(56) 模擬ため池における UAV グリーンレーザ計測の精度検証実験

澤城　光二郎[1]・黒台　昌弘[1]・黒田　清一郎[2]・泉　明良[2]

[1]正会員　株式会社安藤・間　技術研究所フロンティア研究部（〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1）
E-mail: sawaki.kojiro@ad-hzm.co.jp

[2]非会員　国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究部門
（〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6）E-mail: skuroda@affrc.go.jp

UAV グリーンレーザ計測は陸域と水域を同時に計測できる 3 次元計測手法であり，河川工事など水域と隣接する工事現場の地形測量を効率化することが期待されている．筆者らのこれまでの研究により，透明度の高い清水域では水面下の地形を i-Construction の起工測量精度で計測できることを確認しているが，透明度の低い濁水域で検証を行う必要があると考えた．そこで，農業用ため池を模擬した実験ヤードを対象として濁水域における精度検証実験を行った結果， UAV グリーンレーザの計測精度や計測可能な水深の範囲など工事測量に必要な条件について明らかにすることができた．

Key Words: *UAV green laser，i-Construction，turbid water，point cloud，water clarity*

1．はじめに

UAV を用いたグリーンレーザ計測は，**図-1** に示すように，水中を透過する緑色の波長帯のレーザ光を使用し，1 台の計測機器で水域と陸域の双方を同時に計測することができる計測手法である [1]．これまでトータルステーション（TS；Total Station）測量や深浅測量などを併用して対応していた河川・湖沼など水域に近接する工事の地形測量を効率化できるものと期待されている．

筆者らは，透明度が高い河川(清水域)において精度検証実験を行い，UAV グリーンレーザ計測は水域と陸域を i-Construction の起工測量精度 [2]で計測できることを確認している [3]．一方で，対象河川の透明度から計算される計測可能な最大水深に対して，実際に計測した箇所の水深がその値以下であったため，計測限界など境界条件の確認ができていない．UAV グリーンレーザ計測を幅広く工事現場で活用するためには，透明度などが異なる条件での検証を行い，対象とする水域の条件に応じた計測性能を明らかにする必要がある．そこで本稿では，透明度が低い農業用ため池(濁水域)を対象として精度検証実験を行い，UAV グリーンレーザ計測が適用可能な透明度や水深の条件について明らかにしたので報告する．

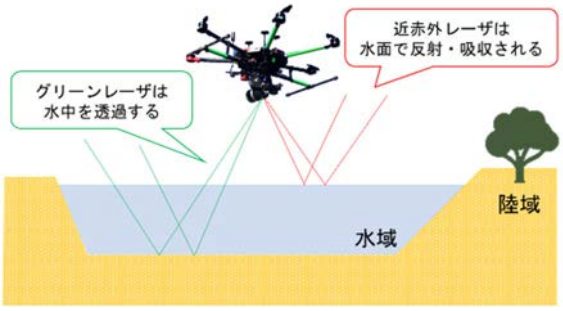


図-1 UAV グリーンレーザ計測の概要

2．グリーンレーザ計測について

UAV グリーンレーザ計測の原理は，水中を透過する波長（532nm）である緑色のレーザ光を照射することで，河道や水溜まりなど水域の計測を可能とするものである．この際，GNSS（全球測位衛星システム；Global Navigation Satellite System）や IMU（慣性計測装置；Inertial Measurement Unit）から推定した機体の自己位置と姿勢をもとに，空気中から水中に入射す際の境界面で生じるレーザ光の屈折の影響も考慮した解析を行い，3 次元座標を持った点群データを生成する [4]．

一方で，グリーンレーザは計測可能な水深や精度が，水の濁りや水面の状態に依存することが知られており，UAV グリーンレーザ計測を工事測量で運用するためには適切な計測条件の評価が不可欠であるといえる．

３．実験概要

(1)　実験条件と評価項目

本検証では範囲が 18m×13m で深さが約 2m のため池実験ヤードを計測対象とした．UAV グリーンレーザ計測は**図-2**，**図-3** に示すように，ため池の水深を 2 段階に変化させて，最深部の水深が約 1m の時をケース①，最深部の水深が約 2m の時をケース②として各ケース 2 回ずつ UAV グリーンレーザ計測を行った．

事前計測として，TLS による湛水前のため池内部形状の計測，水底に設置した検証点(全 5 点)の VRS-GNSS 計測を実施し精度検証のための基準データとした．これらのデータと UAV グリーンレーザ計測の点群データから，UAV グリーンレーザ計測の検証点の座標精度，面的な標高精度，計測可能な水深について評価を行った．

それぞれの計測の器械点や基準点の配置を**図-4** に示す．TLS 計測はため池の天端 3 ヶ所(TLS 器械 1～3)に器械を据替えて設置し，3 方向からため池内部を計測した．

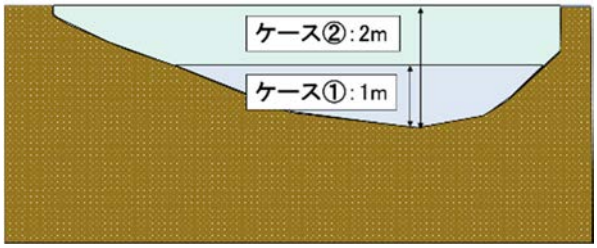


図-2 実験ケース



図-3 実験ケースごとのため池の状況

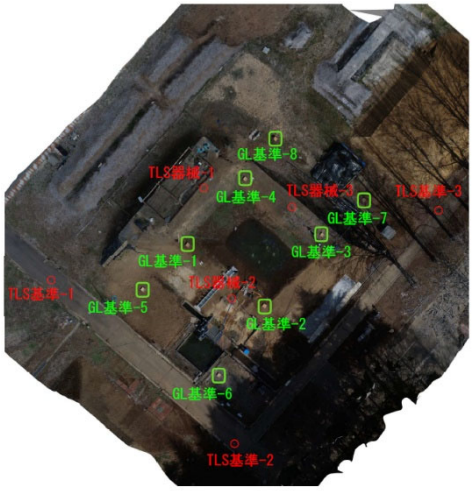


図-4 基準点類の配置

UAV グリーンレーザ計測では調整用基準点をため池を囲むように天端に 4 点(GL 基準 1～4)，下段に 4 点(GL 基準 5～8)を配置して計測を行っている．

(2)　使用機器と飛行諸元

本実験で使用した機材の一覧を**表-1**，UAV グリーンレーザの外観を**図-5** に示す．

また，使用したグリーンレーザスキャナの諸元と UAV による飛行諸元を**表-2** に示す．飛行高度は 30m に設定して計測し，本検証のため池実験ヤードの範囲では 1 回あたりの計測時間は 4 分となった．

(3)　計測可能水深の事前確認

本検証で使用したグリーンレーザスキャナを用いる場合には，白色板によるセッキ水深や濁度の単位の一つである NTU（比濁法濁度単位；Nephelometric Turbidity Unit）による 2 種類の評価方法で，事前に計算上の計測可能水深を算出することができる．

表-1 使用機器一覧

機器	型式	メーカ	用途
UAV	TKF-X4ProR2	TKF	エリア飛行
グリーン レーザスキャナ	EDGE LiDAR	LiteWave Technologies	検証データ
TLS	P40	Leica	基準データ
VRS-GNSS	HX-CHX600A	Harxon	基準データ



図-5 UAV グリーンレーザ外観

表-2 UAV グリーンレーザ諸元

LS諸元	
レーザクラス	Class3R
LS拡散角	2.5mrad
センサ	1 channels
分解能(度)	0.03/0.03
スキャン回転数(回転/秒)	70
レーザクラス発光回数(点/秒)	40,000
飛行諸元	
飛行対地高度(m)	30
飛行速度(km/h)	15
サイドラップ(%)	30
コース間隔(m)	11
有効計測角(度)	15×2=30
有効計測幅(m)	16
計測点密度(cm)(進行方向/横断方向)	6.0/35.3
計測時間(1回)	4分

a) セッキ水深計測

図-6 に示すような直径 0.3m の白色板を水に沈めていき，目視で識別できる限界の深さをセッキ水深と呼ぶ．

本検証で使用したグリーンレーザスキャナは，計測したセッキ水深の 1.5 倍の水深まで計測可能と仕様上うたわれており，現地計測したセッキ水深は 0.83m だったことから，計算上の計測可能水深は 1.25m となった．

b) 濁度計による計測

図-7 左側に示すように，ため池で採水したサンプルを濁度計にセットし，NTU の数値を計測したところ，9.87 であった．**図-7** の右側のグラフは濁度（NTU）と計測可能水深の関係を示しており，このグラフから NTU が 9.87 では計測可能水深は最大で 1.50m という計算結果となった．

以上のように計測対象のおおよその計測可能水深を事前確認した．

4．実験結果

(1) 水底の点群データ取得状況確認

UAV グリーンレーザ計測で取得した水底の点群取得状況は，**図-8** に示す例のようにケース①とケース②のどちらも水深が深い箇所では反射強度の大きい素材である検証点を除き，泥状の水底点群をほぼ取得できなかった．また，ケース①では水底検証点を全 5 点を計測できたが，ケース②で計測できたのは法面中腹に設置した 1 点(No.5)のみであり，最深部付近に設置した 4 点(No.1～No.4)は計測できなかった．

実際に現地でため池を目視した際も，ケース①では最深部の検証点を視認できたが，ケース②では全く見えなくなっており，点群のデータ取得状況と合致している．このことから，目視で水底の計測対象を判別できるかという確認方法は，前述の透明度による評価に加えて，簡易にグリーンレーザの計測可否を判断する指標として参考になるといえる．

(2) 水底検証点の座標精度

図-8 で示した検証点 5 点の中心座標を VRS-GNSS で計測した値を基準データとして，グリーンレーザ計測の 3 次元点群上から手作業で検証点の中心を指定して算出した座標との較差から XYZ の座標精度を評価した．なお，検証点箇所の点密度は平均で 0.01m^2 当たり 3 点だった．ケース①では最深部に設置した 4 点(No.1～No.4)を，ケース②では法面中腹に設置した 1 点（No.5）をそれぞれ対象として検証を行った．

その結果を**表-3** に示す．各検証点でのグリーンレーザの座標の較差は水平方向と鉛直方向でともに i-Construction の起工測量管理基準内(±0.100m)[2]の精度を満足した．また，点群を取得できた最大水深は約 1.2m であることを確認した．



図-6 セッキ板とセッキ水深計測の状況

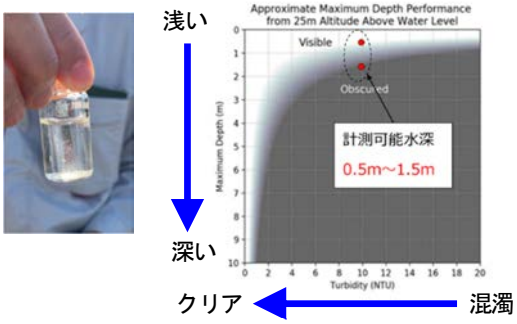


図-7 濁度計のサンプル（左）と評価シート[5]（右）

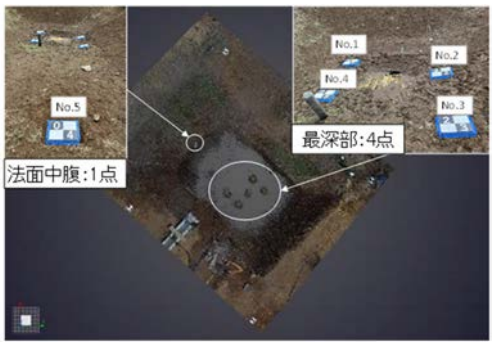


図-8 水底点群取得状況(ケース①の例)と検証点配置

表-3 水底検証点の座標精度結果

ケース①	X(m)	Y(m)	Z(m)	計測時の水深(m)
No.1-1	0.035	-0.008	0.031	0.880
No.1-2	-0.091	0.074	0.036	0.880
No.2-1	0.055	-0.039	0.049	0.861
No.2-2	0.016	0.050	0.041	0.861
No.3-1	0.003	-0.035	0.012	0.782
No.3-2	0.086	-0.026	0.004	0.782
No.4-1	0.044	-0.010	0.035	0.878
No.4-2	-0.001	0.003	0.031	0.878
ケース②	X(m)	Y(m)	Z(m)	計測時の水深(m)
No.5-1	0.092	-0.075	0.098	1.219
No.5-2	0.019	-0.002	0.023	1.219

(3) 面的な標高精度

ため池内部形状の TLS 点群と水底部分についての UAV グリーンレーザ点群をそれぞれ 10cm メッシュごとに区切って平均の標高値を算出し，その差分から標高精度を評価した． 各メッシュ箇所の水深と標高較差のヒ

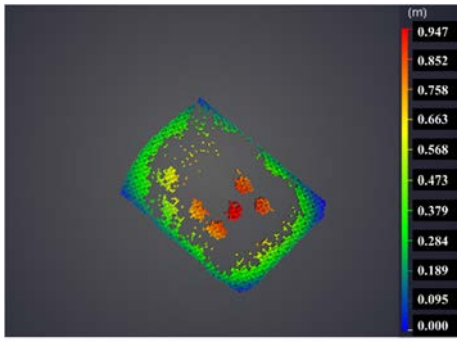


図-9 水深ヒートマップ(ケース①の例)

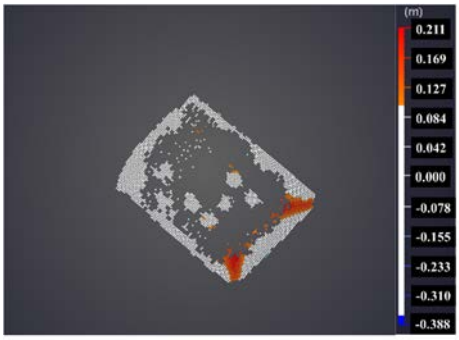


図-10 面の標高較差ヒートマップ(ケース①の例)

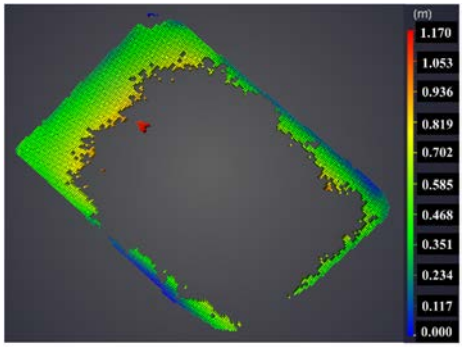


図-11 水深ヒートマップ(ケース②の例)

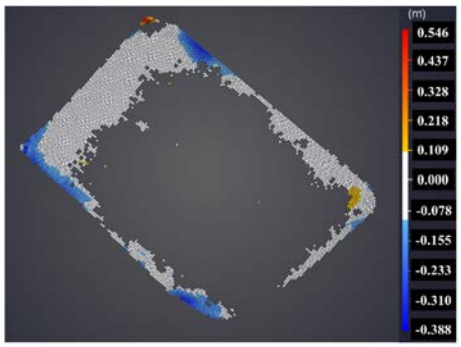


図-12 面の標高較差ヒートマップ(ケース②の例)

ートマップをケース①(図-9, 図-10), ケース②(図-11, 図-12)でそれぞれ示す. 標高較差のヒートマップは起工測量の管理基準[2]である±0.100m以内のメッシュを白色で表示している.

標高較差は比較的水深の深い箇所も含め, データの大部分で基準値内に入っている. また, 水際の境界部や法面の角部のように地形条件が変化している箇所で標高較差が大きくなる傾向を確認できた.

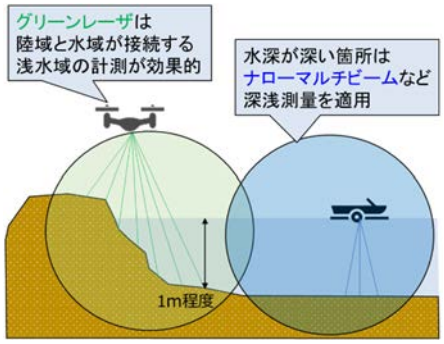


図-13 UAV グリーンレーザの適用範囲

5. まとめ

本検証で濁水域とした, 透明度の低いため池実験ヤードでの精度検証結果を以下にまとめる.

(1) UAV グリーンレーザの計測精度

水底点群の検証点による水平方向・鉛直方向の座標較差はいずれも i-Construction における起工測量の管理基準[2] (±0.100m)以内の精度であることを確認した.

面の標高精度においても, 一部の複雑な地形の箇所を除いて, 水深によらず一定の精度でデータを取得でき, 起工測量など工事測量への適用に繋がる結果を得られた.

(2) 水域における点群計測

本検証で計測対象とした透明度の低いため池では, 計測できる限界の水深は最大で 1.2m であることがわかった. 水深がそれよりも深い箇所の計測についてはナローマルチビーム(NMB)計測などの深浅測量が効果的であるため, UAV グリーンレーザ計測は図-13 のように深浅測量の調査艇が立入れない, 水深が浅い領域の地形データを補完する目的での使用に適しているといえる.

参考文献

1) 国土交通省報道資料, 「陸上・水中レーザドローン」現場実装へ：<https://www.mlit.go.jp/common/001271580.pdf>2019.2 (Accessed 2022.3.28)

2) 国土交通省：3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）2021.3

3) 澤城光二郎, 黒台昌弘：UAV グリーンレーザ計測の河川工事への適用性検証報告：安藤ハザマ研究年報 Vol.10 2022 No..12, 2023.2

4) 堺浩一, 間野耕司, 橘菊生, 西山哲：UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討, 河川技術論文集, 第 27 巻, pp. 51-56,2021.

5) LiteWave Technologies, Inc<https://www.litewavetech.com/_files/ugd/7f51ca_d8f6c643ac1c459f9dbd27bd15065369.pdf> (Accessed 2023.6.8)