

3Dレーザスキャナー一体型カメラを用いた ダム堤体挙動や水位の観測に関する一考察

山崎 健司¹・中村 健二²

¹近畿地方整備局 大戸川ダム工事事務所 工務課 (〒520-2144 滋賀県大津市大萱1-19-32)

²大阪経済大学 情報社会学部 (〒533-8533 大阪市東淀川区大隅2-2-8)

ダム管理者は、少人数でダム施設を管理しなければならず、ダム施設の維持管理の省力化・高度化を図る方策が求められている。その一方策として、ダム堤体挙動の定期的な定点観測を補完あるいは代替する手法の確立が挙げられる。ダム堤体の全体を対象に日々の挙動の計測ができれば、既知に無い知見の獲得が期待できる。また、河川管理者は、日々の管理のみならず、近年の異常気象などの不測の事態に対しても機動的に対処することが求められ、河川水位上昇などのきめ細かな情報の収集と国民への提供が重要となっている。

本研究では、従前の監視カメラを用いた映像監視に加えて、3Dレーザスキャナーで計測した点群座標データも活用し、データ計測実験の結果に基づいて、ダム堤体の全体を対象にした挙動の常時観測や河川水位の簡易観測の適用可能性を考察する。

キーワード 堤体挙動, 水位計測, 3Dレーザスキャナー一体型カメラ

1. はじめに

ダムや河川堤防といった公共構造物は、施設の維持管理と環境保全のため、日々の監視が必要である。

ダム施設の維持管理の現場では、定期的にダム堤体の挙動の監視をレベル等による直接計測やプラムラインの変位計測により行っている。これらの計測はいずれも「点」および「線」の計測であり、面的な変化が把握できない。そのため、定点以外での異常の発見が難しく、堤体の損傷などの大きな被害につながる可能性がある。ダム施設の維持管理の高度化を図る一方策として、ダム堤体挙動の定期的な定点観測を補完あるいは代替する手法の確立が求められ、様々な研究¹⁾³⁾がなされている。ダム堤体全体の日々の挙動を面的に計測ができれば、既知にない知見の獲得が期待できる。

一方、河川管理の現場では、日々の管理のみならず、近年の異常気象などの不測の事態に対しても機動的に対処することが求められている。そのため、水位計や量水標による計測やCCTVでの監視を行っている。しかし、これらは別々の場所に設置されていることもあり、例えばCCTVで異常を発見した場合に、その後、水位計など、様々な情報を統合して確認する必要がある。これらの情報を一つの機器で、一括して確認する環境が構築できれば、より機動的に対処することが可能となる。

本研究では、3Dレーザスキャナー一体型カメラを用い

て、ダム施設の維持管理の高度化と河川管理の支援技術の確立を目指し、ダム堤体全体の常時観測と河川水位の簡易観測の実現可能性を検証する。

2. 研究の概要

(1) 研究の目的

本研究では、高精度・高価な3Dレーザスキャナーを利用せず、安価な3Dレーザスキャナー一体型カメラ（以下、「実験機」という）を用いて、公共構造物の維持管理の支援が可能であるかを検証する。具体的には、ダムの維持管理と河川管理を想定した次に示す2つのシーンを対象に、実験機で計測した点群座標データの活用方を検討する。なお、ダムのデータ観測は九頭竜川水系の九頭竜ダムおよび真名川ダム、河川のデータ観測は九頭竜川水系真名川を対象として実施する。

- ・ロックフィルダムおよびコンクリートダムの堤体挙動観測
- ・河川の水位観測

(2) 実験機の概要

実験機は、表-1に示す通りCCTVに3Dレーザスキャナー機能を搭載し、CCTVと同等以下の価格で現場状況の把握が可能である。表-1での比較のとおり、3Dレーザスキャナーやトータルステーション（以下、「TS」という）

表-1 実験機仕様・比較表

	実験機	3D レーザスキャナ	トータルステーション
外観・写真		 リーグル社 地上型 3D レーザスキャナ 製品写真は HP より参照	 ソキア社 トータルステーション 製品写真は HP より参照
用途	監視カメラに対して3Dレーザスキャナ機能を搭載し、河川・ダムなどの定点観測を行い、映像と郷里情報の融合により管理運用支援を行うもの。	大型構造物（道路・トンネル・橋、ビル、建造物、災害現場）などの三次元測量、点群データ・マッピングを行うもの。	建築現場等における構造物の高精度な測距を行うもの。
レーザ安全規格	クラス 1	クラス 1	クラス 3R
測距範囲	250m（反射率 20%以上）	600m（反射率 90%以上） 280m（反射率 20%以上）	1000m（ノンプリズム、白色 90%ターゲット時） 2500m（ミニプリズム）
測距精度	±100mm	5mm	±2mm +2ppm×D（D:200m）
測距時間	最大 4,000 点/秒、 1 画面あたり約 1 分間	42,000 点/秒	1 点/秒（条件による）
旋回性能	最小ステップ制御 0.01° スキャニング 0.01°/秒～15°/秒	最小ステップ制御 0.0024° スキャニング 0°/秒～60°/秒（水平）	測角機能 5"（0.0014°） 20°/秒（追尾）
構造	屋外常設設置 防噴流型 IP65	屋外可搬型 防滴 IP64	屋外可搬型 防噴流 IP65
測距確認	ハイビジョン監視カメラを搭載。昼夜監視が可能。MJPEG-IP 画像伝送も搭載しブラウザで動画監視が可能	点群データ彩色用として、一眼レフ・デジタルカメラを搭載可能	望遠鏡スコープ 30 倍により現場にて手動で直接確認設定
参考価格	約 200 万円	約 2,000～3,000 万円	約 150 万円

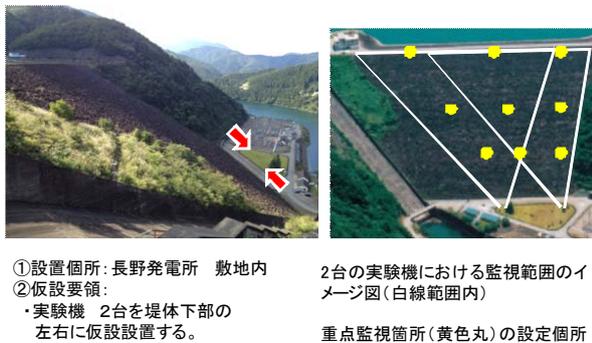


図-1 九頭竜ダムにおける機器設置



図-2 真名川ダムにおける機器設置箇所

より計測精度は劣るものの、屋外常設設置が可能などの汎用性に優れているという特長がある。ダムや河川堤防など現地状況を遠隔地から映像確認できるだけでなく、予め設定したスケジュールで3Dレーザスキャナによる定点観測を行い、静止画と3D点群情報（距離情報）を本体内部に蓄積保存し、IPネットワーク経由で監視制御することができる。

3. ロックフィルダムおよびコンクリートダムの堤体挙動観測への適用可能性の検証

(1)実験概要

ダムの常時監視による堤体挙動把握の一策として、

実験機の適用可能性を検証する。検証の着眼点を次に示す。

- ・堤体挙動は九頭竜ダムでは約2cm/年、真名川ダムでは約5cm/年と数cm程度のため、挙動把握には数mm単位の精度確保が望ましい。しかし、実験機の測距精度は±100mmであり、挙動把握が困難なため、精度向上の補正方法を検討しつつ、適用の是非を明らかにする。
- ・堤体の面的把握として2つのモード（堤体全体を測距して把握するモード、複数の定点を設定してポイントを把握するモード）の有用性を検証する。
- ・雨天や積雪などの天候の変化に伴う反射率の低下に起因する測距精度への影響などを検証する。

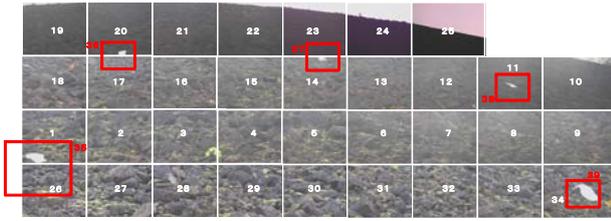


図-3 視野設定と重点監視箇所

表-2 九頭竜ダムのレーザ測距結果

プリセット	測距データ (平均)	輝度値	測距間誤差 (5回・差分)	TS測量 結果	TSとの 差異
No.35	53.557m	631	13mm	53.584m	27mm
No.36	125.196m	473	38mm	125.170m	26mm
No.37	111.305m	565	26mm	111.382m	83mm
No.38	110.606m	539	12mm	110.583m	23mm
No.39	45.240m	677	11mm	45.313m	73mm

(2) 実験箇所と実験手順

a) 実験箇所および実験機設置位置

本研究では、フィルダムの一つであるロックフィルダムとして九頭竜ダム（福井県大野市）、コンクリートダムの一つであるアーチ式コンクリートダムとして真名川ダム（福井県大野市）を実験の対象とする。それぞれのダムでの機器設置箇所は、図-1、図-2に示すとおりである。なお、本実験では、ダム堤体挙動の継続的な監視の可能性を検証するため、2012年11月14日から12月2日に九頭竜ダム、2012年12月4日から12月19日に真名川ダムのデータ計測を実施する。

b) 九頭竜ダムにおける実験手順

実験機におけるレーザ測距エリアはカメラ映像の視野範囲と連携している。そのため、視野範囲を34箇所（図-3）登録し、自動スケジュール動作により毎日4回（6時間毎）、3Dスキャニングを実施してデータを取得する。

また、重点監視箇所として白シート5か所（図-3のNo.35からNo.39）を設定し、毎日4回（×各5回）3Dスキャニングを実施してデータを取得する。そして、これらの計測結果とTS測量結果と比較する。

c) 真名川ダムにおける実験手順

真名川ダムにおいても、視野範囲を堤体の上流面22箇所及び下流面で27箇所登録し、自動スケジュール動作により毎日4回（6時間毎）、3Dスキャニングを実施してデータを取得する。

(3) 実験結果と考察

a) 測距精度

九頭竜ダムの重点監視箇所（白シート部）のレーザ測距結果を表-2に示す。

- ・表-2を確認すると、本体性能の±100mm精度に対して、近距離であることから、測距間誤差は小さかった。しかし、精度確認のために行ったTS測量結果との差異は、最大83mmとなり、堤体の変位量で

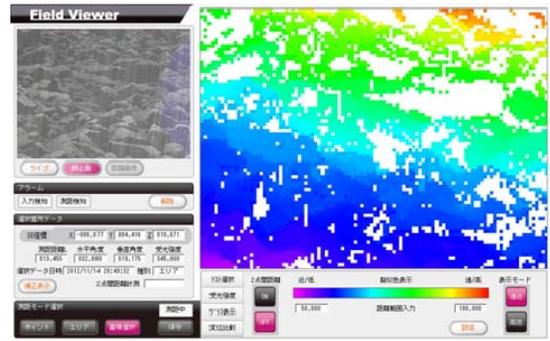


図-4 降雪時のデータ取得状況(白色が測距エラー)

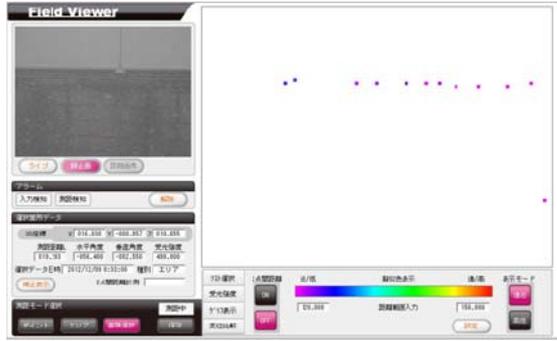


図-5 降雪で視程が著しく低下している場合

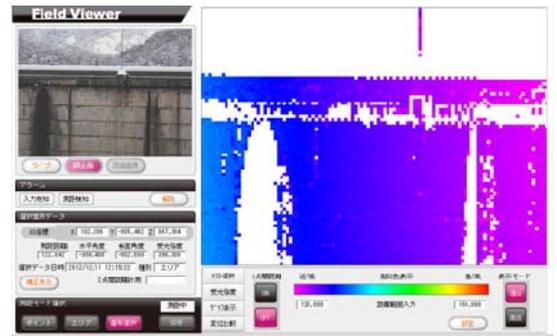


図-6 コンクリートが黒色化している場合

ある数cm程度よりも大きかった。

- ・No.35, 36, 38を確認すると、100m範囲のターゲットは、測定手法を考慮することにより、TS測量結果との差異を30mm以内に抑えて、測距できることがわかった。
- ・No.37, 39を確認すると、TS測量結果との差異が大きくなっていることがわかる。これは、各手法での測定箇所が、ロックフィルに被せた白シート中央部で凹凸もあるため、各手法の測定箇所のズレに起因すると考えられる。

b) 堤体の面的把握

九頭竜ダムの図-3に示した視野範囲及び真名川ダムで設定した視野範囲いづれにおいても、全て測距できていたことから、堤体全体の状況を面的に把握できることがわかった。

c) 天候による影響

図-4から、降雪は粒子が大きく測距エラー影響を受けやすいことがわかる。これは、データ処理測定点数を増加させることで対処可能と推測される。ただし、図-5の

ように、降雪で視程が著しく低下している場合は、測距ができないことがわかった。

d) 堤体の性状による影響

図-6に示すとおり、コンクリート等が黒色化した箇所（凍結部等）は、測距エラーが発生しやすいことがわかった。

(4) 精度向上の可能性の検討

両ダムでの実験の結果を踏まえ、実験機のレーザ測距機能の精度向上の可能性を検討する。本検討では、同一ターゲットに対して複数回レーザ測距計測を行うことで、微小な距離変位の検出可能性を検証した。実験機本体から予め設定した距離に対して図-7のようなターゲットを10mm単位で移動させて、複数回（10回）レーザ測距計



図-7 機器配置

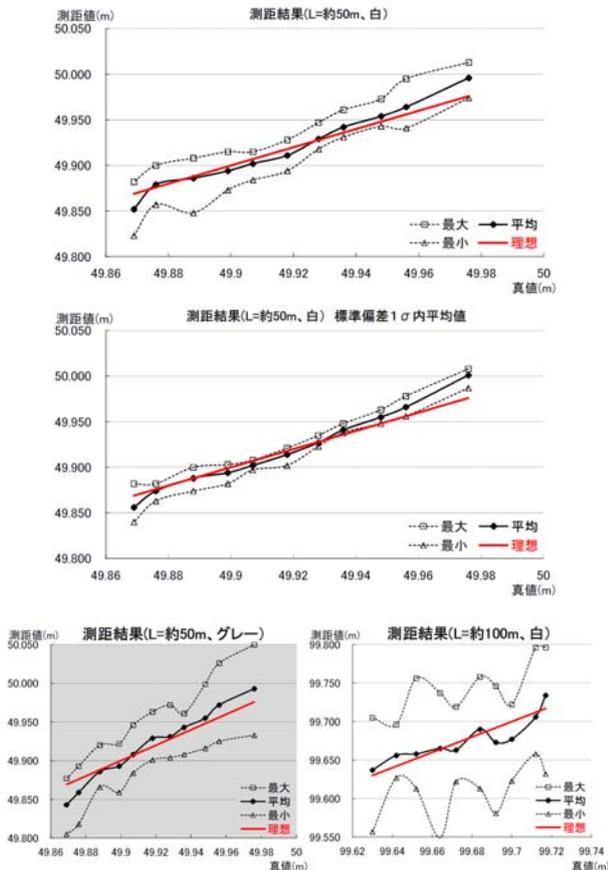


図-8 レーザ測距結果

測を行った。

結果は図-8のとおりで、個々の結果ではバラツキが発生しているものの複数回（10回）測距した平均値では、ターゲットが白い（反射率90%）場合に10mm 変位の傾向をつかむことができた。また、10 回程度の計測であるが標準偏差1σ内での平均値を算出して精度向上が行えるか検証した結果、50m 程度の距離であれば、10mm 単位での変位を検出できることがわかった。

ただし、ターゲットの反射率が低い場合や、ターゲットまでの距離が長くなると、誤差が大きくなった。

(5) 結論

ダム堤体に基準点を設置してデータ計測を1 ヶ月実施し、日々の計測データの差分（データの補正方法の検討含む）からダム堤体挙動を確認したが、通常の堤体挙動を把握するために必要なmm単位の精度を得ることはできなかった。この結果を踏まえ、精度向上に向けた改良を実施した結果、50m程度の距離であれば、10mm単位での変位を検出できることが明らかになった。

このことから、本手法は、ダム堤体全体を面的に捉えた状況把握に有効であり、CCTV機能と併せた、地震時の異常な変位の確認や、河道閉塞による天然ダムや砂防ダムなどの変位監視など概略状況の把握への有効活用等が期待できると考えられる。

4. 河川水位観測への適用可能性の検証

(1) 実験概要

実験機のレーザ測距機能の河川水位計測への適用可



図-9 機器設置箇所

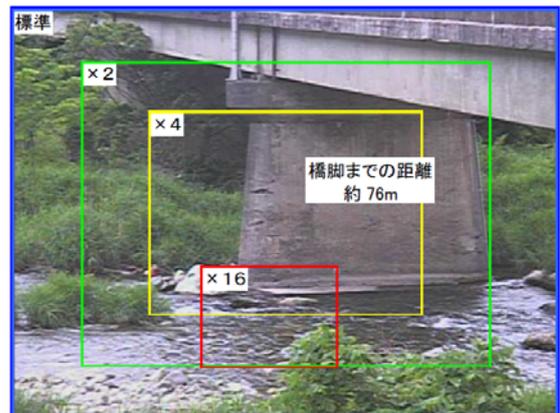


図-10 倍率毎の視野範囲

能性について、フィールド実験の結果を踏まえて検証する。検証の着眼点を次に示す。

- ・実験機にて計測した場合、水面はレーザ測距エラーが発生するため、この特性を用いることで、喫水線の把握が可能であるかを明らかにする。
- ・エリア測距の結果を解析することで、水位計測に応用可能であるかを明らかにする。また、応用可能な場合は、水位計測の精度も併せて検証する。

(2) 実験箇所と実験手順

a) 実験箇所および実験機設置位置

フィールド実験は、福井県大野市の真名川（佐開橋周辺）にて実施する。（図-9）

b) 実験手順

実験機におけるレーザ測距エリア及び測距点数は、カメラ映像の視野範囲と連携している。そのため、レーザ測距の高精細化は、図-10のとおり視野範囲をクローズアップ（標準～×16倍）して概略から詳細までの水位観測を行う。

(3) 実験結果と考察

a) レーザ測距

実験機によるカメラ映像の視野範囲と連携したエリア

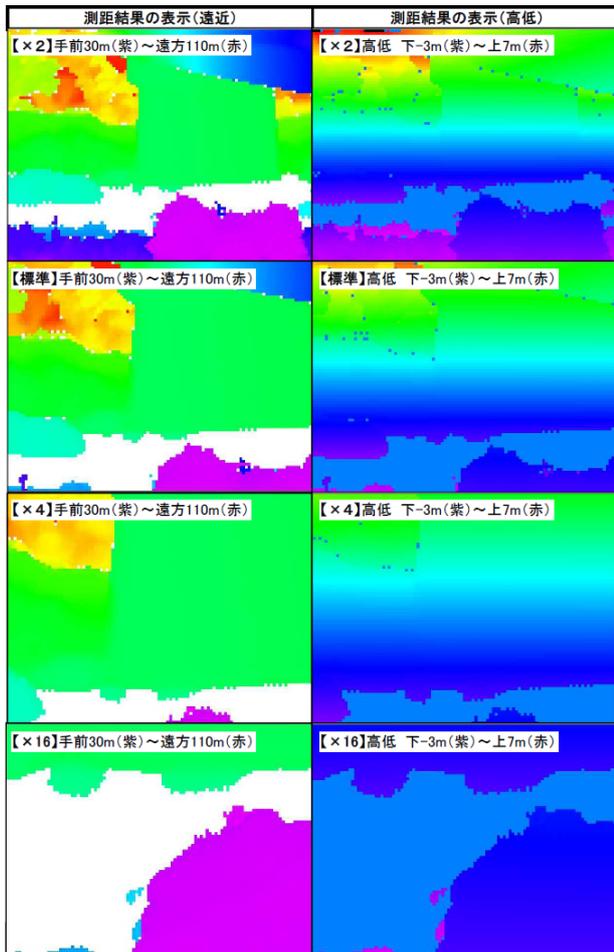


図-11 倍率毎の測距結果

測距の結果を図-11に示す。エリア測距の結果から、水面はレーザ測距エラー等（左図は白色、右図は濃い青色の下の水色箇所）になるため、橋脚部と水面の喫水線が確認できることがわかった。

b) 水位計測

エリア測距の結果から、水面と橋梁部との喫水線を算出し、河川水位計測の精度確認を行った。×16モードにてエリア測距を行った際の水面付近の測距状況とその結果をそれぞれ図-12と表-3に示す。

また、各種測距モード、ターゲット距離（図-13）と水位計測間隔（精度）の関係を表-4に示す。橋脚までの

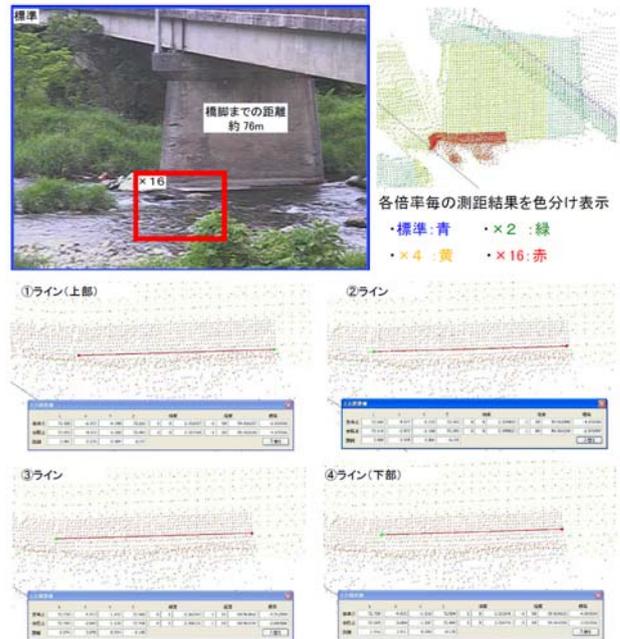


図-12 橋脚の水面付近の測距状況

表-3 橋脚の水面付近の測距結果

	高さ (Y) m	ライン間隔 (Y) m
①ライン (上部)	-1.202	
②ライン	-1.172	0.030
③ライン	-1.142	0.030
④ライン (下部)	-1.110	0.032

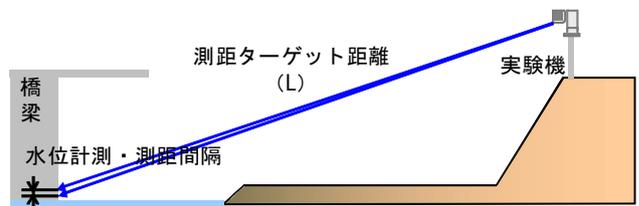


図-13 水位計測・測距間隔等の関係図

表-4 測距モードと水位計測・測距間隔との関係

測距モード	測距間隔	水位計測・測距間隔m
標準	0.100°	L×1.744mrad
×2	0.075°	L×1.308mrad
×4	0.005°	L×0.872mrad
×16 (詳細)	0.025°	L×0.436mrad

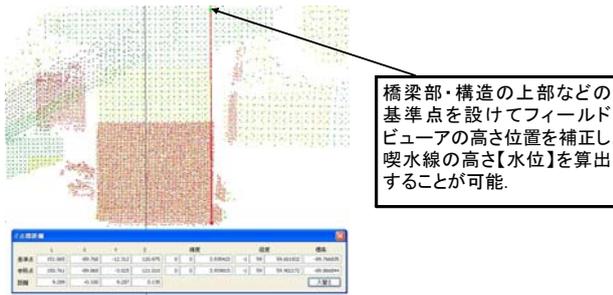


図-14 構造物への基準点設置例

測距距離は76mあり、橋脚箇所を×16モードで測距した場合、高さ(Y)の測距間隔は33mmとなる。

表-3の測距結果のラインの間隔とほぼ合致していることがわかり、高精度に水位計測が行えることがわかった。

(4) 結論

a) 河川水位観測

実験機にて河川水位観測を行うには、レーザ測距結果の距離情報を使用して算出するのではなく、橋梁部の垂直方向でのスキャニング結果の有無を判定することで測距間隔から水位を算出でき、複数回測距したデータと橋梁部の隣接データとを用いることで水位計測が可能であることが明らかとなった。

また、本手法はレーザ測距であるため、昼夜を問わず同様の精度で水位計測でき、誤差が少ないという特長がある。

なお、実験機を活用した水位計測は、図-14に示すように、現地での水面高さを予め測量する必要はなく、3Dスキャニングでの橋梁部の構造等から水面高さを推定することも可能であり、現地での作業を大幅に軽減できる。また、この手法は、鉛直構造物である橋梁だけでなく、堤防などの水位計測が難しい箇所や水位計測作業が困難な高水位時にも有効となると考えられる。

b) 河川管理への適用可能性

実験機は、昼夜を問わず常設設置でのカメラ映像監視が可能である。その監視カメラの高度利用として、カメラ映像と3Dレーザスキャナデータを連携させた映像と距離の融合が可能となる。

具体例として、予め取得していた3D点群データと現時点のカメラ映像とを重ね合わせて表示し、カメラ映像の喫水線箇所をクリックすることで水位の確認が可能となる。また、カメラ映像にグラフィック量水板を重畳表示することも可能であり、映像と数値の合併表示による現場での判断力の向上や管理運用支援が期待できる。さらに、監視カメラの性能は、ハイビジョン化にも対応しており、放送局などへの情報提供の高度化も期待できるなど、既存監視カメラの更新時における代替候補としての適用にも十分に期待できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、安価な3Dレーザスキャナー一体型カメラを用いて、公共構造物の維持管理の支援が可能であるかを検証した。具体的には、ダム維持管理と河川管理を想定し、3Dレーザスキャナー一体型カメラの「ロックフィルダムおよびコンクリートダムの堤体挙動観測」および「河川の水位観測」への適用可能性を検証した。その結果、ダムの平常時の堤体挙動観測への適用は要求精度を満たすことができないことから困難であった。この結果を踏まえ、精度向上に向けた改良を実施した結果、50m程度の距離であれば、10mm単位での変位を検出できることが明らかになった。また、河川の水位観測は、十分な精度を確保できており、実環境へ適用可能であることが明らかとなった。

本研究で用いた実験機は、昼夜を問わず常設設置でのカメラ映像監視ができ、その監視カメラの高度利用として、カメラ映像と3Dレーザスキャナデータを連携させた映像と距離の融合が可能となる。今後は、映像と距離の融合による河川管理の高度化の可能性を検討する予定である。

謝辞：本論文を遂行するにあたり、関西大学総合情報学部 田中成典教授、国土交通省近畿地方整備局九頭竜川ダム統合管理事務所 下野公仁所長、近畿地方整備局河川部河川工事課 吉村光司氏、国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室 今井龍一氏には貴重なご意見を賜った。三菱電機エンジニアリング(株)の平謙二氏、国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室 佐々木洋一氏には、実験データの計測や分析でご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 曾田英揮, 佐藤信光, 自閑茂治, 岩崎智治: GPS計測を用いたフィルダムの堤体計測の高度化の検討, ダム技術, Vol.282, No.3, pp.4-16, 2010
- 2) 岩崎智治, 小堀俊秀, 増成友広, 清水則一: フィルダム堤体計測のためのGPS自動計測システムの開発, ダムの安全管理・点検のための最新計測技術のためのシンポジウム講演論文集, 土木研究所資料, Vol.4185, pp.55-62, 2010
- 3) 吉田武司, 加登住誠, 大江和正, 山口修平: 3次元によるダム情報管理への取り組み, ダム工学, ダム工学会, Vol.20, No.4, pp.233-238, 2010