

モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング

石川貴一朗*・天野嘉春*・橋詰匠*・瀧口純一**・清水聡**

City Space 3D Modeling Using a Mobile Mapping System

Kiichiro ISHIKAWA*, Yoshiharu AMANO*, Takumi HASHIZUME*,

Jun-ichi TAKIGUCHI** and Satoshi SHIMIZU**

Abstract: This paper describes a 3D city-space modeling and walk-through method based on a mobile mapping system (MMS) and 3D Viewer G-Viz. The MMS consists of a GPS/inertial measurement unit (IMU) combined navigation system, a three-axis GPS-Gyro/IMU, laser scanners, cameras, and the Network-based Positioning Augmentation Services (PAS). The MMS can be used to reconstruct a large-scale colored 3D environmental model. The G-Viz can easily handle large-scale 3D range data using the multi-layer display technology. The MMS/G-Viz combination enables large-scale 3D environmental modeling and data handling in semi-real time, and it can be used to realize virtual walking with a sufficient sense of reality.

Keywords: GPS gyro, GIS, ITS, Mobile mapping, Desktop survey

1. 緒言

近年、土木分野で設計施工段階において、三次元 CAD を活用する動きがある。2008 年 7 月に国土交通省により情報化施工推進戦略がまとめられ、トータルステーションを用いた出来形管理や三次元マシンガイダンスやマシンコントロールなどの次世代土木技術の開発普及推進を目的とし、中部地方整備局により建設 ICT 研究会が 2008 年 11 月に設立された。また、道路施工後の維持管理業務においても三次元データを活用し、維持管理データベースと連携させ効率的に維持管理を行なうことが考えられており、道路周辺の三次元計測およびモデル化のニーズが高まっている。さらに、防災分野においても災害直後から復興期にかけて三次元モデルによる状況把握への活用が期待されている。また一方で、カーナビゲーションシステム内に使用されている都市部主要交差点の三次元モデルや都市計画、景観シミュレータへの利用など、実都市空間モデリングへのニーズが高まっている。しかしながら、現在の三次元モデル作成の際に必要な計測段階においては、多くの人手と莫大な費用、時間が必要である。そのため、さまざまな手法の三次元計測に関する研究がなされている(1)~(6)。特に航空分野では、航空写真測量や航空レーザ測量の精度が向上したことにより、百平方キロメートルを超える広範囲な三次元地形測量が実現可能となり、基盤地図情報や地震直後の地すべりなどの状況把握などにも幅広く活用されている。しかしながら空から高速で計測するという特性上、地物側面の情報や高架下、トンネル内などの情報が収集できない。また計測密度も低く、機材の運用、維持

管理に手間がかかるため、上記のような、土木業界における施工の維持管理や景観シミュレータに必要とされるウォークスルーには向かない。そのため、これらのニーズには地上からの計測が必要である。近年、三次元レーザスキャナの登場により地上においても周辺環境を高精度に三次元計測することが可能となった。しかしながら三次元レーザスキャナは、広範囲において計測を行なう場合、何回も機材を設置しなおす必要があり、また一箇所の計測に 15 分から 30 分程度かかるため非常に時間がかかる。また、道路面の計測といった場合においては、道路上に計測装置を設置する必要があり作業者に危険が伴う。そのため、より効率的かつ安全に地上から三次元モデルを作成するため、車両に GPS と二次元レーザスキャナ、カメラを搭載し、移動しながら三次元環境を復元するモバイルマッピングシステム (MMS: Mobile Mapping System)の研究が行なわれている(5)(6)(7)。このような移動システムを用いて三次元環境を復元する際には、センサヘッドの位置姿勢情報の精度が不十分な場合、カメラにより取得したテクスチャとレーザスキャナの形状にズレが生じてしまう。従来の研究では、RTK-GPS と IMU を複合することにより、位置においては高精度な取得が可能であるものが多いが、姿勢に関しては IMU (Inertial Measurement Unit)の累積誤差により精度が悪化してしまうため、カラー情報付きの三次元復元は難しかった(7)。そこで筆者らは姿勢の累積誤差を軽減する手法として、GPS アンテナを複数台用いた GPS Gyro と IMU 複合による高精度位置姿勢標定装置を開発し、本装置と二次元レーザスキャナ、およびカメラを搭載した MMS によるカラー情報付き三次元復元システムを開発した。また、近年三次元モデルの複雑化と三次元空間の広域化に伴い、取り扱うデータ量が莫大なものとなり、円滑に取り扱うことが難しくなっており、広範囲に渡るデータの読み込みにも時間がかかり円滑な作業の妨げとなることが多い。そこで大規模化する三次元データの表示プラットフォームとして三次元空間計測・情報管理システ

* 早稲田大学理工学術院総合研究所 新宿区喜久井町 17 番

** 三菱電機(株) 鎌倉市上町屋 325

* Research Institute for Science & Engineering, Waseda University

** Mitsubishi Electric Corporation

(Received June 29, 2009)

ム G-Viz の開発を行なった。G-Viz はギガバイト規模の三次元データをストレスなく表示可能な操作環境を提供できる。本論文では MMS による三次元復元プロセスと表示システム G-Viz, および MMS の実都市空間における実証試験結果について述べる。

2. MOBILE MAPPING SYSTEM

2. 1 システム概要

Fig.1に開発したMMSの概観を示す。本MMSは車両上部の天板上に2台のレーザスキャナ, 2台のカラーCCDカメラ, 自己位置姿勢標定装置として, 3台のGPSアンテナおよびIMUから構成されるGPS-Gyroを搭載している。また右後輪の中心にオドメトリを搭載している。レーザスキャナは上下30°に固定して設置されており, 1台のレーザスキャナで180°, 2台で360°の計測が可能である。レーザスキャナの角度分解能は1°であり, 距離分解能は1mmとなっている。また180°のスキャンを1スキャンとし75Hzで計測が可能である。CCDカメラは路面テクスチャ取得用に斜め下向きに設置されたCCDカメラと前方を向いたCCDカメラが設置されている。カメラの解像度はともに1600×1200pixelである。カメラは2m間隔で画像を取得している。これらのセンサはGPS時刻に基づき同期を取り, 車両内部に設置されたPCに保存される。データログの同期系統図をFig.2に示す。

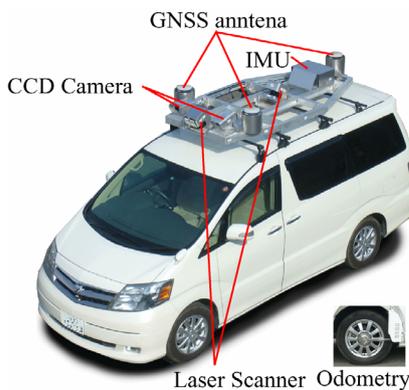


Fig. 1 System configuration

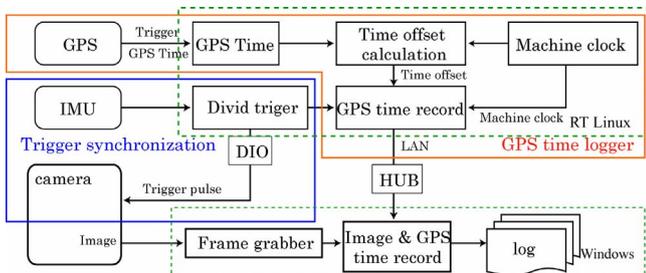


Fig.2. Data logger block diagram

Fig.3にMMSによるデータ計測から三次元復元までの工程を示す。MMSはまず車両を用い通常の車両と同様の速度で公道を走行し, GPS, IMU, レーザスキャナ, カメラの画像を収集する。運用を開始する場所はGPS衛星が十分捕捉可能

な空が開けた箇所において開始し, 一定時間停止し, 初期姿勢角を求めてからデータ計測を開始する。収集したデータは処理用のPCに移動し, 後処理によりデータ処理を行なう。後処理工程ではまずGPS, IMU, オドメトリのデータおよび電子基準点のGPSの補正データを用いMMSの位置姿勢を算出する。基準点情報はPAS(Positioning Augmentation Services)を使用している。PASは国土地理院の電子基準点網を活用し, 高精度位置情報をリアルタイムに提供するネットワーク型RTK-GPSの測位サービスであり, ドイツGeo++社により開発されたアルゴリズムであるFKP(Flächen Korrek-tur Parameter)方式を採用している。

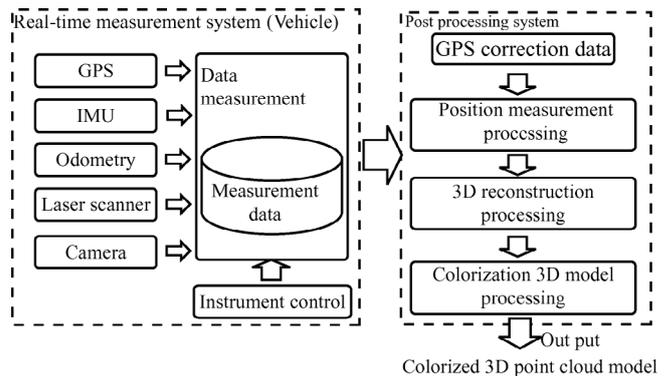


Fig.3 MMS measurement process flow

2. 2 GPS/IMU 複合位置標定装置およびGPS-Gyro/IMU 複合姿勢標定装置

高速で移動しながら高精度な計測を行なう際, 計測精度はデータ取得時における搭載センサの位置姿勢の標定精度に大きく影響される。そのため, データ取得時のセンサヘッドの位置姿勢を高精度かつ時間遅れなく取得する必要がある。MMSでは各センサの位置姿勢を正しく計測するため, 外界情報を取得するセンサと位置姿勢標定装置はすべて同じ天板上に固定してあり, 一つの剛体として動くように設計することで, センサヘッドの位置姿勢標定を行なっている。また屋外において高精度に位置計測を行なうためには高性能なGPS受信機が必要となる。本MMSでは位置標定用として2周波のGPS受信機を使用しており, 10Hzでデータ取得が可能である。またGPS衛星の捕捉が困難でGPSの高精度な解であるFIX解が得られないような環境下では120Hzでデータ取得可能なIMUとオドメトリを使用しDR(Dead Reckoning)で車両位置を推定する。GPSのFIX解はEKF(Extended Kalman Filter)を使用し, ルーズカップリングで複合している(8)。Fig.4はルーズカップリング型搬送波位相GPS/IMU複合航法のフロー図である。

本システムはGPSの衛星状況が良い環境下では水平方向精度0.02m rms,高さ方向精度0.04m rmsを実現している。

MMSの姿勢標定には, 安価なソフトウェア同期によるGPS-Gyroを使用している。GPS-Gyroは3つのGPSアンテナ

と3台の非同期受信機, 3軸のIMU, EKF から構成される. GPS-Gyroに使用する3台の受信機はGPSのUTC (Coordinated Universal Time)時刻のタイムスタンプに基づいて同期を取っているため低価格な受信機でも可能である. ソフトウェア同期によるGPS-Gyroのブロック図をFig.5に示す.

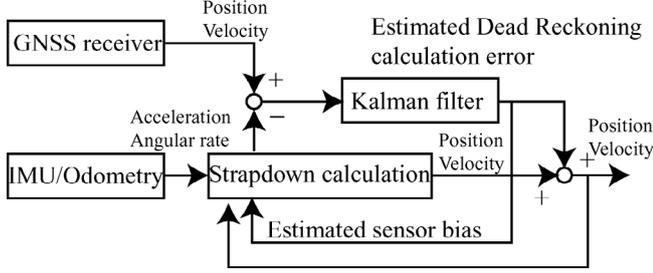


Fig. 4 Loosely-Coupled Carrier-Phase D-GPS/DR combined navigation

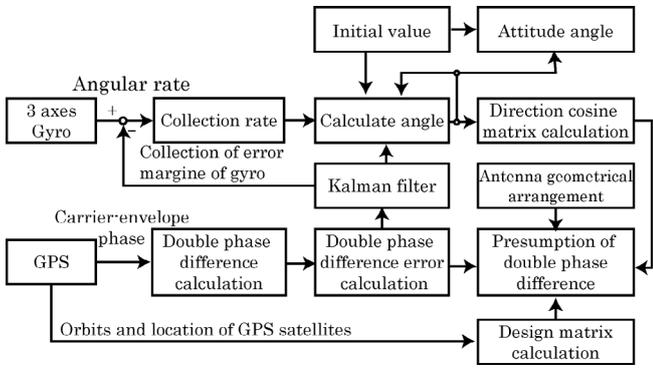


Fig. 5 Proposed GPS-Gyro/IMU attitude/heading sensor

GPS-Gyro ではアンテナ間の基線ベクトルを求めることで姿勢を決定する. Fig.6 は基線ベクトルと二重差の関係を示したものであり, 観測ノイズを無視した場合の関係式は(1)式のように表される.

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\rho_{ab}^{ij} &= (\rho_b^j - \rho_a^j) - (\rho_b^i - \rho_a^i) \\ &= \nabla\Delta\Phi_{ab}^{ij} - \lambda\nabla\Delta N_{ab}^{ij} \\ &= -(e_a^j - e_a^i) \cdot b_{ab} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで ρ_a^j : 受信機 a から衛星 j の幾何学的距離, e_a^j : 受信機 a から衛星 j への LOS(Line Of Sight)ベクトル, b_{ab} : 受信機 a から受信機 b への基線ベクトルである. (1)式より, LOS ベクトル e は航法メッセージより既知であり, $\nabla\Delta\Phi_{ab}^{ij}$ は搬送波位相観測値を処理したものであることから, 二重位相差の整数値バイアスである $\nabla\Delta N_{ab}^{ij}$ を解くことで基線ベクトル b_{ab} を求めることができる.

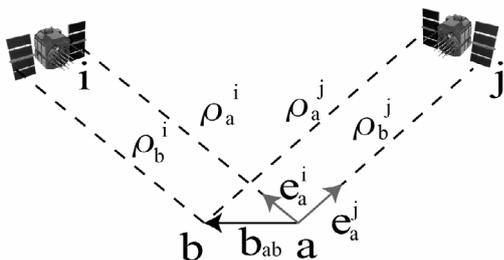


Fig. 6 Double difference and baseline vector

アンテナ a,b および a,c 間の航法座標系における基線ベクトル b_{ab}^n , b_{ac}^n が求めたとすると, 車体座標系から航法座標系への座標変換行列は以下の式で表すことができる.

$$C_b^n = B^n (B^b)^{-1} \quad (2)$$

ここで,

$$B^n = [b_{ab}^n, b_{ac}^n, b_{ab}^n \times b_{ac}^n] \quad (3)$$

$$B^b = [b_{ab}^b, b_{ac}^b, b_{ab}^b \times b_{ac}^b] \quad (4)$$

C_b^n は車体座標系から航法座標系への座標変換行列であり, 基線ベクトル b の右肩の添え字 n は航法座標系, b は車体座標系による表記であることを表す. 座標変換行列の C_b^n の成分を c_{mn} とすると, オイラー姿勢角は以下の式で求めることができる.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{c_{32}}{c_{33}} \right) \quad (5)$$

$$\theta = \sin^{-1} (-c_{31}) \quad (6)$$

$$\psi = \cos^{-1} \left(\frac{c_{21}}{c_{11}} \right) \quad (7)$$

ここで, ϕ, θ, ψ はそれぞれ, ロール, ピッチ, ヨーの姿勢角である.

2.3 GPS-Gyro/IMU 複合姿勢標定装置単体試験結果

開発したGPS-Gyroの性能を評価するためGPSシミュレータを用いた静的試験と高精度IMUを使用した動的試験を行なった. Fig.7にGPS-Gyroの静的試験結果を示す.

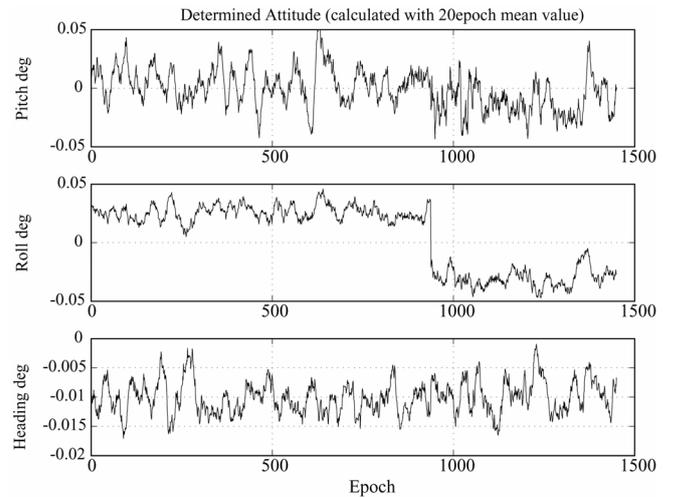


Fig. 7 GPS-Gyro static performance

試験ではすべての角度を 0° になるように設置し, GPS シミュレータ (Spirent, GSS7700) を使用して行なった. Fig.7 の中段 900epoch 付近の不連続に変化している箇所は最天頂衛星の

入れ替わりによる二重差を取るときの主衛星が変化したために起こるものである。静的試験ではヨー方向とピッチ方向においては 0.1deg rms, ロール方向では 0.2deg rms の精度であった。また図からも, 従来の IMU の特徴であるドリフトが発生していないことがわかる。なお, ロール方向において誤差がヨー, ピッチ方向の 2 倍であるのは, GPS アンテナのロール方向の基線長が, 他の 2 軸に 1/2 の長さのためである。

Fig.8 に GPS-Gyro/IMU 複合による車速が約 40km/h の時の動的な姿勢角推定結果を示し, Fig.9 に高精度 IMU(多摩川精機 TA-7546)を真値として姿勢角精度評価を行なった結果を示す。比較を行なう際に, GPS 時刻による同期をとり比較を行なった。精度はヨー方向では 0.073°, ピッチ方向では 0.064° ロール方向では 0.116° であった。本提案手法で用いている IMU は低価格帯のものであり, 提案手法により高精度 IMU と同等の性能を得ることができた。

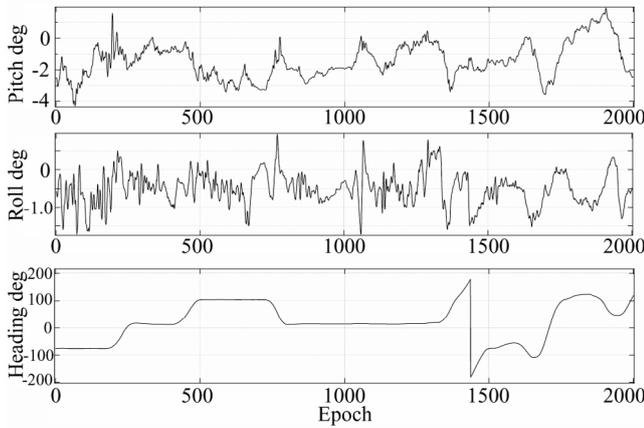


Fig. 8 GPS-Gyro/IMU dynamic performance

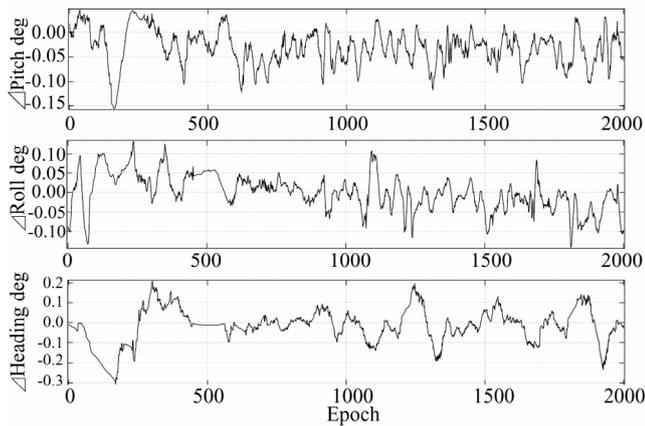


Fig. 9 GPS-Gyro/IMU's angular difference

3. 三次元環境復元

本手法ではレーザスキャナから得た距離情報と GPS-Gyro, GPS/IMU 複合航法装置による位置姿勢情報, さらにカメラから取得した色情報を複合して三次元の点群モデルに変換する。ENU(East North Up)座標系で示された道路周辺の三次元点群モデルは(8), (9)式のように表される。

$$\begin{bmatrix} N_{LRF} \\ U_{LRF} \\ E_{LRF} \\ W_{LRF} \end{bmatrix} = \mathbf{T}(N_V, U_V, E_V) \mathbf{R}_y(\psi_V) \mathbf{R}_z(\theta_V) \mathbf{R}_x(\phi_V) \begin{bmatrix} x_{LRF} \\ y_{LRF} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{LRF} \\ y_{LRF} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta_{LRF} \\ \sin \theta_{LRF} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで, r : レーザスキャナから得られた距離情報, θ_{LRF} : レーザ照射角度, $\mathbf{T}(x, y, z)$: 平行移動行列, N_V, U_V, E_V : 天板の位置, ϕ_V : 天板のロール角, θ_V : 天板のピッチ角, ψ_V : 天板のヨー角, $\mathbf{R}_x(\phi)$: x 軸回りの回転行列, $\mathbf{R}_y(\psi)$: y 軸回りの回転行列, $\mathbf{R}_z(\theta)$: z 軸回りの回転行列, $\Delta x_{LRF}, \Delta y_{LRF}, \Delta z_{LRF}$: GPS アンテナとレーザスキャナ間の距離, $\phi_{LRF}, \theta_{LRF}, \psi_{LRF}$: レーザスキャナの天板に対する設置角とする。Fig.10 に本システムで取得した三次元点群の一例を挙げる。電信柱や Km ポスト, 標識などの形状が取得できていることがわかる。

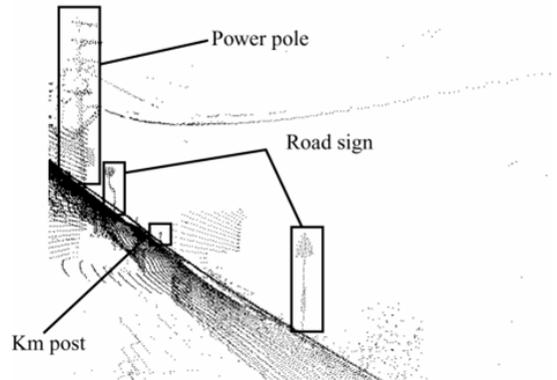


Fig.10 Example of obtained 3D point-cloud model

つぎに復元した三次元点群をカメラ画像の位置姿勢に基づき画像平面上に投影を行なう。Fig.11 に三次元点群の画像投影アルゴリズムを示す。投影を行なう際にはカメラはピンホールモデルと仮定し, 画像に対し収差補正を行なう。画像中心を原点とし横方向を x, 高さ方向を y, 奥行きを z とした際, レーザスキャナの計測点は(10)式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} x_{LRF} \\ y_{LRF} \\ z_{LRF} \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{T}(x_{cam}, y_{cam}, z_{cam}) \mathbf{R}_x(-\phi_{cam}) \mathbf{R}_z(-\theta_{cam}) \mathbf{R}_y(-\psi_{cam}) \begin{bmatrix} E_{LRF} \\ U_{LRF} \\ N_{LRF} \\ W_{LRF} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで $x_{cam}, y_{cam}, z_{cam}$: カメラの位置, ϕ_{cam} : カメラのロール角, θ_{cam} : カメラのピッチ角, ψ_{cam} : カメラのヨー角を表す。投影点は原点と三次元点の LOS ベクトルと画像平面の交点であるから, uv 座標系で(11)式のように表わされる。

めた uv 座標の位置の画素の色を計測点の色として登録する。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{LRF}f}{zP_s} + \frac{W}{2} \\ \frac{y_{LRF}f}{zP_s} + \frac{H}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで P_s :画像素子サイズ, f :焦点距離, W :画像幅 pixel H :画像高さ pixel である。Fig.12 に投影された点群をカメラ画像上に重ね合わせた図を示す。図から正しく、投影されていることがわかる。各画像において投影計算することで計測点群に色を付ける。また複数の画像において同一の点が投影された場合においては、画像から距離が増大するほど色ズレが発生しやすくなるため、計測点との画像取得位置の距離が近い画像の色情報を使用する。

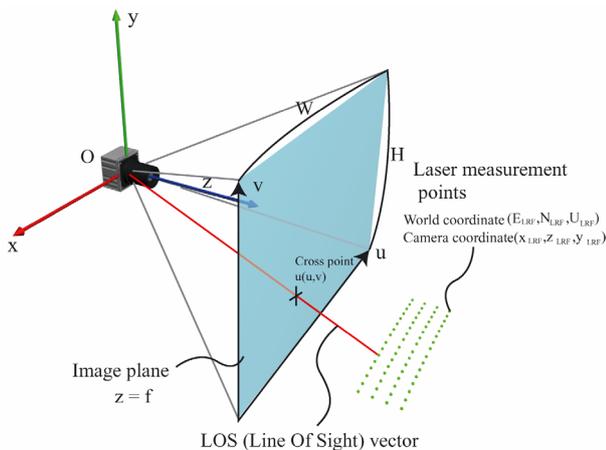


Fig.11 Image projection algorithm to the 3D model

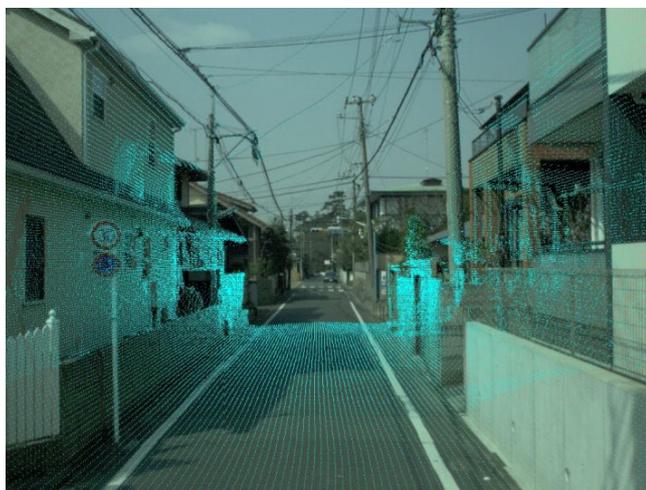


Fig.12 3D road model's 2D projection result

Fig.13 に色付き三次元復元結果例を示す。Fig.13-a は真上からの視点であり b,c は斜めからそれぞれ逆方向から同一箇所の復元結果を表示したものである。図中の A,B の箇所に横断歩道予告マークがあるが、視点が変わっても形状が崩れることなく再現されていることが見て取れる。MMS による三次元計測の絶対精度 (緯度経度高度)は GPS による静止測量結果 8084 点と比較した際に 1σ 0.095m であり、地図精度での

500 分の 1 を達成しており、再現性が高いことがわかる(9)。

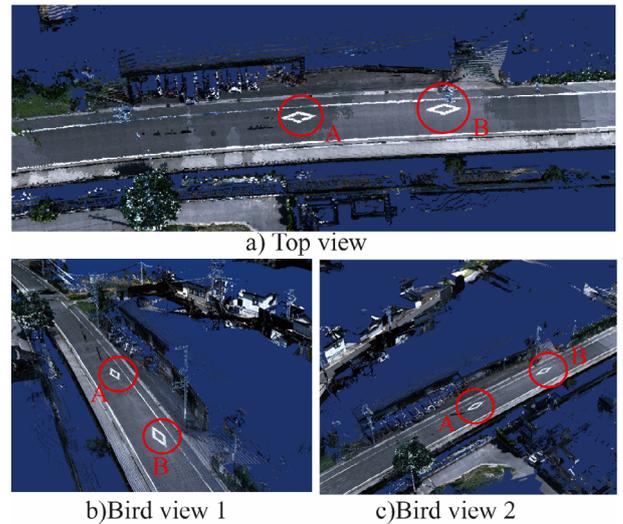


Fig.13 Reconstruction Result

4. 三次元空間情報管理システム G-Viz

1) システム概要

近年、航空写真測量や航空レーザの計測精度が向上したことで、百平方キロメートルを超える大規模な三次元地形測量を低コストで実現可能となり、国土地理情報として大規模測量データを利用する動きが広がっている。しかし、測量範囲の拡大と計測精度の向上によって取得されるデータ規模が増大し、すべてのデータを端末上で同時に取り扱うことが困難になっている。このため、大規模測量データの表示・解析処理は形状の簡略化や部分的な抽出を行い、データ規模を縮小することで実現しているのが現状である。G-Viz は MMS や航空機で取得した大規模データを簡略化や省略することなく表示することを目的として開発を行なった。G-Viz は、百平方キロメートルを超える領域の測量データを 15fps の表示性能で操作可能である。対応データ形式も、レーザによって取得された三次元点群データだけでなく、TIN(Triangulated Irregular Network)形状で記述された地表面データ、一般的な三次元 CAD データ、さらには河川測量データにも対応している。本ソフトウェアによる三次元表示例を Fig.14 に示す。

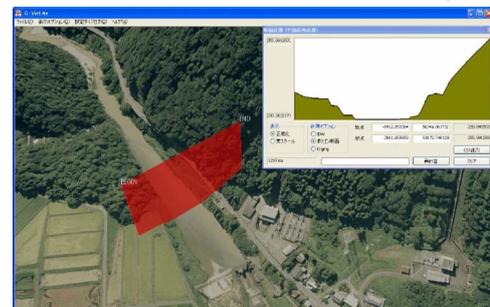


Fig.14 G-Viz over view

Fig.15 に G-Viz のソフトウェアシステム構成を示す。G-Viz はスタンドアロンで動作するソフトウェアシステムで、

TIN や三次元点群データなどを G-Viz 専用データフォーマットに変換する部分と、表示する部分から構成される。表示部分はデータへのアクセス手段を提供するデータマネージャと、地形図の表示を行なうシステムアプリケーションから構成される。ユーザはシステムアプリケーションの GUI を用いてインタラクティブ操作を行ない、閲覧とデータ解析を実行する。これらの操作はマウス操作によって行なわれ、表示内容や計測ツールの起動はレイヤパネルによって行なうことができる。

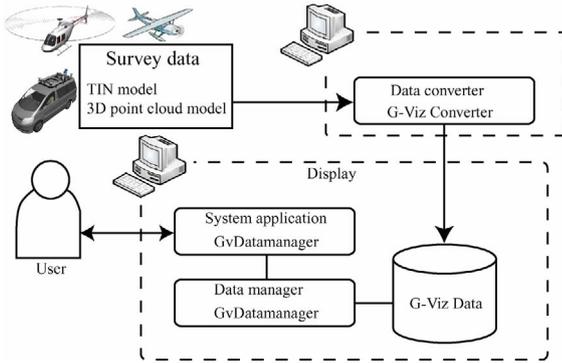


Fig. 15 G-Viz system configuration

2) データ構造

大容量のデータに対して効率的な表示・検索処理を実現するため、本システムでは階層化された空間データ構造を採用している。G-Viz のデータ構成を Fig.16 にデータ構造を Fig.17 に示す。

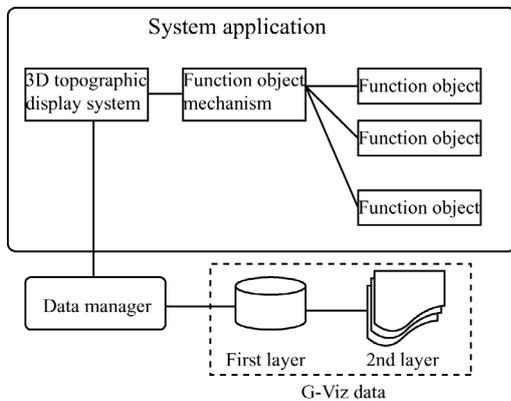


Fig. 16 G-Viz data configuration

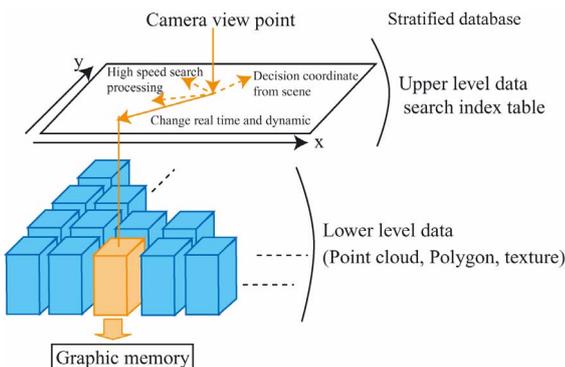


Fig. 17 G-Viz data structure

変換系から出力される G-Viz データは、表示単位で管理される一次レイヤと、空間インデクスによる高速なデータ検索を実現する二次レイヤから構成され、データファイル内に格納される。データ変換では入力されたデータを解析し、適切な一次レイヤ領域を選択する。また座標軸によるソーティングと検索インデクスの作成を行ない、二次レイヤデータを生成する。データ表示の際にはカメラ視点やマウス入力に応じて、二次レイヤによりデータ検索を行ない、適切な一次レイヤの領域を選択し、表示メモリにデータ転送を逐次行なう。

3) 機能オブジェクト機構

本システムは三次元地形図の表示機能を基本機能として提供しているが、アプリケーションに応じた処理を追加するために、機能オブジェクト機構と呼ばれるカスタマイズ機能が用意されている。ユーザは、機能オブジェクトと呼ばれるソフトウェアモジュールを開発し、機能オブジェクト機構の管理下に配置することで各種アプリ機能を実現する。機能オブジェクトをユーザが追加することで、三次元地形図の表示だけではなく、さまざまな周辺情報を統合管理する 3D-GIS システムとして拡張することも可能である。

5. 実証試験

MMS の有効性を確認するため、実際の道路において三次元計測を行なった。実証試験では、実際の都市部の一区画をくまなく走行し計測を行なった。また、より高速でもデータ計測ができることを確認するため、高速道路においてもデータ計測を行なった。都市部では最大時速 40km、高速道路では最大時速 80km で他車の交通速度に合わせて走行した。計測に要した時間はどちらも半日程度であり、後処理による色付き三次元復元までの処理時間は、計測時間の約 1.5 倍かかる。Fig.18 に都市部における復元結果を G-Viz に表示した結果を示す。表示は 15fps でストレスなくウォークスルーができることを確認した。Fig.18-a は走行エリア全体を示している。都市部の走行エリアは約 1.2km 四方であり、エリア内道路の各車線をすべて走行し複数回の走行結果を重ねて表示している。Fig.18-b はエリア内にある交差点であり図中の ABCD のすべての方角から計測を行なっている。Fig.18-c~f は b 中の ABCD の各点からの視点で交差点内を表示したものである。路面の傾斜や高さ変化なども精密に再現した緻密な道路が画面奥まで続き、画面への没入感の高い、都市空間の疑似歩行体験が可能になることがわかる。G-Viz においては、視点の移動や方向の回転が高速で可能なため、ユーザの意図どおりに動かすことが可能である。また MMS で取得した三次元モデルは 360° 全周のカラーモデルであるため、どの方向からも交差点のようすが確認することができる。また A, B, C の各点からの視界は良好であることがわかるが、D からの視点では左右に障害物があるため見通しが悪いことがわかり、道路などの管理の際に危険箇所の確認を実際の現場に行くことなく確認することができる。Fig.19 に高速道路の計測結

果を示す。計測では総延長約 40km を走行した。Fig.19-a は高速道路のサービスエリアへの進入路、Fig.19-b は高速道路を復元したものを示す。Fig.19-b の箇所を計測した際の MMS の速度は時速 80km であったが、速度に関係なく、正しく三次元復元されていることが見て取れる。三次元モデルは時間情報付きの世界測地系で管理されているため、データの部分更新も容易に行なうことができる。さらに将来的には、異なる時間帯で取得した MMS データ間の空間差分を取ることで、時系列的な形状変化域の自動抽出も可能であるため、道路などの公共物の管理や災害時の被災状況の判定に応用することも可能である。

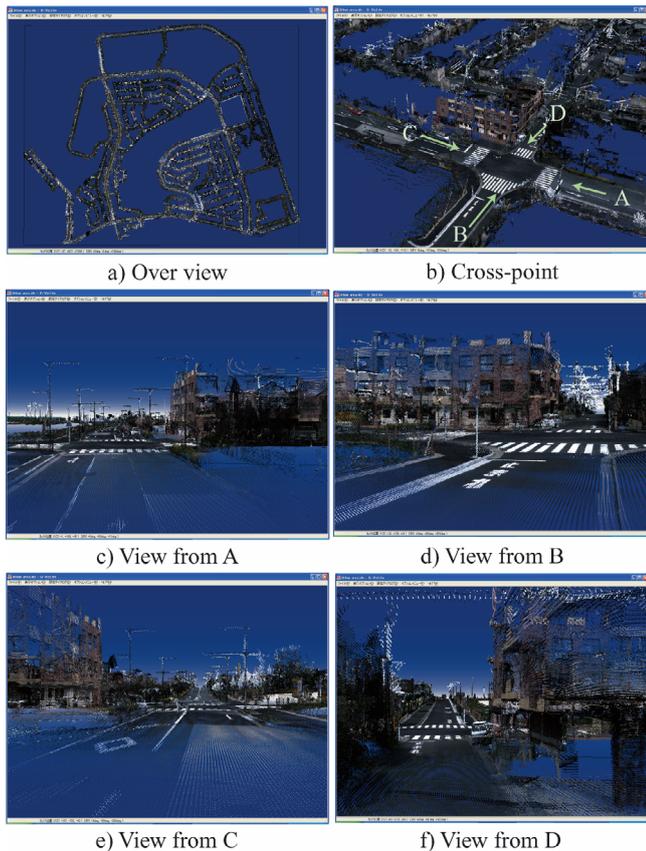


Fig.18 3D model urban area

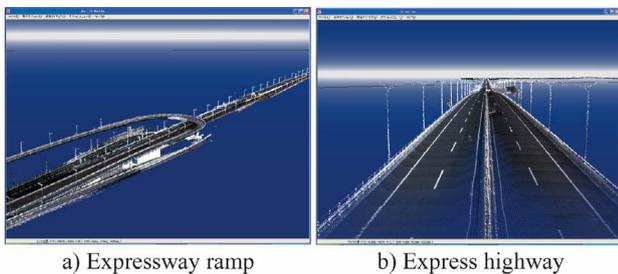


Fig.19 3D model highway

6. 結言

本論文では、都市空間の道路周辺の詳細な三次元復元を高効率かつ安全に行なうことが可能な MMS を提案した。また、大規模な三次元データを高速に表示可能な G-Viz と複合してシステムアップを行なった。これらのシステムを評価するた

めに実際の道路環境において MMS を運用し、実証試験を行なった。その結果、あらゆる視点からの表示でも三次元モデルが破綻することなく復元できていることを確認し、画面への没入感の高い、都市空間の擬似歩行体験が可能なシステムとしての有効性を確認した。本システムを用いることで、広範囲に渡る道路周辺の現況計測が安全かつ効率的に行なうことが可能となり、道路の効率的な設計改善や、維持管理への適用が可能である。

参考文献

- 1) F. Leberl, M. Gruber, M. Ponticelli, S. Bernoegger, R. Perko: The Ultracam Large Format Aerial Digital Camera System, Proceedings of the ASPRS Annual Convention, Anchorage, USA, CD, 2003
- 2) 小野晋太郎, 川崎洋, 平原清隆, 影沢政隆, 池内克史: 水平レンジスキャンを利用した自己位置推定による三次元都市モデルの構築, 第2回 ITSシンポジウム, 2003
- 3) 浅井俊弘, 神原誠之, 横矢直和: ウォークスルーのための全周レンジファインダと全方位カメラを利用した現実環境の三次元モデル化, 情報処理学会研究報告, pp 73-78, 2004
- 4) Kimitoshi Yamazaki, Masahiro Tomono, Takashi Tsubouchi, Shinichi Yuta: 3-D Object Modeling by a Camera Equipped on a Mobile Robot, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp.1399-1405, 2004
- 5) D. Manandhar, R. Shibasaki: VEHICLE-BORNE LASER MAPPING SYSTEM (VLMS) FOR 3-D GIS, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International, pp.2073-2075, 2001
- 6) Christian Frueh, Siddharth Jain Avidesh Zakhor: Data Processing Algorithms for Generating Textured 3D Building Facade Meshes from Laser Scans and Camera Images, International Journal of Computer Vision **64** (2), pp.159-184, 2005
- 7) 辻求, 入澤元, 下垣豊, 今野達夫, 柴崎亮介, 趨卉菁, 東明佐久良, 山崎由喜, 吉原章博, 羽山和紀: 車両搭載型センサを用いた三次元都市空間モデルの自動構築, GIS -理論と応用- **vol.13 no.1** (2005), pp91-98, 2005
- 8) J. Meguro, J. Takiguchi, R. Kurosaki and T. Hashizume: Development of an Autonomous Mobile Surveillance System Using a Network-based RTK-GPS, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), April 2005
- 9) Kiichiro Ishikawa, Yoshiharu Amano, Takumi Hashizume, Jun-ichi Takiguchi, Naoyuki Kajiwara: A Mobile Mapping System for Precise Road Line Localization Using a Single Camera and 3D Road Model, Journal of Robotics and Mechatronics **Vol.19 No.2**, pp174-180, 2007

[著 者 紹 介]

石川 貴一 朗 (学生会員)



2006年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程終了。同年同博士後期課程入学。2008年日本学術振興会特別研究員。現在に至る。GPSを用いた移動計測システムの研究に従事。日本機械学会会員

天野 嘉春 (正会員)



1994年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了，同年，同大学理工学研究所助手，客員講師，専任講師，助教授を経て，2008年同教授。コージェネレーション，動力システム工学などの研究に従事。日本機械学会などの会員（工学博士）。

橋 詰 匠 (正会員)



1979年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了，同年，同大学理工学研究所助手，専任講師，助教授を経て，1987年同教授。動力エネルギーシステムなどの研究に従事。日本機械学会などの会員（工学博士）。

瀧 口 純 一 (正会員)



1986年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)鎌倉製作所入社。英国立エジンバラ大学大学院修了を経て，航空機搭載機器制御系設計に従事。日本機械学会などの会員（工学博士）。

清 水 聡



1990年 東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社
情報処理システムの設計開発に従事