モバイルマッピングシステム（MMS）による河川計測の研究

株式会社パスコ
パスコ総合研究所
橘　菊生

© PASCO CORPORATION 2016

研究の背景と目的

- 気象変動に伴うゲリラ豪雨等による堤防決壊などの甚大な被害が多発
- 河川堤防のモニタリングの重要性が高まる
- 河川管理手法の一層の効率化・高度化が求められている
- 現在の河川堤防の維持管理は、実測による定期縦横断測量
- 200m程度の間隔で堤防の形状を把握
  - ➢ 通常法肩、法尻および小段といった堤体の主要な変曲点の位置を把握しているにすぎない
  - ➢ 実測による手法は迅速性に劣り、人的な労力も必要
- 河川堤防管理を高度化、効率化することを目的とし、MMSの計測技術および分析技術を確立する

© PASCO CORPORATION 2016

発表内容

- MMSの概要
  - MMSの概要と適用事例
- 標準型MMSによる河川堤防計測
  - 精度検証実験
  - 堤防のモグラ穴、亀裂の検出実験
  - 河川堤防を効率的に計測するためのMMSの改良
  - 堤防の変位・変状の分析技術の開発
  - 堤防3次元データの可視化技術の開発
  - MMSを適用することにより得られる知見のまとめ
- 河川堤防計測用MMSによる河川堤防計測
  - 河川計測用MMSの精度検証
- まとめ

© PASCO CORPORATION 2016

MMSの概要と適用事例

© PASCO CORPORATION 2016

MMSの概要

- Mobile Mapping System（モバイルマッピングシステム）
- 自己位置・姿勢センサ：GNSS、IMU、オドメータ（距離計）
- 対象物測定センサ：カメラ（ビデオ、RGB、熱赤外）、レーザスキャナ、地中レーダ　ほか
- ⇒　GISやマッピングのための高精度3次元空間情報を走行しながら取得するシステム

- 1990年代前半より研究・開発開始
- GPSVAN（1991,OSU）
- VISAT（1993,U of Calgary）

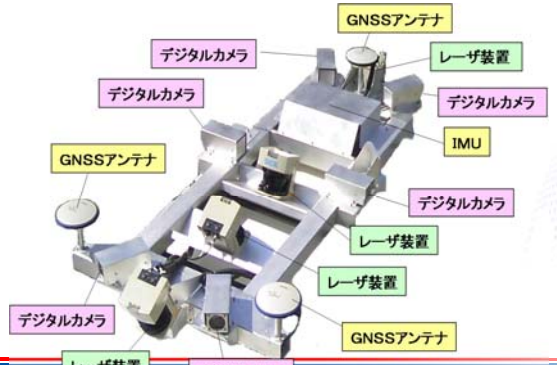
Mobile Mapping Technology for Road Network Data Acquisition
C. Vincent Tao　Journal of Geospatial Engineering, Vol. 2, No.2, pp. 1-13.より

ＭＭＳ機器構成（道路台帳図作成用機器）

●GNSSアンテナ　３台
●IMU（慣性計測装置）　１台
●オドメータ（距離計）　１台

●レーザスキャナ：２～４台（前方上下、後方上下）
→走査範囲180度、１度間隔、75回/秒
→１秒間に、13,575発/台のレーザを照射
→相対精度：1.0cm以内（衛星可視状態時）

●デジタルカメラ（500万画素）
：２～６台
（前方左右、後方左右、側面左右）



車両内部

オドメータ（距離計）

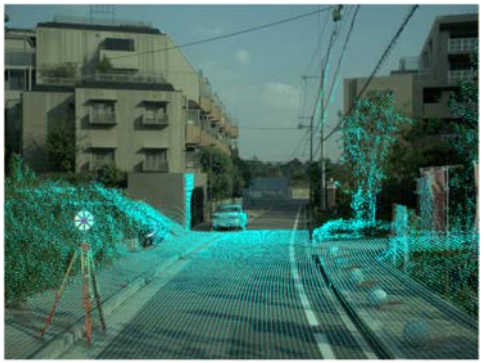
道路台帳図作成用MMSの精度検証

- 路線始終点に検証点を設置
  ⇒公共基準点上にターゲットを設置
- 6路線　16点の検証点配置

3級及び4級公共基準点

道路台帳図作成用MMSの精度検証

- 検証点（ターゲット）に照射されたレーザデータをもとに検証点の座標値を取得
- 計測した座標値と公共基準点の既知座標を比較



MMS画像データと３次元レーザ点群

MMS計測レーザ点群データ　検証結果

公共基準点既知座標とMMS計測値を比較

観測経路名	点名	検証点座標　単位:m			検証点MMS観測座標　単位:m			MMS検証点残差　単位:m			
		X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	42.06	X残差	Y残差	水平残差	標高残差
路線1	310001	−130383.729	−45941.487	97.820	−130383.612	−45941.468	97.869	0.117	0.019	0.119	0.049
	310029	−131026.787	−46325.802	111.340	−131026.760	−46325.808	111.529	0.027	−0.006	0.028	0.189
	310038	−131214.875	−46390.125	102.178	−131214.849	−46390.143	102.240	0.026	−0.018	0.032	0.062
路線2	310081	−131724.797	−46052.108	78.967	−131724.825	−46052.133	78.843	−0.028	−0.025	0.038	−0.124
	310085	−131747.055	−46542.648	79.190	−131747.005	−46542.627	79.185	0.050	0.021	0.054	−0.005
	310117	−132102.882	−46232.586	71.397	−132102.926	−46232.556	71.268	−0.044	0.030	0.053	−0.129
路線3	320033	−133738.116	−47552.254	37.944	−133738.069	−47552.252	37.955	0.047	0.002	0.047	0.011
	320034	−133385.493	−47302.589	47.031	−133385.421	−47302.608	47.009	0.072	−0.019	0.074	−0.022
	320036	−133655.543	−47382.201	42.058	−133655.493	−47382.167	42.057	0.050	0.034	0.060	−0.001
路線4	30179	−133686.427	−48237.892	43.530	−133686.394	−48237.876	43.503	0.033	0.016	0.037	−0.027
	310513	−133765.446	−47833.726	31.051	−133765.443	−47833.717	30.871	0.003	0.009	0.009	−0.180
路線5	S0103	−134893.898	−47558.112	24.509	−134893.842	−47558.130	24.565	0.056	−0.018	0.059	0.056
	S0131	−134990.164	−47584.421	22.209	−134990.061	−47584.446	22.152	0.103	−0.025	0.106	−0.057
	S0135	−134896.785	−47690.706	23.534	−134896.811	−47690.675	23.552	−0.026	0.031	0.040	0.018
路線6	310410	−136262.255	−49519.921	6.900	−136262.314	−49519.927	6.902	−0.059	−0.006	0.059	0.002
	1A141	−135620.182	−49654.078	9.962	−135620.155	−49654.060	9.918	0.027	0.018	0.032	−0.044

	X残差	Y残差	水平残差	標高残差
較差の標準偏差	0.056	0.021	0.060	0.085
較差の最大値	0.117	0.034	0.119	0.189

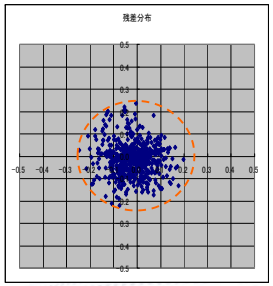
道路台帳図作成用MMSの精度検証

- MMSレーザ点群、画像データより、地物情報を数値図化
- TS実測データの座標値と比較検証

道路台帳図作成用MMSの精度検証

地形地物図化検証結果（全6路線：864点）　TS実測値とMMS計測値を比較

点番号	点種分類コード	DM座標　単位:m			手動抽出座標　単位:m			MMS検証点残差　単位:m			
		X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X残差	Y残差	水平残差	標高残差
1	2213	−135035.437	−47643.854		−135035.395	−47644.022		0.042	−0.069	0.080	
2	2213	−135034.461	−47642.721		−135034.456	−47642.725		0.005	−0.005	0.008	
3	2213	−135031.872	−47638.490		−135031.838	−47638.476		0.039	−0.026	0.047	
4	4151	−135028.545	−47639.471		−135028.498	−47639.596		0.047	−0.125	0.134	
5	4151	−135028.158	−47636.663		−135028.142	−47636.765		0.016	−0.102	0.103	
6	2213	−135027.276	−47632.100		−135027.249	−47632.119		0.028	−0.019	0.033	
7	2235	−135026.215	−47630.886		−135026.218	−47630.957		−0.003	−0.069	0.069	
8	2213	−135020.681	−47622.318		−135020.651	−47622.334		0.030	−0.020	0.036	
9	4151	−135017.169	−47620.403		−135017.159	−47620.508		0.010	−0.105	0.105	
10	2213	−135016.944	−47616.753		−135016.912	−47616.775		0.033	−0.022	0.039	
11	2235	−135014.474	−47613.461		−135014.422	−47613.487		0.052	−0.026	0.058	
12	2213	−135009.913	−47606.309		−135009.873	−47606.336		0.040	−0.027	0.048	
13	2235	−135007.524	−47603.181		−135007.518	−47603.273		0.015	−0.092	0.093	
14	2213	−135002.749	−47595.687		−135002.703	−47595.718		0.046	−0.031	0.055	
15	4151	−135001.318	−47597.278		−135001.332	−47597.408		−0.014	−0.132	0.133	
16	2235	−135000.646	−47592.961		−135000.721	−47593.023		−0.075	−0.062	0.097	
17	4151	−134999.621	−47596.438		−134999.592	−47596.533		0.029	−0.095	0.100	
18	2213	−134994.979	−47584.181		−134994.928	−47584.215		0.051	−0.034	0.061	
19	2235	−134990.427	−47577.808		−134990.501	−47577.881		−0.074	−0.083	0.111	
20	4151	−134986.812	−47576.053		−134986.857	−47576.156		0.055	−0.103	0.117	
21	2213	−134885.603	−47570.294		−134885.564	−47570.320		0.038	−0.026	0.046	
22	2213	−134883.503	−47566.922		−134883.471	−47566.941		0.031	−0.020	0.037	
23	2235	−134880.021	−47561.730		−134880.141	−47561.848		−0.120	−0.118	0.168	
24	2213	−134977.141	−47556.699		−134977.120	−47556.708		0.021	−0.013	0.024	
25	2213	−134970.816	−47546.691		−134970.904	−47546.698		0.012	−0.007	0.014	
26	2235	−134868.886	−47543.997		−134868.957	−47544.098		−0.031	−0.101	0.106	
27	4151	−134868.630	−47546.250		−134868.609	−47546.307		0.021	−0.057	0.057	
28	4151	−134866.833	−47540.873		−134866.832	−47540.942		0.001	−0.069	0.069	
29	2213	−134864.779	−47536.839		−134864.763	−47536.845		0.015	−0.010	0.018	
30	2213	−134861.160	−47531.024		−134861.156	−47531.026		0.004	−0.002	0.005	
31	2235	−134859.759	−47529.160		−134859.783	−47529.219		−0.024	−0.059	0.064	
32	2213	−134856.948	−47524.671		−134856.948	−47524.670		−0.001	0.001	0.001	
33	2213	−134854.552	−47521.623		−134854.541	−47521.632		0.012	−0.009	0.015	
34	4151	−134850.813	−47516.792		−134850.860	−47516.760		−0.167	0.032	0.170	
35	4151	−134850.614	−47520.969		−134850.538	−47520.997		−0.024	−0.028	0.037	
36	2235	−134847.814	−47514.886		−134847.886	−47514.928		−0.072	0.058	0.092	
37	2213	−134847.500	−47514.456		−134847.493	−47514.466		0.007	−0.008	0.010	
38	2213	−134844.783	−47512.233		−134844.758	−47512.264		0.024	−0.031	0.040	
39	4151	−134844.344	−47516.238		−134844.411	−47516.347		−0.067	−0.109	0.128	
・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
861	4151	−130471.680	−46011.928		−130471.749	−46011.913		−0.069	−0.084	0.108	
862	4151	−130442.705	−45999.536		−130442.778	−45999.623		−0.073	−0.087	0.114	
863	4151	−130441.893	−45997.516		−130441.915	−45997.577		−0.022	−0.061	0.065	
864	4151	−130393.474	−45936.553		−130393.277	−45936.568		0.197	−0.015	0.198	
						較差の標準偏差		0.064	0.062	0.089	
						較差の最大値		−0.247	0.236	0.248	
						制限値(標準偏差)				0.250	



全6路線の誤差分布

手動抽出結果:864	X残差	Y残差	水平残差
較差の標準偏差	0.064	0.062	0.089
較差の最大値	−0.247	0.236	0.248
制限値(標準偏差)			0.250

公共測量作業規程準則第８０条
（数値地形図データの位置精度）

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差
500	0.25m以内	0.25m以内

MMSによる基盤図データ作成

- MMSは大縮尺基盤図データ作成の標準ツール
- 2次元地図データ→高精度三次元空間情報データ
  - 運転者・歩行者目線の空間情報
  - 構造物・付帯設備を含めた資産の維持管理支援
  - 道路交通や災害時のシミュレーション

路面性状測定装置の開発

1971 ROADRECON-70（ひび割れ自動測定装置）

完成予想図

ロードレコン1号車

1975 ROADRECON-75（わだち掘れ自動測定装置）

わだち掘れ条線投影装置の室内模型実験

路面性状測定装置

1993 道路前方映像撮影・路面概査システム「View Recon」
2000 排水性舗装の空隙測定車「SONIC RECON」

ビューレコン車

ソニックレコン車

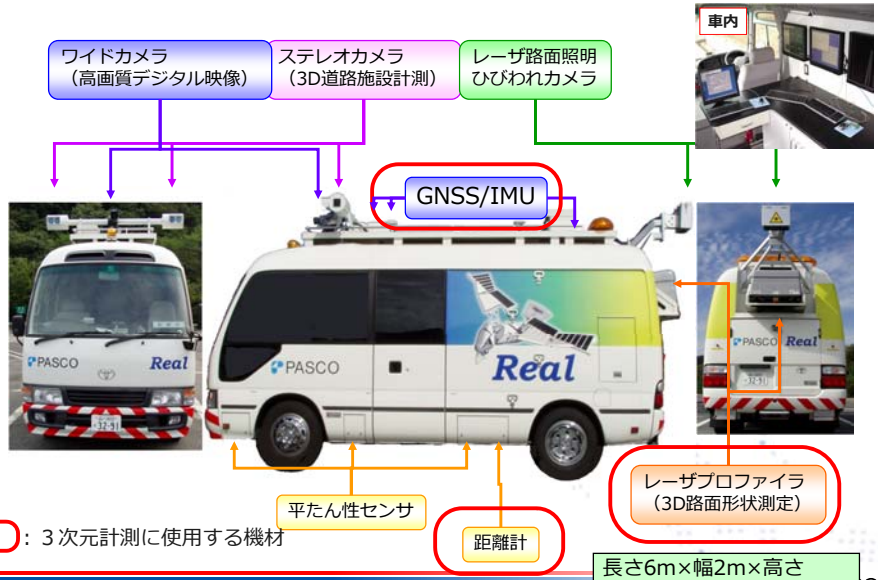
2003～ 道路現況計測システム「Real」

2003：Real　1号車

2010：Real　2号車

2012：Real　3号車

路面性状測定車両

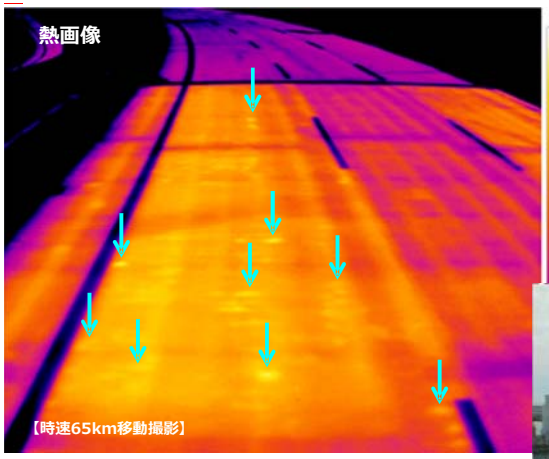


：３次元計測に使用する機材

高性能路面性状測定車

- **高機能化**：レーザ反射強度の取得、計測幅員を拡大
- **高精度化**：高密レーザスキャナ・３CCDカメラ
- **赤外線カメラ搭載可能**：舗装体内部・トンネル覆工面等の損傷把握

舗装内部損傷（空隙）の例（鋼床版）



（↓）：舗装内部空隙

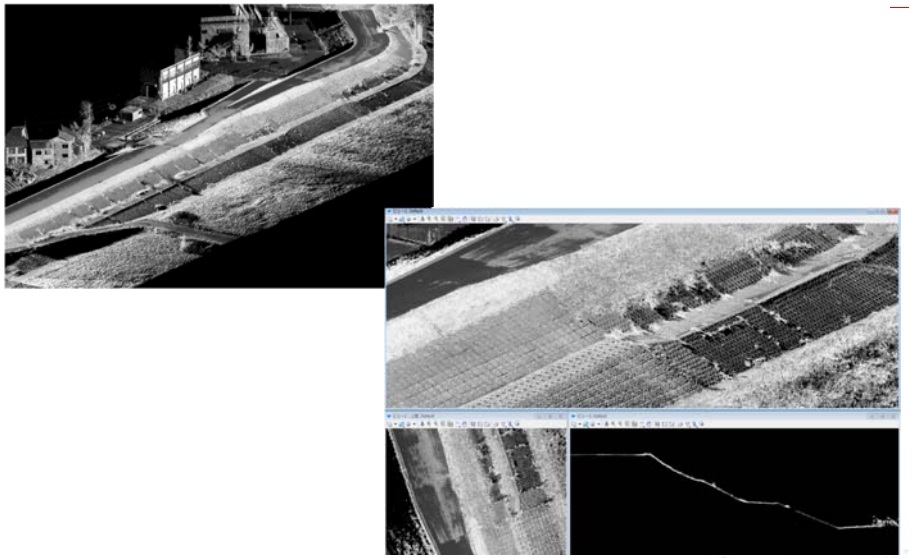
ポットホール前兆
（内部空隙の検出）

路面性状測定車両

- 1970年代から開発
- 2003年よりGNSS/IMUの搭載による位置精度の向上
- 路面の3次元モデル化
- 熱赤外センサによる空隙調査
- 新たな道路施設点検・管理

標準型MMSによる河川堤防計測

MMSによるレーザ点群例

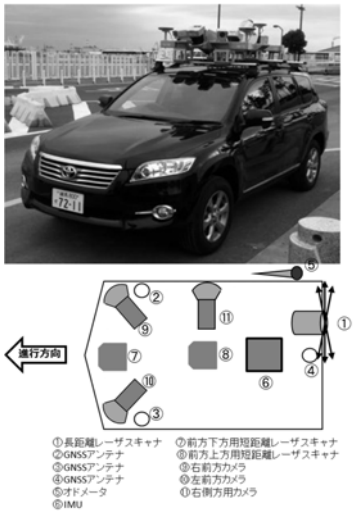


MMSによるレーザ点群例

精度検証項目

- MMSの自己位置姿勢精度検証
- 堤防天端の標高精度検証
- 断面方向(高水敷)の位置精度検証
- 堤防断面形状の計測精度検証

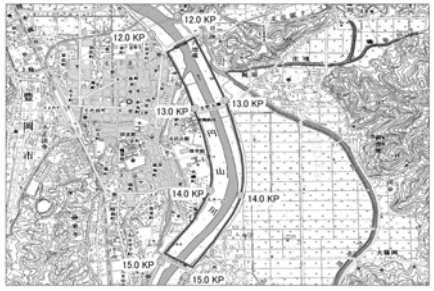
使用したMMSの概要



項目		性能
GNSS/IMU	取得間隔	GNSSアンテナ 2周波1台、1周波2台
	計測方法	FKP
	取得間隔	200Hz
	姿勢精度	ロール&ピッチ角 0.015° ヘディング角 0.030°
オドメータ		1台
カメラ	台数	3台
	取得間隔	最大10フレーム/秒
	ピクセルサイズ	2,448×2,048ピクセル
レーザスキャナ	台数	VQ250 1台
	パルスレート	最大300KHz
	スキャンレート	最大100Hz
	レーザ光の広がり角	0.3mrad
	照射角度	360°
	到達距離	最大500m (パルスレート 50KHz時)
	設置角度	固定
	設置高さ	2.3m

精度検証　検証場所　兵庫県豊岡市　円山川堤防

- 円山川堤防
  - 豊岡盆地全体が年間約1cm 沈下
  - 堤防の嵩上げ・強化工事等を行っても堤防の自重増加により地盤沈下が促進される懸念がある
  - 平成16 年の台風23 号の豪雨時に29 箇所で越水、破堤などの大きな被害が発生
    - 災害後に堤防天端の沈下計測や、新規腹付け盛土による変状分析並びに経年変化計測が実施されている
    - 効率的かつ高精度に河川堤防の変状を計測する手法の構築が要求されている地域
    - 堤防の沈下状況を定期的な計測で捕らえるため、2~3cmの精度の計測精度が求められる



国土地理院数値地図を使用

精度検証　データ取得

- 走行速度　10km/h
- パルスレート：300KHz
- スキャンレート：50Hz

- 進行方向の点間隔：0.06m
- 20m先の壁面上の点間隔：0.02m

精度検証　MMSの自己位置姿勢精度

MMSの自己位置姿勢解析法の精度比較

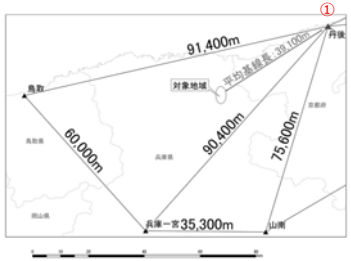
① 電子基準点を用いたFKP方式（既設FKP）
② 電子基準点を用いたRTK方式（既設RTK）
③ 電子基準点と新設基準点を用いたFKP方式（新設FKP）
④ 新設基準点を用いたRTK方式（新設RTK）

- GNSSによるMMSの位置計算：座標既知の固定局との相対測位
- GNSSの誤差要因：電離層や対流圏における電波の伝搬遅延、衛星の時計誤差、軌道誤差等
- FKP方式：MMSの周辺の複数の既知点の観測データから誤差量を推定し、この誤差量からMMSの周辺の補正パラメータを算出し、自己位置姿勢解析を行う際に、補正パラメータを用いて精度を向上させる手法（データは通常プロバイダーから配信される）
- RTK方式：固定局の受信データを移動局に送信し、リアルタイムで移動局の位置を算出する手法

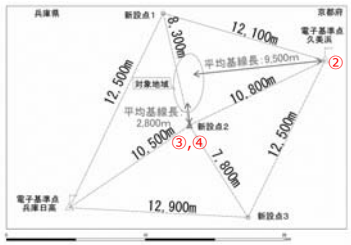
精度検証　MMSの自己位置姿勢解析

MMSの自己位置姿勢解析法の精度比較

① 電子基準点を用いたFKP方式（既設FKP）
② 電子基準点を用いたRTK法（既設RTK）
③ 電子基準点と新設基準点を用いたFKP方式（新設FKP）
④ 新設基準点を用いたRTK法（新設RTK）



対象地域と電子基準点および既設FKP固定局の位置関係



対象地域と電子基準点及び新設基準点の位置関係

精度検証　検証点

MMSの自己位置姿勢解析精度検証

現地の測量結果と、レーザ点群上で計測した座標値を比較

精度検証　MMSの自己位置姿勢解析　検証結果

解析後予測誤差と3次元較差の平均二乗誤差（単位:m）

	走行番号	1	2	3	4	平均基線長
既設FKP	解析後予測誤差	8.508	8.997	10.812	2.236	39,100
	平均二乗誤差	0.497	0.479	0.038	0.150	
既設RTK	解析後予測誤差	0.009	0.008	0.009	0.008	9,500
	平均二乗誤差	0.110	0.087	0.050	0.050	
新設FKP	解析後予測誤差	0.008	0.010	0.007	0.007	2,800
	平均二乗誤差	0.060	0.061	0.054	0.057	
新設RTK	解析後予測誤差	0.008	0.008	0.008	0.007	2,800
	平均二乗誤差	0.053	0.067	0.050	0.041	

解析後予測誤差：MMSの自己位置姿勢解析を行った際に算出される自己位置の推定誤差量

精度検証　MMSの自己位置姿勢解析　検証結果

- 既設のFKPの結果（基線長：39,100m ）
  - ◻ 解析後予測誤差：2mから11m
  - ⇨ 計算された自己位置の信頼性がない
  - ◻ 3次元較差の平均二乗誤差：
  - ➢ 1回目と2回目の計測では0.5m程度と非常に大きい
  - ➢ 3回目の計測で0.05m以内と良好な結果
  - ➢ 4回目の計測でも0.15mと大きい
  - ⇨ 固定局とMMSの基線長が39,100mと非常に長いこと、あるいはFKPの面補正パラメータの計算に使用した電子基準点間の距離が非常に長いことが原因と考えられる
  - ⇨ 計測精度として数センチメートルの値が求められている河川堤防の計測には適用できない

精度検証　MMSの自己位置姿勢解析　検証結果

- 既設RTKの結果（平均基線長：9,500m）
  - ◻ 3次元較差の平均二乗誤差：
  - ➢ 1回目の計測では0.1m以上
  - ➢ 3回目、4回目の計測で0.05mの良好な結果。
  - ⇨ 基線長がRTKの適用範囲である10,000mに近いことから、精度が低下したものと考えられる
- 新設RTK及び新設FKP（平均基線長：2,800m）
  - ➢ 0.07m未満で、常に高い精度が得られた
  - ➢ 面補正パラメータを使用した新設FKPと使用していない新設RTKの結果に大きな差異は見られない
  - ⇨ 固定局とMMSの基線長が短い場合は、双方の点における電離層や対流圏における電波の伝搬遅延などの条件がほぼ等しく、一括して除去できるため面補正パラメータによる補正を行わない場合でも高精度の計測が可能となったと考えられる

✓ MMSを用いた河川堤防の計測精度を向上させるには、対象地域から3,000m程度の距離に新設の固定局を1点設置してGNSSの解析を行うことが有効

精度検証　堤防天端の標高精度

現地の測量結果と、レーザ点群上で計測した標高値を比較

精度検証　堤防天端の標高精度　検証結果

		9月計測		11月計測	
点番号	追加距離	往路	復路	往路	復路
1	0.000	0.026	0.018	0.023	0.014
2	85.500	0.020	0.014	0.042	0.017
3	96.360	0.023	0.011	0.041	0.026
4	146.190	0.009	0.004	0.021	0.010
5	196.190	0.005	0.000	0.002	0.005
6	245.710	0.007	0.007	0.007	0.003
7	295.800	0.016	0.026	0.017	0.019
8	320.740	0.009	0.017	0.015	0.018
衛星数	平均値	9	9	8	8
	最少値	7	8	4	7
DOP	平均値	1.7	1.7	2.2	1.8
	最大値	3.0	2.2	2.6	2.2

計測時期	9月計測データ	11月計測データ
平均値(m)	0.014	0.018
標準偏差(m)	0.009	0.011
平均二乗誤差(m)	0.017	0.021

精度検証　堤防天端の標高精度　検証結果

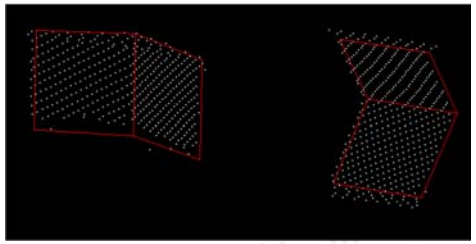
- 新設RTK（平均基線長：2,800m）
  - ◻ 標高値の検証結果：
  - ➢ 平均値は0.014m（９月）と0.018m（11月）
  - ➢ 平均二乗誤差が0.02m程度
  - ➢ 標準偏差が0.01m程度
  - ⇨　非常に高い精度が得られた
- 9月と11月で衛星数やDOP値等のGNSSの条件が異なるが、その違いは顕著に表れていない
  - ⇨　条件が異なっても精度の高い結果が得られている

✓新設RTKによるMMSの堤防計測では、天端の標高が0.02m程度の精度で取得できる

精度検証　断面方向の位置精度(高水敷)

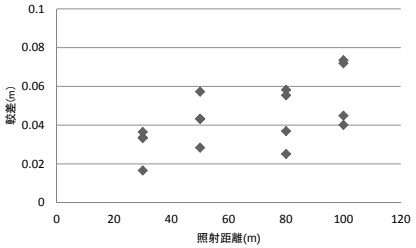
ターゲットボード(0.9m× 0 .9m)

30m,50m,80m,100m地点に設置

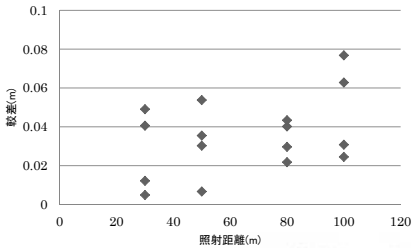


現地の測量結果と、レーザ点群上で計測した座標値を比較

精度検証　断面方向の位置精度　検証結果



水平位置における実測とMMS点群観測値の較差

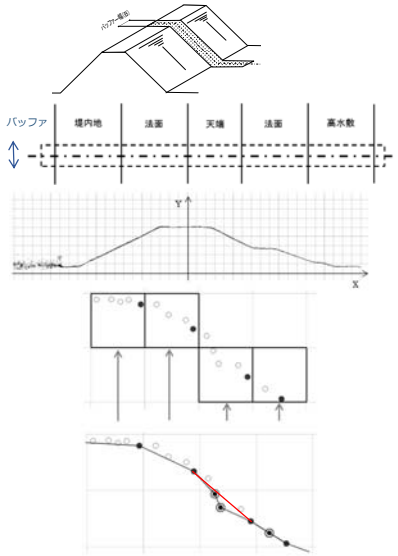


標高における実測とMMS点群観測値の較差

精度検証　断面方向の位置精度　検証結果

- 新設RTK（平均基線長：2,800m）
  - ◘ 水平位置および標高値の検証結果：
  - ➢ 照射距離が約30m以内の近距離においては、較差の最大値が約0.05mの精度
  - ➢ 照射距離が100mと遠方になった場合においても、水平位置および標高値とも較差の最大値が約0.08m以内の精度
  - ➢ 標準偏差が0.01m程度
  - ⇨　非常に高い精度が得られた
- 照射距離に比例して位置精度が低下する傾向を確認

堤防断面形状の計測精度検証　堤防断面形状の作成



① 点群の抽出処理
河川堤防の断面方向に線を引き、この線（以下、断面線と称する）を中心に任意に設定する幅（バッファ）で領域を設ける。次に、設定した領域の４隅の水平位置をもとに、領域に包括されるレーザ点群を抽出する。

② 点群の座標変換とメッシュ領域の作成
抽出されたレーザ点群を、原点を天端中心とし、断面線方向をX軸、標高をY軸とする2次元の断面線の座標へ変換し、任意の大きさのメッシュ領域を定義する。

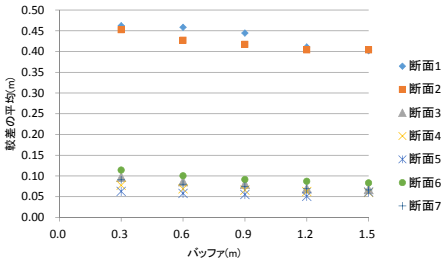
③ 一次最下点の抽出
メッシュの列ごとに、下のメッシュから順に上方向に向かってメッシュ内の標高点を検索し、各メッシュ内にある一番標高の低い点を最下点として抽出する。（黒丸が、それぞれのメッシュ内にある最下点）⑤において記述する最下点と区別するために本処理によって抽出した最下点を一次最下点とする。

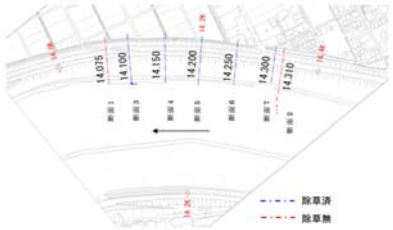
④ 一次断面線作成
処理③で抽出された一次最下点を結線し、一次断面線とする。

⑤ 二次最下点の抽出
処理④で作成した一次断面線と点群を重畳し、一次断面線より低い点を抽出する。

⑥ 断面図の作成
処理③で抽出した一次最下点と処理⑤で抽出された二次最下点を結線して断面形状を作成する。黒丸が一次最下点、二重丸が一次断面線より低い点であり、実線が最終的に得られる河川堤防の断面形状

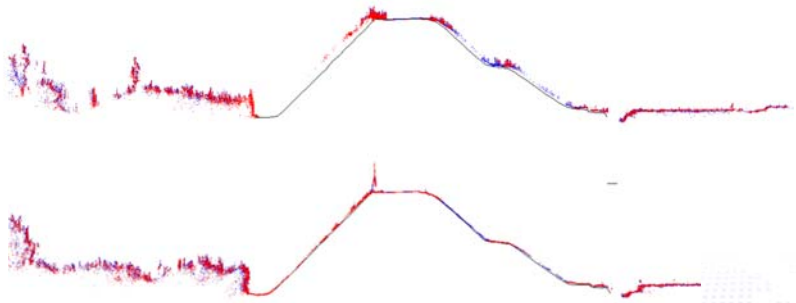
堤防断面形状の計測精度　検証結果（バッファの幅による比較）





- 未除草の断面1と断面2が除草済みの断面に比べて較差が大きい
- バッファを0.3mから0.6m、0.9m、1.2mに大きくすることにより、較差が小さくなる
- バッファを1.2mよりも大きくしても結果は変わっていない
  ⇒バッファを大きくすると、地表面に近いレーザ点群を抽出できる可能性が高くなるがレーザが地表面に到達する限界がある
- 除草することで堤防の地表面を精度良く捉えることができる
- 堤防線形が直線であれば、バッファを1.0m程度までに大きく設定することが望ましい
- 最適なバッファは、草丈や草の繁茂状況によって異なるため、河川堤防ごとに最適なバッファ値を決定する必要がある

点群よる堤防断面形状の作成　除草の有無による比較



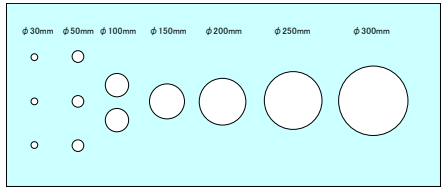
未除草（上段）と除草済み（下段）の法面のレーザ点群

標準型MMSによる河川堤防計測

堤防のモグラ穴、亀裂の検出実験

堤防のモグラ穴、亀裂の検出実験

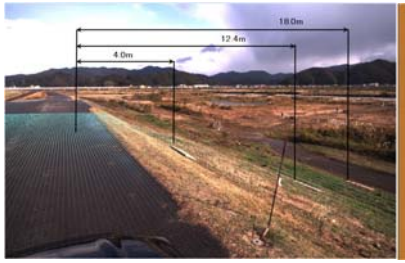
- モグラ穴と亀裂の模擬パネルを作成し検証

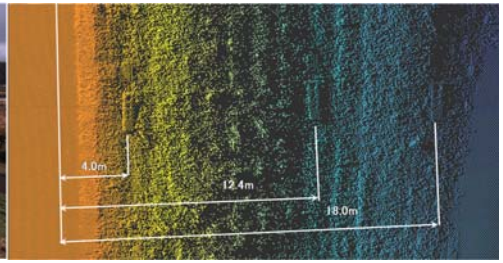


モグラ穴模擬パネル

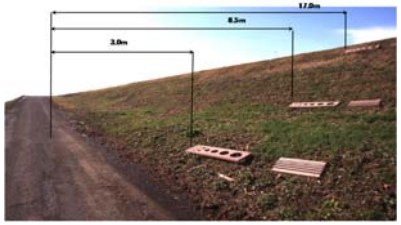
亀裂模擬パネル

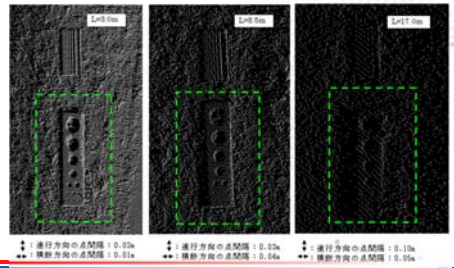
堤防のモグラ穴、亀裂の検出実験





天端走行

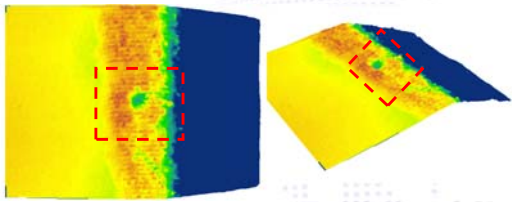




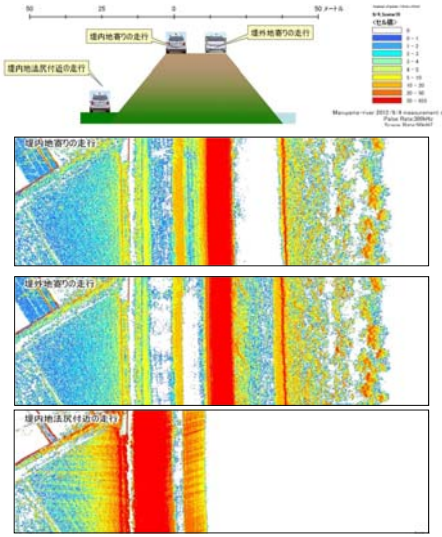
法尻走行

堤防のモグラ穴、亀裂の検出実験

- レーザ点群の取得密度が高い地域は、レーザ点群の分布から穴の存在が検知できる
- レーザ点群の密度はレーザの照射距離と照射する角度に依存するため、車両走行位置が検出精度に大きく関与する
- 直径10cmの穴は、5cmの点間隔の点群で検出可能
- 4cmの幅、長さ90cmの亀裂は、2cmの点間隔のレーザ照射で検出可能



レーザ照射角度による影響



- 堤内地寄りの走行：
  - 反対側の堤外地側の法面を捉えていない
  - 小段によってレーザが遮られ、小段より下の部分で点密度が減少する
- 堤外地寄りの走行：
  - 堤内地側の法面が捉えられていない
- 堤内地側の堤防法尻走行：
  - 小段を除く法面全てを捉えている
- 全てのルートで計測可能であれば、MMSによって堤防天端、法面を網羅する点群データが取得することが可能
- ほとんどの堤防天端は走行可能だが、法尻に設置される管理道が少ないのが現状

⇒　堤防天端からでも照射ができる手法を確立する必要がある

標準型MMSによる検証のまとめ

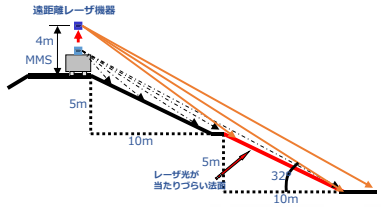
- 長距離の基線長の場合は自己位置計測精度が劣化する場合がある
- 約3,000mの近傍に新設の固定局を設けてGNSS解析を実施することにより、高精度な自己位置姿勢計測が可能
- 堤防の天端の計測結果は、平均二乗誤差が約0.02mで標準偏差が約0.01mであり、高精度が求められる堤防天端の標高計測にもMMSは十分適用可能
- 堤防の断面方向の計測結果から、レーザ照射距離約30m程度の近距離では水平位置および標高とも約0.05mの精度を得ることが可能であり、レーザ照射距離100mの位置においても水平位置および標高とも約0.08m以下の精度を得ることができる
- MMSは高水敷きの範囲を含む広域な河川管理区域の3次元形状を高精度で計測するための有効な手段である
- MMSによる河川堤防の計測では除草が必須である
- 亀裂や穴の検出は、直径10cmの穴は、5cm点間隔が必要であり、4cmの幅で長さ90cmの亀裂は、約２cm点間隔のレーザ点群が必要である。そのために、レーザスキャナの性能を高めるか、もしくは、法尻からの計測が必要である。

標準型MMSによる河川堤防計測

河川堤防を効率的に計測するための
MMSの改良

MMSの改良

- 河川堤防を効率的に計測するためのMMSの改良
  - 標準型のMMSによる河川堤防の計測では、堤防全体を網羅するために、法尻側から計測が有効
  - 多くの場合法尻の走行ができない
  - 法尻走行による計測の代替技術が必要



- レーザの設置位置の変更
  - レーザの設置位置を高くすることが有効
  - MMS車両の高さを含めて、レーザスキャナの位置を地上から4 mの高さになるように改良
- デジタルカメラの設置位置の変更
  - 横向きに3台のカメラを縦に設置
  - 堤体を地上5mm以上の解像度で撮影することが可能
  - １台目を天端から法面に、2つ目を小段から下の法面上部に、3台目を2台目よりさらに下の法面に向けて設置

MMSの改良

- レーザスキャナの性能
  - 標準型搭載のレーザスキャナ：照射数300KHz
    - 2割の法面勾配で、横断方向の5m離れた位置で2.5cm、15m離れた位置で17.1cmの間隔でレーザデータが取得可能
  - レーザ照射数が550KHzのレーザスキャナ
    - 横断方向で5m離れた位置では1.4cm、15m離れた位置でも9.3cmの間隔でのデータ取得が可能
    - 点間隔が半分近くで、点密度が3倍程度

レーザ機器の性能	レーザの設置位置	MMSからの距離		
		5m	15m	25m
300KHz	通常の高さ2.2m	2.5cm	17.1cm	29.6cm
550KHz	通常の高さ2.2m	1.4cm	9.3cm	16.0cm
300KHz	改良の高さ4.0m	2.0cm	10.5cm	17.6cm
550KHz	改良の高さ4.0m	1.1cm	5.7cm	9.6cm

標準型MMSによる河川堤防計測

堤防の変位・変状の分析技術の開発

河川堤防のための3次元点群解析手法の開発

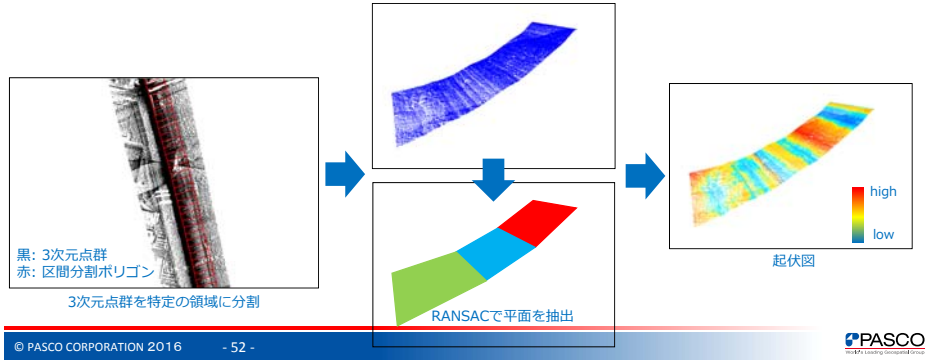
- 法面の変状解析
  - Ransac（ランダムサンプリングコンセンサス）による法面の凹凸解析
- 天端の変状分析
  - 天端の中心線の標高と横断方向の標高との比高差解析
- 堤防の形状の経年変化の面的把握
  - 標高値の差分を解析

RANSACアルゴリズムを用いた変状解析

- 堤防法面を平面分割して変状・変位を抽出

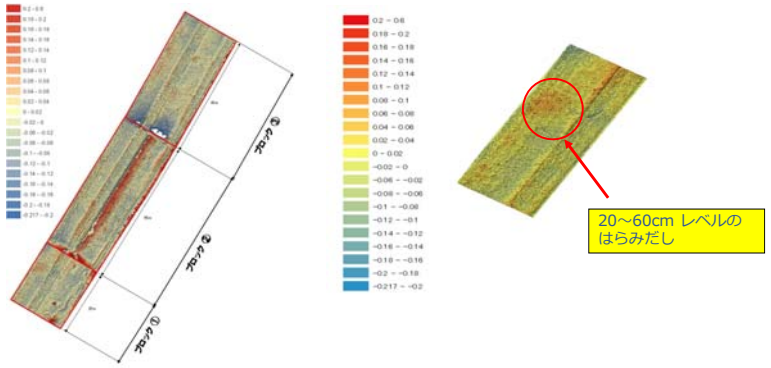
【処理ステップ】

① 3次元点群を特定の領域に分割
② 各分割区間にRANSAC(**Ran**dom **S**ampling **C**onsensus)を適用し、平面を抽出
③ 抽出された平面を基準面として定義
④ 3次元点群と基準面の標高較差を計算



RANSACアルゴリズムを用いた変状解析

- 起伏図
  - 単時期のデータで法面の変状・変位を面的に抽出
  - はらみ出しなどの変状抽出に有効

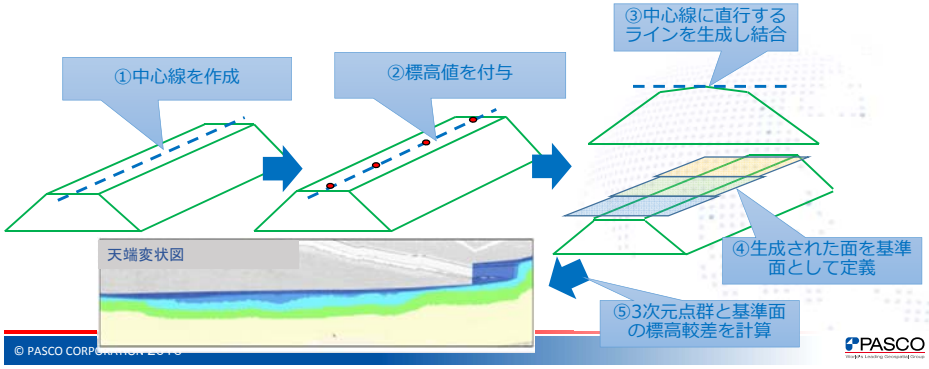


天端の変状分析

- 中心線の標高値を基準に天端の変状・変位を抽出

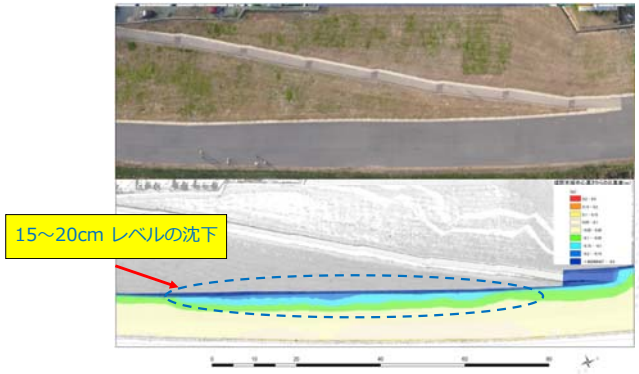
【処理ステップ】

① 天端の中心線を作成
② 3次元点群より中心線に標高値を付与
③ 中心線に直行するラインを生成し、個々のラインを結合
④ 生成された面を基準面として定義
⑤ 3次元点群と基準面の標高較差を計算



比高差解析

- 天端変状図
  - 単時期のデータで天端の変状を面的に解析可能



現地の測量結果と、レーザ点群上で計測した座標値を比較

標高差分解析

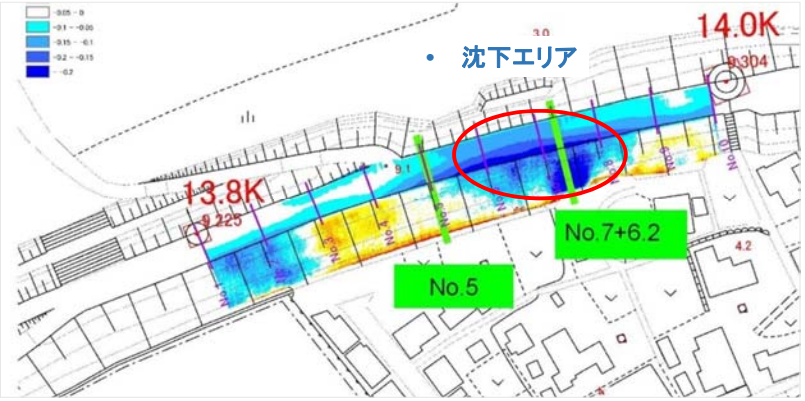
- 多時期のデータの差分解析

【処理ステップ】

① 竣工図書のデータ等から3次元CAD(vector) モデルを構築
② グリッド型（raster）の標高モデルに変換
③ 取得された3次元点群と標高モデルの標高較差を計算

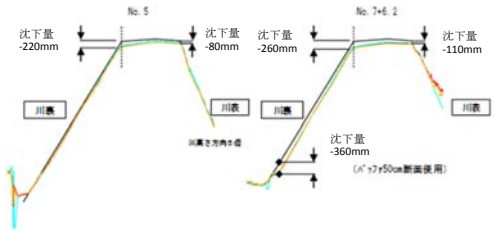
標高差分解析

- 標高差分図
  - 経年変化（劣化）を面的に把握可能



標高差分解析

- 断面による評価
  - 法肩の沈下などを定量的に把握可能



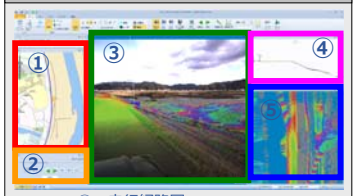
標準型MMSによる河川堤防計測

堤防3次元データの可視化技術の開発

堤防3次元データの可視化技術の開発

- 任意の視点位置から点群データを表示、MMSの走行軌跡視点から、デジタルカメラと点群データを重畳させて表示することが可能
- 写真画像から現地状況、点群から三次元の形状を把握することが可能

画面構成

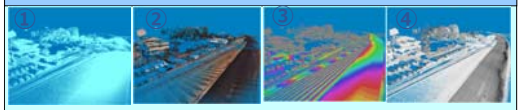


① 走行経路図
② 車両走行視点の再生
③ 3D表示画面
④ 断面表示画面
⑤ 点群データ2D表示画面

３D表示画面

① 車両走行視点
② ３D表示視点
（任意の視点位置から点群を表示）

点群の表示切替



レーザ計測により取得された点群データの表示
① 単色表示
② 色つき点群表示
③ 標高段彩表示　（※2cm間隔の色分け表示例）
④ 反射強度表示

分析技術の成果のまとめ

- MMSのレーザ計測データによる分析技術の成果
  - ➢堤防法面の変状分析により、面的な凹凸を捉えることができる
  - ➢堤防の天端の変状分析により、定期横断測量では捉えることができない面的な変位を詳細に捉えることができる
  - ➢時期の異なるデータを用いて、天端や法面の変状、沈下の状態を面的に把握することができ、さらに、定量的な評価も可能となる

標準型MMSによる河川堤防計測

MMSを適用することにより得られる知見のまとめ

MMSを適用することにより得られる知見のまとめ

- 点検結果のデジタル証跡
  - ➢ 3次元点群データおよびデジタル画像データをアーカイブとして保管できる
  - ➢ 河川管理を、計測場所、日時および変状等の解析結果とともに、河川管理の状況を証跡として残すことができる
- 変状の面的なモニタリング
  - ➢ 巡視点検および定期縦横断測量のような点および線状の計測では得られない変状を、定量的にモニタリングすることができる。
- 河川堤防情報の「見える化」
  - ➢ ビューワにより、河川堤防を記録した大容量のデータを高速に、かつ、立体的に表示することができ、堤防の全体像および局所的な変化をビジュアル化することができる。

MMSによる河川管理で得られる知見のまとめ

- リスク評価と予測
  - ➢ 過去の記録、例えば、治水地形分類図、災害履歴を、MMSデータの分析結果とデジタル的に重畳させることによって、洪水時のリスク管理や危機管理に利活用できる。
- 維持修繕計画
  - ➢ 新規堤防および堤防改修（腹付盛土、補強対策）の変状予測に対して、現状を比較することにより、適切な対策を実施することができる。
- 巡視点検前のスクリーニング作業
  - ➢ MMSの計測は、走行するだけで、正確な変状および異常個所が把握できる簡便な手法である。巡視点検を実施する前に、点検の重点箇所を定めるために本手法を適用することが望まれる。

河川堤防計測用MMSによる河川堤防計測

河川計測用MMSの精度検証

実施内容

- 河川計測用の高所設置型MMSの製作
  - フレーム型MMS
  - 昇降型MMS
- 計測精度の確認
  - 標準型MMSとの比較
- 河川計測用MMSの計測精度についての検討
  - 理論精度との比較

開発したMMSの概要

標準型MMS

☺取り付けが強固で、安定している
☹法面に対するレーザ光の入射角が浅くなる
☹法肩や小段によるレーザ光の遮断によるオクルージョン

河川計測用MMS

フレーム型MMS

☺取り付けが比較的強固
☹機器の設定に時間を要する

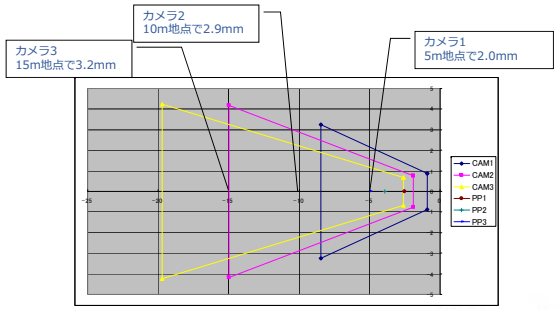
昇降型MMS

☺機器の設定が容易
☹可動部が多く安定性に若干不安

開発したMMSの概要

項目		性能
GNSS	取得間隔	2周波GNSSアンテナ 2台
	計測方法	RTK 又は VRS
IMU	取得間隔	200Hz
	姿勢精度	ロール&ピッチ角 0.005° ヘディング角 0.015°
オドメータ		1台
カメラ	台数	6台
	取得間隔	最大10フレーム/秒
	ピクセルサイズ	2,448×2,048ピクセル
レーザスキャナ	台数	VQ450 1台
	パルスレート	最大550KHz
	スキャンレート	最大200Hz
	レーザ光の広がり角	0.3mrad
	照射角度	360°
	到達距離	最大800m (パルスレート150KHz時)
	設置角度	可変
	設置高さ	2.3m,3.6m

開発したMMSの概要



堤防法面用カメラの仕様

使用カメラ	PointGray GrassHopper GRAS-50S5C-C	備考
CCD	Sony ICX625 CCD	
CCDサイズ	2/3"	
画素サイズ	3.45×3.45 μm	
画素数	5Mpix（2,448x2,048）	
最大撮影頻度	15 FPS	
レンズ	KOWA製	
	LM8JC10M　焦点距離：8.5mm	カメラ1
	LM12JC10M　焦点距離：12mm	カメラ2
	LM16JC10M　焦点距離：16mm	カメラ3

精度検証　検証場所　横浜 みなとみらい

- 上空視界があること
- 適当な距離間隔で地物があること
- 車両・人通りが少ないところ

精度検証　検証場所　横浜 みなとみらい

検証点
- 白線・形状特徴点を使用
- GNSSスタティックで一次基準点設置
- TS測量により検証用座標を取得

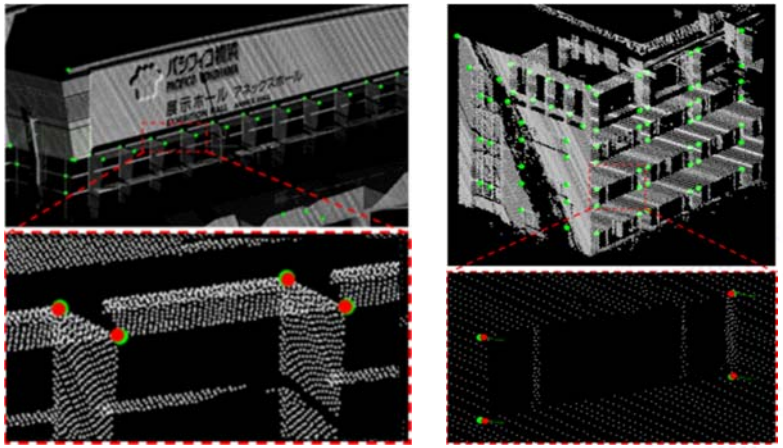
精度検証　データ取得

- 走行速度　20km/h
- パルスレート：550KHz
- スキャンレート：50Hz

- 進行方向の点間隔：0.11m
- 20m先の壁面上の点間隔：0.011m
- 100m先の壁面上の点間隔：0.057m

精度検証　検証点の計測

- 点群を3次元表示して計測



精度検証　検証結果

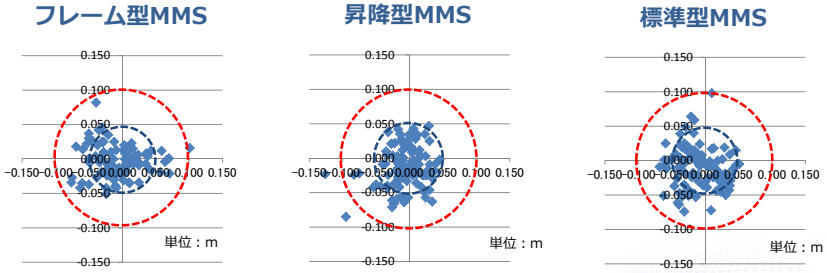
フレーム型				単位(m)	
	dx	dy	dxy	dz	dxyz
検証点数	90	90	90	90	90
最大較差	0.101	0.082	0.102	0.057	0.154
最小較差	-0.076	-0.051	0.004	-0.080	0.014
較差平均	-0.005	-0.003	0.037	-0.013	0.049
平均二乗誤差	0.036	0.023	0.043	0.030	0.057
標準偏差	0.036	0.023	0.021	0.027	0.029

昇降型				単位(m)	
	dx	dy	dxy	dz	dxyz
検証点数	107	107	107	107	107
最大較差	0.045	0.047	0.128	0.052	0.146
最小較差	-0.126	-0.085	0.006	-0.071	0.011
較差平均	-0.007	-0.011	0.036	0.006	0.042
平均二乗誤差	0.028	0.031	0.042	0.023	0.047
標準偏差	0.027	0.029	0.022	0.023	0.022

標準型				単位(m)	
	dx	dy	dxy	dz	dxyz
検証点数	105	105	105	105	105
最大較差	0.051	0.098	0.099	0.085	0.119
最小較差	-0.068	-0.074	0.002	-0.102	0.010
較差平均	-0.009	-0.011	0.040	0.002	0.048
平均二乗誤差	0.030	0.031	0.044	0.029	0.053
標準偏差	0.029	0.029	0.019	0.029	0.022

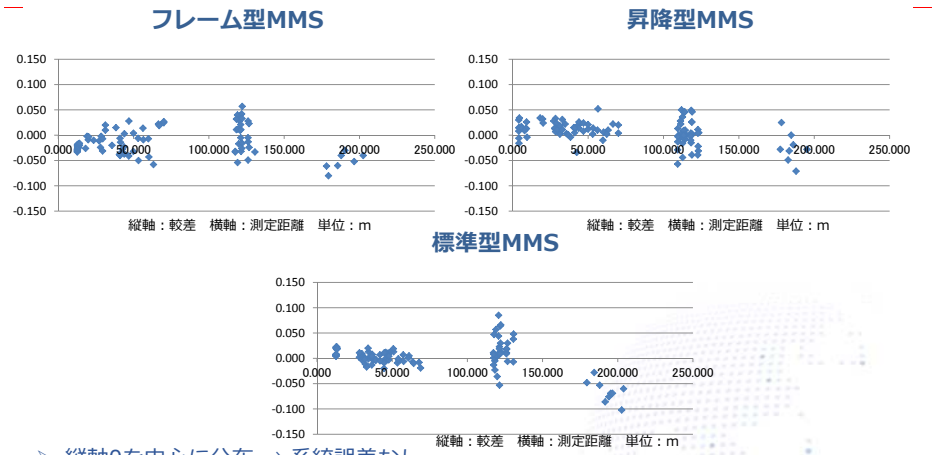
- ➢ 水平位置と標高の平均二乗誤差は、0.05m以下
- ➢ 標準偏差は、すべて0.03m以下

精度検証　水平位置の検証結果



- ➢ 原点付近を中心に分布 ⇒ 系統誤差なし
- ➢ フレーム型、昇降型：おおむね0.1mの範囲内
- ➢ 標準型MMS：おおむね0.1mの範囲内
- ➢ 河川計測用MMSの水平位置精度は標準型MMSと同等

精度検証　標高の検証結果



- ➢ 縦軸0を中心に分布 ⇒ 系統誤差なし
- ➢ フレーム型、昇降型：おおむね±0.05m
- ➢ 標準型MMS：　測定距離150m以内ではおおむね ±0.05m
  測定距離200m付近で若干劣化
- ➢ 河川計測用MMSの標高精度は標準型MMSと同等

河川計測用MMSの計測精度　理論精度

➢カタログスペックを基にMMSの理論精度を計算

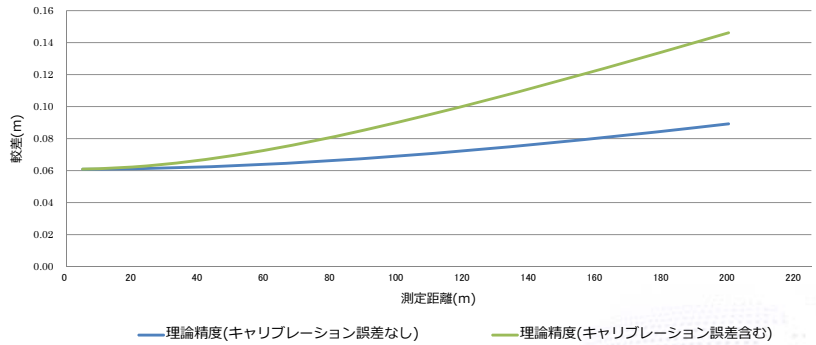
$$RES_{xyz} = \sqrt{E_{GNSS}^2 + E_{IMU}^2 + E_S^2 + E_C^2}$$

誤差要因	仕　様
GNSSによる自己位置測定誤差　(E_{GNSS})	0.06m
IMUによる自己姿勢測定誤差 ロール (E_r)	0.005度
ピッチ　(E_p)	0.005度
ヘディング　(E_h)	0.015度
レーザの測距誤差　(E_{id})	0.01m
レーザの姿勢計測誤差　(E_{ia})	0.001度
レーザ光の広がり角　(D_v)	0.0003rad
キャリブレーション誤差　ロール (E_{mr})	0.005度
ピッチ　(E_{mp})	0.005度
ヘディング　(E_{mh})	0.015度

E_{GNSS}: GNSSによる自己位置計測の誤差に起因する誤差
E_{IMU}: IMUによる自己姿勢計測の誤差に起因する誤差
E_S: レーザの性能に起因する誤差
- レーザの測距誤差
- レーザの角度測定誤差による誤差
- フットプリントによる誤差
  （フットプリントの半径と仮定）

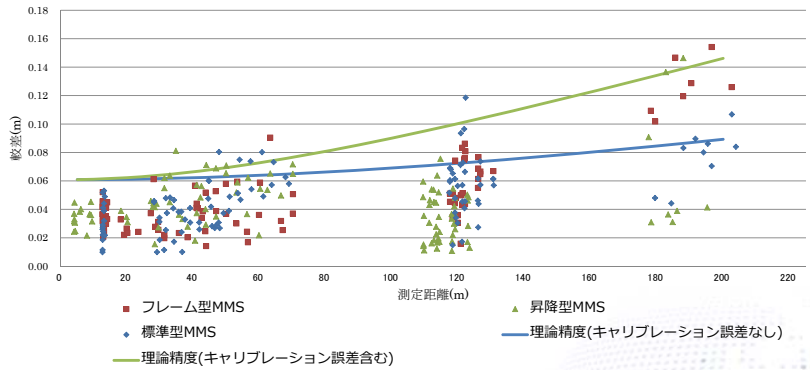
E_C: レーザの取り付け後のキャリブレーション角度誤差に起因する誤差

河川計測用MMSの計測精度　理論精度



- ➢ MMSの理論精度
  - ➢ レーザの取り付け後のキャリブレーション誤差がないと仮定した場合
    - ➢ 測定距離が20m程度までGNSSによる自己位置測定の誤差が支配的
    - ➢ 角度の測定誤差による位置精度の劣化はほとんどない
    - ➢ 測定距離20mの位置における理論精度は0.06m程度
    - ➢ 測定距離が長くなるに従って徐々に誤差が増大
    - ➢ 測定距離200mの位置における理論精度は0.09m程度
  - ➢ キャリブレーション誤差がIMUの自己姿勢測定誤差の2倍と仮定した場合
    - ➢ 理論精度は、20m付近まではほとんど影響を受けない
    - ➢ 測定距離200mの位置における理論精度は0.15m程度

河川計測用MMSの計測精度　理論精度と3次元較差



- ➢ 距離依存性があり、距離が長くなるほど較差が増大
- ➢ 20m程度の近距離における平均二乗誤差は、0.03~0.04m程度
- ➢ 遠距離の場合でも0.15m以内
- ➢ 70m程度までの較差のばらつきは±0.04m程度
- ➢ 180m以遠では±0.07m程度となり、遠距離でばらつきが大きくなる
- ➢ 近距離の範囲では、誤差の傾向は理論精度と一致
- ➢ 取り付け後のキャリブレーション誤差がIMUの計測誤差の2倍と仮定した場合の理論精度とほぼ一致

河川堤防計測用MMSによる河川堤防計測のまとめ

- 河川計測用MMSの計測精度は、非常に高い
  - 近距離においては数cmレベルの計測性能
- レーザスキャナを高所設置することによる影響は見られない
- 遠距離においても標準型のMMSと同等の高い精度を得ることが可能

- MMSの精度は、近距離においてはGNSSの位置測定精度依存する
- 遠距離の測定をする場合にはレーザの取り付け後のキャリブレーションが重要

- 本検証においては、GNSS位置測定誤差に系統的な誤差はなく、良好な結果を得た。GNSSによる位置測定に系統的な誤差が確認された場合には、既知点を用いて排除することが可能であり、同様の計測精度を得ることができる
- レーザスキャナとカメラの高所設置により、オクルージョン領域を軽減でき、堤防法面の画像を等解像度で取得できる
- 河川計測用の高所設置型MMSは高精度であり、河川の3次元計測に対し、非常に有効な計測手段である

まとめ

本研究のまとめと今後の課題

まとめ

- 高精度な河川計測に対しMMSが非常に高い有効性を持つことを明らかとした
- 河川堤防計測用MMSを構築することができた
- 河川堤防管理を高度化、効率化するための、MMSの計測技術および分析技術が確立できた
- 社会インフラの急速な高齢化が進む一方、厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況下において、新技術の導入による高精度化、効率化は必須である。本研究の成果は、今後の河川堤防等の維持管理に寄与するものと考えられる

今後の課題

- 河川堤防計測用MMSにより、実際の堤防堤体法面上の計測精度、形状の再現性の検証、フットプリントや3次元点の点間隔等が精度に及ぼす影響についての検証を行う
- 計測環境の異なる河川で本研究の成果を適用して、河川堤防の点検およびモニタリング業務につなげる