジタルカメラ、破線がGPS/IMUによる慣性演算を行った結果の位置を示したものである。GPS/IMUの統合では、アライメントを行いカルマンフィルターによる状態推定を何度も行って精度の良い姿勢角が決定されるまでは、IMUのドリフトが完全に補正されないため、カルマンフィルターでGPSによる位置補正を行った際に、位置が強制的に修正されるために、センサの軌跡がギザギザになる。特に急旋回を行った場合

には顕著である。一方、GPS/IMU/デジタルカメラの統合では、精度の良い姿勢角が画像標定により特定できるので、カルマンフィルターにより、より精度の高い状態の推定ができる。そのために、強制的に位置が修正されることが少なく滑らかなセンサの軌跡になる。

4.4 DSMの精度検証

ここでは、構築したDSMの精度検証を行う。本計測システムは、IMU、GPS、デジタルカメラ、レーザスキャナを統合することにより、いくつかの要素技術が絡み合って構成されているため、構築したDSMの精度は、それぞれの計測機器の誤差を複合させることによるもので、センサ統合後のそれぞれの計測機器の精度を検証することは大変困難である。そこで本研究では、測量方法の精度を議論する方法を用いて精度検証を行う。地上基準点や特徴的な地物などを利用し、構築したDSMよりも精度が良いと考えられる基準点を利用したバンドルブロック調整の結果を実測値とし、これと比較することにより構築されたDSMの精度を検証する。自動バンドルブロック調整による画像の精度検証は、すでに証明されているので、ここでは主にDSMの精度について検証を行う。

精度検証を行うにあたり、画像とDSMから識別することのできる特徴点を数点抽出する。特徴点は、地物の角等を利用し、色だけでなく、3次元形状からも識別可能な点を選ぶ。その特徴点について、地上基準点を利用したバンドルブロック調整による画像標定の結果と、DSMから抽出された基準点の座標を比較す

表4 DSMの精度

(単位: m)

特徴点 No.	画像標定 (X)	画像標定 (Y)	画像標定 (Z)	DSM (X)	DSM (Y)	DSM (Z)	誤差 (X)	誤差 (Y)	誤差 (Z)
1	-11184.877	-25630.253	42.755	-11184.696	-25630.836	42.915	0.181	0.583	0.160
2	-11185.471	-25622.727	42.952	-11185.557	-25622.789	42.971	0.086	0.062	0.019
3	-11167.603	-25670.474	42.391	-11168.282	-25670.312	42.406	0.679	0.162	0.015
4	-11177.107	-25634.721	42.704	-11177.262	-25634.918	42.523	0.155	0.197	0.181
5	-11152.866	-25641.753	42.029	-11152.172	-25641.036	42.071	0.694	0.717	0.042
6	-11176.511	-25625.571	42.824	-11176.467	-25625.426	42.767	0.044	0.145	0.057
7	-11153.911	-25643.823	42.534	-11154.375	-25643.041	42.075	0.464	0.782	0.459
8	-11150.564	-25631.724	42.340	-11150.887	-25631.869	42.296	0.323	0.145	0.044
9	-11176.771	-25635.344	43.992	-11176.394	-25635.308	44.082	0.377	0.036	0.090
10	-11186.666	-25631.657	44.289	-11186.417	-25631.888	44.202	0.249	0.231	0.087
平均誤差							0.325	0.306	0.115
エラー除去平均誤差							0.142	0.140	

ることにより精度検証を行う。表4にDSMの精度検証結果を示す。10点の特徴点を抽出し、これらの位置誤差を算出した結果、10cmから30cmの位置精度でDSMが構築されていることが確認できる。また、特徴点No.1, 3, 5, 7については、他の誤差と比較して大きな値が出ている。この値は、DSMの特徴点を抽出する際の抽出エラーに起因すると考えられる。レーザレンジデータの分解能はおよそ30cmであるが、特徴点を決定する際にレンジ画像の角度により複数の点が重なり、その際に抽出エラーがあったと考えられる。そこで、これらのエラー値を除き、再度精度検証を行うと、X-Y平面で14cm、高さ方向で8cmと高精度のマッピングができたことが証明できる。

5. データ統合利用

5.1 レーザ補助による画像ステレオマッチング

従来から広く利用されている手法であるステレオマッチングを、さらに効果的に精度良く自動で行うために、レーザレンジデータを利用する。前項でDSMを構築する際に、本研究で取得したレーザレンジデータとデジタル画像は精度良く重なっていることを述べて

いる。ここでは、画像のステレオマッチングを行う際に、レーザレンジデータの高さ情報（概要形状）を利用する。1組のステレオ画像で、左画像の“ある”ピクセルに対して、右画像から対応する点を従来通り画像相関の計算から自動的に検出するのであるが、その時に、そのピクセルに対応しているレーザレンジデータの高さ情報を利用して、右画像の対応点の検索範囲を定義する。レーザレンジデータにより検索範囲を絞り、その検索範囲の中から対応点を決め、ステレオマッチングを行う。この手法により、ミスマッチングを格段に減らせることが可能になる。図12にレーザレンジデータを利用してステレオマッチングを行ったDSMを示す。図13に示す従来のステレオマッチングと比較して、ミスマッチングに起因する3次元モデルのノイズがほとんど存在しないことが容易に分かる。レーザレンジデータは密度が低いので、より高密度のDSMの構築を必要とする場合には、非常に有効な手法である。

5.2 レーザレンジ画像の内挿

レーザレンジデータは対象物との距離を直接計測するために、複雑な形状を効率良く計測することができるという利点を有している。しかし、前述しているようにレーザスキャナはラインセンサであり、レーザレンジデータの分解能は10cm～20cmであるが、搭載するプラットフォームのスピードや姿勢の急激な変化が原因となり、レーザレンジ画像は図14(a)に示すように隙間ができてしまうことがある。一方、デジタルカメラ（図14(b)）はエリアセンサによって撮影し、地上分解能が1cm～1.5cmほどであるために、隙間なく情報が得られる。図14(a), (b)からも分かるように、レーザレンジ画像とデジタル画像のデータ密度の差は明らかである。そこでデジタル画像を用い、レーザレンジ画

図12 レーザ補助による画像ステレオマッチング

図13 従来の画像ステレオマッチング

図14 レーザレンジ画像の内挿

像の隙間を補間するための内挿を行い、図14(c)に示す通り、画像による補完でレーザレンジデータを内挿することができる。

5.3 地物抽出

構築された DSM を利用して、詳細な地物の抽出を行う。従来の人工衛星や航空機からの 3 次元計測では不可能であった詳細な地物の抽出を、高分解能データを用いることにより容易に行えるようになる。また、DSM と同時にデジタル画像も存在するために、レーザレンジデータから複雑な形状を求め、詳細なテクスチャの情報はデジタル画像から、さらにデータの補間を行う等、それぞれの利点を利用することで、効率的に詳細な地物の抽出を行うことができる。

6. 結 論

本研究では、様々なセンサを統合することにより、低価格、高機動性、高精度計測を実現できるマッピングシステムを開発した。民生用デジタルカメラ、低価格レーザスキャナ、GPS、低価格・中性能 IMU を統合することにより、個々のセンサは低価格・低性能ではあるが、それぞれのセンサの利点を共有し、弱点を補うことのできる新規 3 次元マッピングシステムである。また計測プラットフォームは無人ヘリコプターを利用した。無人ヘリコプターは、従来のプラットフォームでは困難であった低い高度からの計測を安全かつ容易に行うことができる。

複数のセンサを統合することにより、画像標定の自動化、高精度慣性演算の実現、DSM の自動構築、画像ステレオマッチングの高精度自動化、取得データの補完、さらには地物の自動抽出に至るまで、従来の単独センサでは困難であった処理を可能にした。

本論文は安価で小型なセンサを統合する手法を開発

し、実際に機動性に優れ、低価格で高精度な 3 次元データ取得システムが構築できることを実証的に明らかにしている。この統合センサシステムは汎用性も高く、さまざまなプラットフォームに搭載され、歩行者ナビ用の地下街地図から災害調査まで幅広く利用することが可能である。

(受付日2005.6.8, 受理日2005.11.18)

参考文献

- 趙 卉菁, 柴崎亮介, 2002, 車載型レーザレンジデータによる 3 次元都市空間モデルの構築, 第 8 回画像センシングシンポジウム.
- 村山盛行, 佐田達典, 2004, 地上レーザスキャナと GPS/IMU を用いた三次元形状計測システムの開発, 応用測量論文集, Vol. 15, pp.91-102.
- Kuamgai, H., Kindo, T., Kubo, Y., Sugimoto, S., 2000. DGPS/INS/VMS Integration for High Accuracy Land-Vehicle Positioning, Proceedings of the Institute of Navigation, ION GPS-2000, Salt Lake.
- 多摩川精機(株)編, 2002, ジャイロ活用技術入門, 工業調査会.
- 趙 卉菁, 柴崎亮介, 2000, 地上据え置き型レーザレンジスキャナを利用した 3 次元都市空間データの自動構築手法に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 39, no. 2, pp.48-51.
- 近津博文, 国井洋一, 中田隆司, 2001, デジタル写真測量からみた300万画素デジタルスチルカメラの精度検証, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 40, no. 2, pp.22-38.
- 熊谷秀夫, 久保幸弘, 木原正人, 杉本末雄, 2002, DGPS/INS/VMS を統合した高精度車両位置計測アルゴリズム, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 41, No. 4, pp.77-84.