

リングビームデバイスを用いた地盤内空洞測定スキャナーの開発と計測事例

前田建設工業株式会社 正会員 ○平田 昌史
前田建設工業株式会社 正会員 清水 英樹
埼玉医科大学 若山 俊隆

前田建設工業株式会社 正会員 安井 利彰
前田建設工業株式会社 正会員 矢嶋 貴大
NPO 法人三次元工学会 吉澤 徹

1. はじめに

日本全国には、地下資源採掘後に放置された廃坑や地下施設、鍾乳洞等の空洞が多数存在しており、陥没事故の発生原因の一つとなっている。このような陥没事故を未然に防ぐためには、地盤内の空洞の大きさや形状を調査し、グラウト材等で空洞を充填する対策工事が必要となる。しかしながら、空洞の大きさや形状を測定するには時間や費用がかかるため、事前調査や対策工事の際の出来形（充填状況）管理等も、十分に実施できない現状にある。そこで本研究では、地盤内空洞の大きさや形状を迅速かつ安価に測定することを目的として、リングビームデバイス^{1),2)}を用いた地盤内空洞測定スキャナーを開発した。リングビームデバイスとは、図-1 に示すように半導体レーザービームを円錐ミラーで円盤状に反射させることで写真-1 のようなリングビーム（Ring Beam）を生成し、測定対象内部に二次元の光セクション形状（Optical Sectioning）を投影する装置である。この光セクション形状を CCD カメラで撮像し、その画像を位置情報に基づいて繋ぎ合わせることで、対象物内面の三次元形状を非接触で取得する。このようなリングビームデバイスを用いた内面形状測定スキャナーは、これまで自動車等の各種部品やパイプ・配管、あるいは医療用内視鏡等に利用されており、直径数ミリから数センチ程度を測定対象としていた^{1),2)}。今回開発したリングビームスキャナー“SATURN”（Ring Beam Scanner which measures Sewer pipe, Adit, Tunnel, Round shaft, Natural cavity, etc.）は、高出力の半導体レーザー、魚眼レンズ等を使用することで、直径数メートルまでの測定を可能としている。本報告では、この開発したスキャナーの概要と簡単な測定事例³⁾について紹介する。

2. リングビームスキャナーの仕様および計測方法

リングビームスキャナー“SATURN”は、地盤内空洞

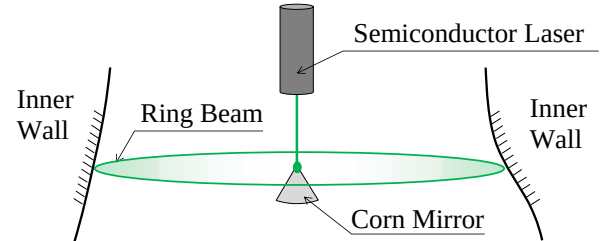


図-1 リングビームデバイスの模式図

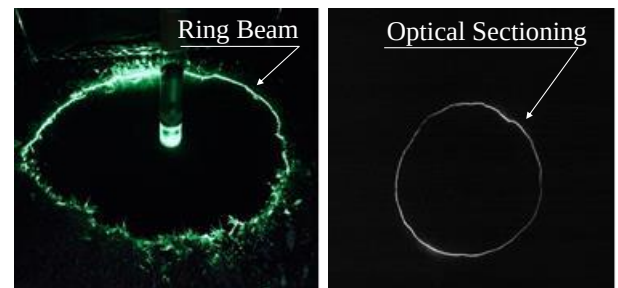


写真-1 リングビームと光セクション形状画像

の光セクション形状・位置を取得する計測プローブと、計測データを処理するモバイル PC から構成される。図-2 は、リングビームスキャナー“SATURN”による地盤内空洞の計測イメージ図である。この図に示すように、ワイヤー等で吊るした測定プローブをボーリング孔から挿入し、ウインチ等で引き上げながら空洞の大きさや形状を測定する。計測プローブには光セクション形状を撮影する CCD カメラと、位置情報を取得するための 3D モーションセンサー（3DMS）が内蔵されており、取得した画像や測定データはモバイル PC（写真-2 参照）に転送・処理され、測定結果をその場で確認することができる。

図-3 は、リングビームスキャナー“SATURN”の計測プローブである。標準的なボーリング孔（直径 86mm）から挿入することを想定し、直径 60mm、長さ 750mm、重さは約 5kg である。プローブ下端には高出力の緑色半導体レーザーを用いたリングビームデバイス、プローブ上端には魚眼レンズを装着した CCD カメラと 3D モーションセンサー（3DMS）が内蔵されており、これ

キーワード 空洞計測、三次元形状、リングビームデバイス

連絡先 〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16 前田建設工業株式会社 技術研究所 TEL 03-3977-2242

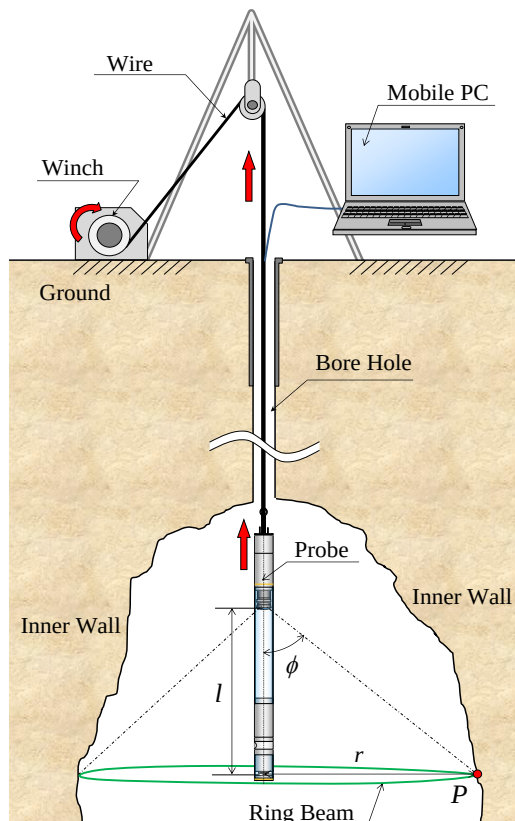


図-2 地盤内空洞の計測イメージ図

らをアクリル円筒で接続するシンプルな構造となっている。また、プローブの接続部は地下水等の侵入を考慮して防水処理を施すとともに、プローブ内部に窒素を充填し結露等を防止する仕様となっている。

3. 光セクションング画像の処理

先に述べたように、リングビームスキャナーは空洞等の測定対象に投影した光セクション形状を、CCDカメラで画像(写真-1 参照)として捉える装置である。空洞内部の寸法(半径)は、この光セクションング画像から、以下の式により幾何学的に求めることができる。

$$r = l \cdot \sin \phi \quad (1)$$

r は計測プローブ中心から光セクションングまでの半径、 l はCCDカメラとリングビームデバイスとの基線長、 ϕ は基線長と光セクションング面の角度である(図-2 参照)。ここで、CCDカメラで撮像した光セクションング形状はデジタル画像であるため、半径 r の計測精度はCCDカメラの解像度に依存することになる。そこで、リングビームスキャナー“SATURN”では、計測精度を向上させるため、次のような計算・処理を行っている。光セクションング画像の光強度は、計測プローブ中心からの半径 r に対して、図-4に示すようなガウ

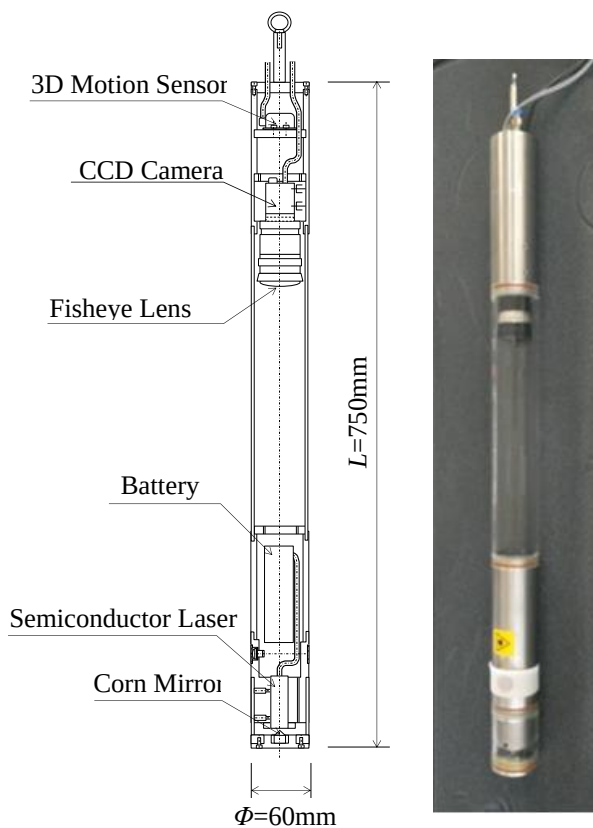


図-3 リングビームスキャナーの計測プローブ

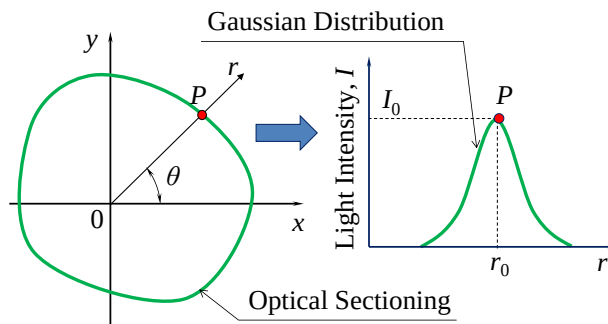


図-4 光セクションング形状と光強度分布



写真-2 モバイル PC

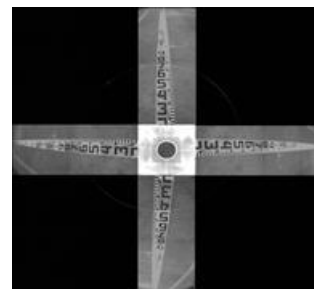


写真-3 魚眼レンズの歪み

ス分布を描く。そこで、この光強度分布 I を次のように定義する。

$$I = I_0 \cdot \exp \left\{ -\ln 2 \cdot \frac{(r - r_0)^2}{w^2} \right\} \quad (2)$$

I_0 は光強度の最大値、 r_0 は光強度が最大となる半径、 w は半値幅である。この式(2)の両辺に対して対数を取り、以下のように整理する。

$$\ln|I| = ar^2 + br + c \quad (3)$$

$$r_0 = -\frac{b}{2a}, \quad I_0 = \exp\left(c - \frac{b^2}{4a}\right), \quad w^2 = -\frac{1}{2a} \quad (4)$$

これらの係数 $a \sim c$ を最小二乗法のフィッティングにより求めれば，CCD カメラ画像の画素間に埋もれた半径 r_0 がサブピクセルで求められ，画像の解像度以上の精度が得られることになる．なお，計測プローブの CCD カメラには，広範囲を撮像するための魚眼レンズが装着されており，写真-3 に示すようにプローブ中心からの距離が遠くなるにつれて画像が歪曲する．このため，図-5 に示す半径 r と画素数の関係から得られた近似曲線を用いて，歪曲した画像の補正を行っている．ちなみに，半径が大きくなるに伴い画像が粗くなるため，サブピクセルで精度を向上させることにも限界がある．本リングビームスキャナーの計測誤差は，理論上は半径 2.5m で約 1% であり，これより半径が大きくなると計測誤差が急激に増加する．

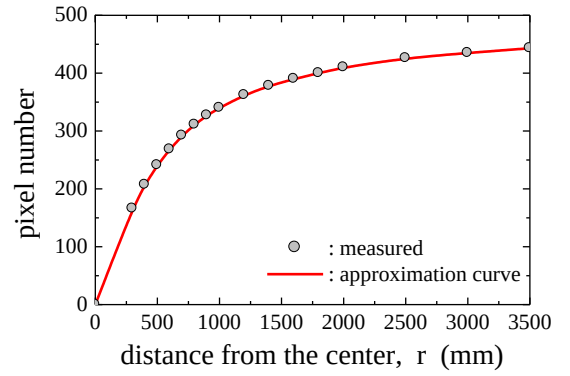


図-5 中心距離と画素数の関係

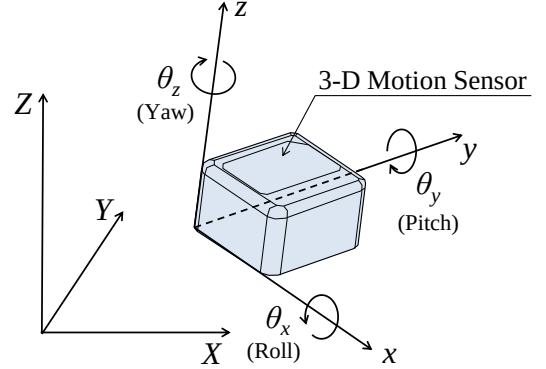


図-6 グローバル座標とローカル座標

4. モーションセンサーによる位置・姿勢の推定

空洞等の測定対象の三次元形状は，二次元の光セクション形状を位置情報に基づき繋ぎ合わせて得ることができる．このため，光セクション画像を取得した際，計測プローブの位置・姿勢情報が別途必要となる．そこでリングビームスキャナー“SATURN”では，三次元の加速度信号を測定する 3D モーションセンサー（3DMS）を用いて，必要となる計測プローブの位置・姿勢を推定している．なお，位置や姿勢は加速度信号を積分することで求められるが，積分する際に加速度信号に含まれるノイズや誤差等が蓄積・増幅されるため，これまで高い精度での推定が困難であった．ここでは，計測プローブの動きを図-2 に示したような鉛直方向に限定するとともに，フィルタ処理や補正関数を導入することによって，高い精度の位置・姿勢推定を実現している．

(1) 測定プローブの位置推定方法

図-6 に示すように，計測プローブに搭載した 3DMS がローカル座標系 $x-y-z$ ，空洞等の計測対象がグローバル座標系 $X-Y-Z$ に従うものとする．計測プローブが移動した際に 3DMS が測定する加速度信号は，ローカル座標系 $x-y-z$ の各軸方向の加速度 $\alpha_x(t)$ ， $\alpha_y(t)$ ， $\alpha_z(t)$ である．

なお，計測された加速度信号にはノイズが含まれているため，ローパスフィルタによる処理を施している．今，計測プローブ（3DMS）の各軸がグローバル座標系に対して θ_x ， θ_y ， θ_z 傾いている（回転している）とすると，グローバル座標系における計測プローブの加速度 $\alpha_x(t)$ ， $\alpha_y(t)$ ， $\alpha_z(t)$ は，以下のように求められる．

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x(t) \\ \alpha_y(t) \\ \alpha_z(t) \end{Bmatrix} = \mathbf{R}_z(\theta_z) \cdot \mathbf{R}_y(\theta_y) \cdot \mathbf{R}_x(\theta_x) \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_x(t) \\ \alpha_y(t) \\ \alpha_z(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{R}_x(\theta_x)$ ， $\mathbf{R}_y(\theta_y)$ ， $\mathbf{R}_z(\theta_z)$ は各軸に対する回転行列であり，次のように定義される．

$$\mathbf{R}_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

計測プローブの動きをグローバル座標系の鉛直方向（ Z 方向）に限定して考えると，鉛直方向（ Z 方向）

の移動速度 $v_z(t)$ は、式(5)で求めた鉛直方向の加速度 $\alpha_z(t)$ を以下のように積分することで求められる。

$$v_z(t) = \int_0^t \{\alpha_z(t) - g\} \cdot dt \quad (9)$$

g は重力加速度である。なお、3DMS で計測される加速度信号は離散データであるため、式(9)の積分は次のような総和に置き換えて計算することになる。

$$v_z(t) \approx \sum_{n=0}^n \{\alpha_z(n) - g\} \Delta t \quad (10)$$

n は加速度の計測数、 Δt は計測間隔である。図-7 の点線は、3DMS で計測した加速度信号から、式(10)を用いて移動速度 $v_z(t)$ を計算した例である。この例では、計測開始時 ($t=0$) と計測終了時 ($t=t_L$) にはウインチによる巻き上げを行っていないため、この時の計測プローブの移動速度はゼロである。しかしながら、図-7 に示すように誤差が蓄積し、計測終了時の移動速度がゼロにならない。そこで、蓄積される誤差が一次関数に従うと仮定した補正関数 $H(t)$ を作成し、移動速度 $v_z(t)$ を次のように補正する。

$$H(t) = \frac{t}{t_L} \cdot v_z(t_L) \quad (11)$$

$$\bar{v}_z(t) = v_z(t) - H(t) \quad (12)$$

図-7 に、補正した移動速度 $\bar{v}_z(t)$ の例を示す。計測プローブの鉛直方向の相対位置 $Z(t)$ は、補正後の移動速度 $\bar{v}_z(t)$ を以下のように積分することで求める。

$$Z(t) = \int_0^t \bar{v}_z(t) \cdot dt \approx \sum_{n=0}^n \bar{v}_z(n) \Delta t \quad (13)$$

図-8 は、以上の式を用いて 3DMS で測定した加速度信号から推定した高さ位置と、トータルステーションを用いて測定した高さ位置を比較した図である。この図に示すように、3DMS の推定結果とトータルステーションによる測定結果はほぼ一致しており、鉛直方向の相対位置が高い精度で推定できることがわかる。

(2) 測定プローブの姿勢補正

ワイヤー等を用いて吊り下げた計測プローブには、例えば空洞内部の空気の流れやコリオリ、ボーリング孔挿入時の影響等により、揺れが生じる。また、ワイヤー等のねじれによる回転（ヨーイング）運動も生じるため、測定した三次元形状の姿勢補正が必要となる。そこで、図-2 に示すようにワイヤー等で吊り下げた計

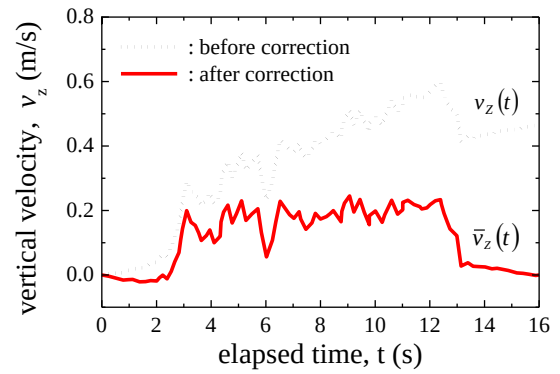


図-7 引き上げ速度の補正例

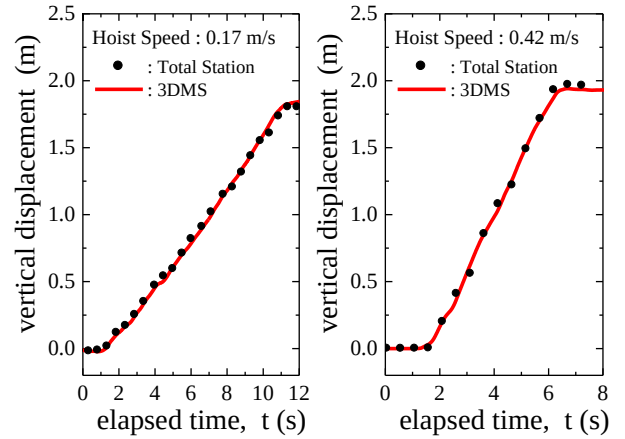


図-8 3DMS とトータルステーションの比較

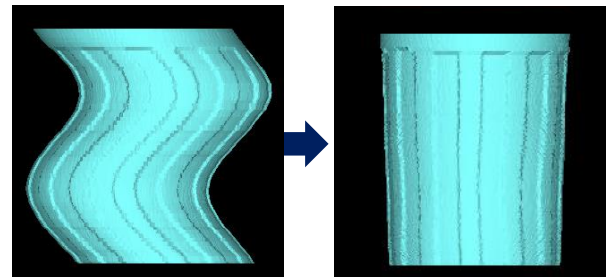


図-9 計測プローブの揺れ補正例

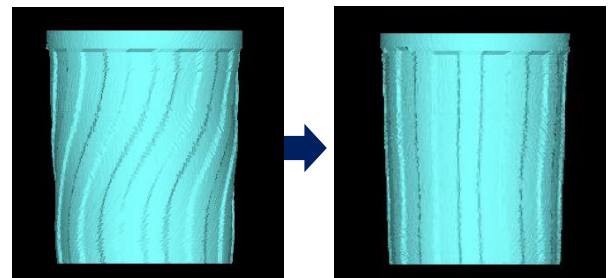
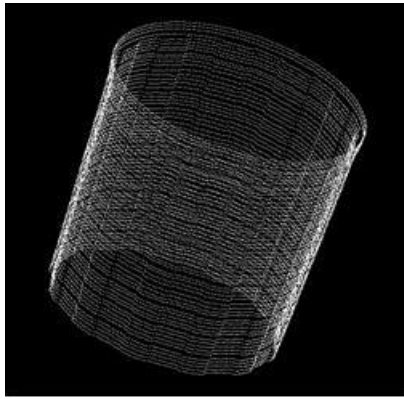


図-10 計測プローブのヨーイング補正例

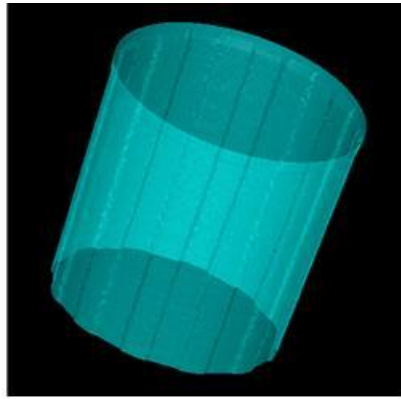
測プローブの運動を単振り子運動であると仮定する。この時、水平方向移動量 $x(t)$ 、 $y(t)$ は各軸の回転角 θ_x 、 θ_y を用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned} x(t) &= L(t) \cdot \tan \theta_y \approx L(t) \cdot \theta_y \\ y(t) &= L(t) \cdot \tan \theta_x \approx L(t) \cdot \theta_x \end{aligned} \quad (14)$$

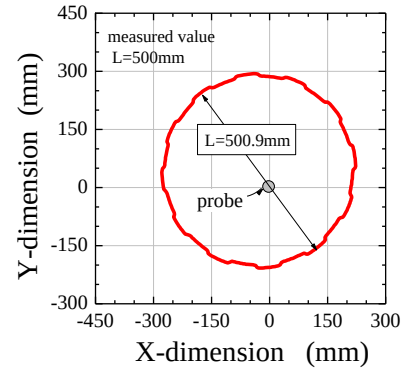
$L(t)$ は支点から光セクション面までの長さであり、ここでは次のように近似する。



(a) 測定結果（点群データ）

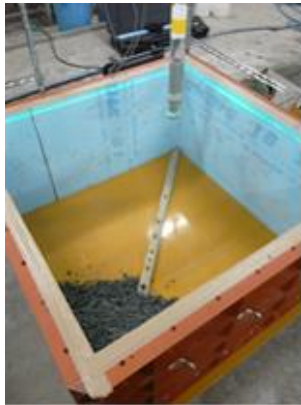


(b) 測定結果（ポリゴン処理）

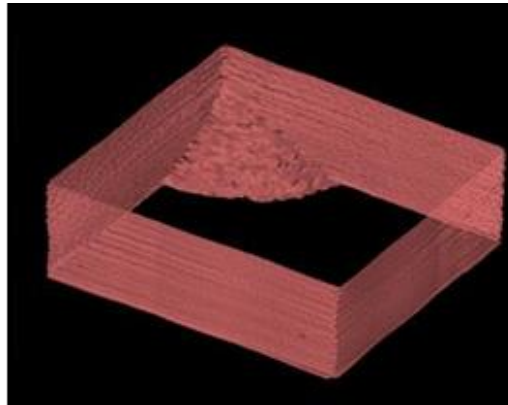


(c) 任意断面の測定結果

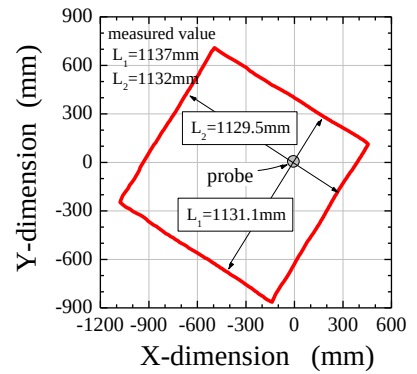
図-11 ポリバケツの測定事例



(a) 測定した鋼製型枠



(b) 測定結果（ポリゴン処理）



(c) 任意断面の測定結果

図-12 鋼製型枠の測定事例

$$L(t) \approx L_{ini} - Z(t) \quad (15)$$

L_{ini} は支点から光セクション面までの初期長さ、 $Z(t)$ は式(13)に示した計測時間 t における鉛直方向の相対位置である。なお、初期長さ L_{ini} は計測開始前の計測プローブの揺れ周期 T_{ini} から、以下の式で求められる。

$$L_{ini} = g \cdot \left(\frac{T_{ini}}{2\pi} \right)^2 \quad (16)$$

また、ワイヤー等のねじれによる回転（ヨーイング）については、その回転角 θ_z を用いて次のように考慮すればよい。

$$\begin{aligned} X(t) &= x(t) \cdot \cos \theta_z + y(t) \cdot \sin \theta_z \\ Y(t) &= -x(t) \cdot \sin \theta_z + y(t) \cdot \cos \theta_z \end{aligned} \quad (17)$$

以上の式を用いて、計測プローブに生じる揺れとヨーイングを補正した事例を、図-9 および図-10 に示す。

5. リングビームスキャナーによる簡易計測事例

リングビームスキャナーを用いて、簡易な計測を実施した。なお、計測ではワイヤーの引き上げにリフト

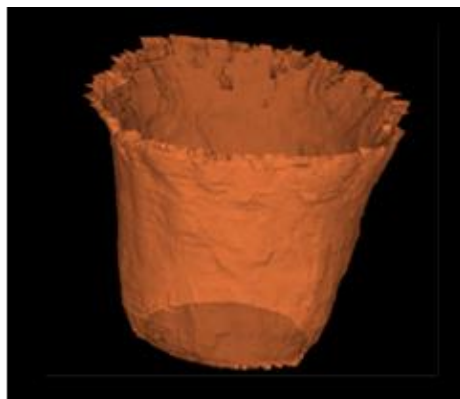
速度約 11m/min（約 0.18m/s）の小型電動ウインチを用いている。これは、鉛直距離 1m を約 5.5 秒で測定する速度である。また、CCD カメラのフレームレートが 30fps であることから、鉛直方向に約 7mm 毎で光セクション画像が取得できる計算となる。

図-11 は、ポリバケツを測定した事例である。計測高さは約 0.5m で計測時間約 3 秒、取得した光セクション画像は 85 枚である。ここでは、光セクション画像に対して 1° 毎に半径を計算しており、この結果は図-11(a)に示すような点群データとして出力される。図-11(b)は、この点群データを基にポリゴン処理した図である。この図を見ると、ポリバケツ内部の凹凸まで忠実に測定できていることがわかる。図-11(c)は、ポリバケツ上端付近における任意断面の測定結果グラフである。この図に示すように、巻尺で測定した実測値が直径 500mm（凸位置）であるのに対して、リングビームスキャナーによる計測結果は直径 500.9mm であり、精度よく計測できていることがわかる。

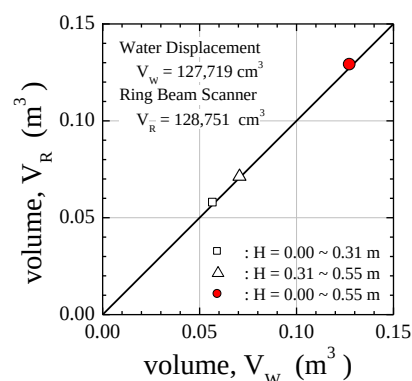
図-12 は、鋼製型枠を測定した事例である。型枠の内寸は 1.2m(L)×1.2m(B)×0.6m(H)で、型枠内側には厚さ



(a) 測定した掘削孔



(b) 測定結果（ポリゴン処理）



(c) 水置換との体積比較

図-13 掘削孔の測定事例

30mm の発泡スチロールを張り付けている。また、図-12(a)に示したように、型枠の一角には土砂を投入している。計測時間は約 3 秒、取得した光セクション画像は 95 枚である。図-12(b)は、ポリゴン処理した測定結果である。この図を見ると、土砂の堆積形状を忠実に測定できていることがわかる。図-12(c)は、鋼製型枠上端付近における任意断面の測定結果グラフである。巻尺による実測値が $L=1137\text{mm}$ 、 $B=1132\text{mm}$ であったのに対して、リングビームスキャナーによる計測結果は $L=1131.1\text{mm}$ 、 $B=1129.5\text{mm}$ である。

図-13 は、直径約 0.7m、深さ約 0.6m の掘削孔を測定した事例である。計測時間は約 3 秒、取得した光セクション画像は 88 枚である。測定結果をポリゴン処理した図-13(b)を見ると、掘削孔内部の起伏も測定できていることがわかる。図-13(c)は、リングビームスキャナーで計測した体積 V_R と、水置換により測定した体積 V_W を比較したグラフである。水置換で測定した体積 V_W が $127,719\text{ cm}^3$ であるのに対し、リングビームスキャナーから得られた体積 V_R は $128,751\text{ cm}^3$ であり、その差が 1%未満であることから、体積についても精度よく測定できていることがわかる。

6. リングビームスキャナーによる現場計測事例

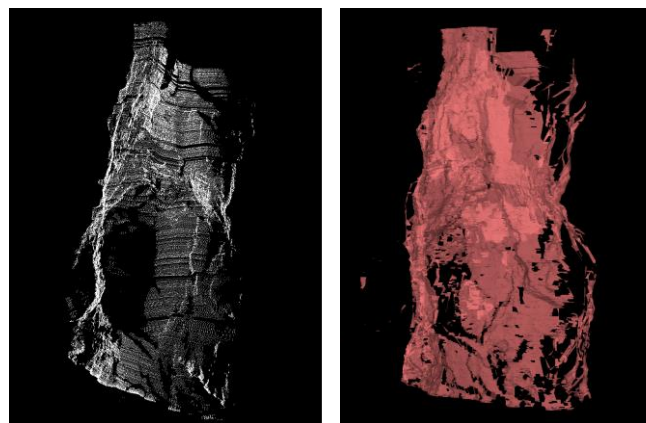
平成 26 年 8 月 20 日に広島県で発生した豪雨による大規模な土石流災害の事後調査において、阿武山山頂付近の土石流発生位置（図-14 参照）で空洞が発見された。写真-4 に発見された空洞入口の状況を示す。この空洞から雨水が浸透し、土石流発生の要因となった可能性も考えられたため、空洞の形状を調査する目的でリングビームスキャナーによる計測を実施した。なお、計測では手動ウインチを用いて約 0.2m/s の速度でプロ



図-14 現場位置図



写真-4 現地空洞と計測状況



(a) 測定結果（点群データ） (b) 測定結果（ポリゴン）

図-15 現地空洞の計測結果

ープを引き上げている。計測高さは約 4.2m、計測時間は約 21 秒、取得した光セクション画像は 405 枚であった。

図-15 は、リングビームスキャナーによる測定結果である。この図を見ると、横穴や凹凸の激しい位置ではデータを取得できない個所も見られるが、空洞内部の寸法や形状を十分把握することができる。

7. おわりに

本報告では、地盤内空洞の大きさや形状を迅速かつ安価に測定することを目的として開発した、リングビームスキャナー“SATURN”の概要と測定事例について紹介した。本スキャナーは、レーザー距離計を用いた従来型のスキャナー^{4),5)}では数時間を要する測定を、事例でも紹介したように、わずか数秒で計測することが可能である。また、計測プローブの構造がシンプルで、且つ半導体レーザーや CCD カメラ等の汎用的な機器を使用しているため、スキャナー本体を比較的安価に作製できる。さらに、内蔵した 3D モーションセンサーにより位置や姿勢を補正するため、従来のようなロッドではなくワイヤー等で引き上げる簡易な方法で測定でき、持ち運びにも優れている。従来型のスキャナーに比べて、測定範囲が狭いことや、鮮明な光セクション形状を得るため暗所での計測が必要となる等の短所もあるが、計測の効率化や費用の大幅な削減が見込めるリングビームスキャナーは、実務において十分有用であると考えられる。

本リングビームスキャナーは、空洞充填工事における事前調査や出来形管理、現場密度試験（水置換）等への適用を想定して製作したものであるが、今後さまざまな現場で使用していくことで、地下空洞以外の対象物への適用等についても検討していく予定である。

謝辞

リングビームスキャナー“SATURN”を開発するにあたり、ご協力いただいた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Yoshizawa, M. Yamamoto and T. Wakayama : Inner profile measurement of pipes and holes using a ring beam device, Proc. of SPIE 6382, 2006.
- 2) T. Wakayama and T. Yoshizawa : Development of an inner profile measurement instrument using a ring beam device, Proc. of SPIE 7855, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications, 78550B, 2010.
- 3) 平田昌史, 清水英樹, 安井利彰, 矢嶋貴宏, 若山俊隆, 吉澤徹 : 地盤内空洞等を対象としたリングビームスキャナーの開発, 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-159, pp.317-318, 2016.
- 4) 中田文雄, 藤原盛光, 野口静雄, 坂上敏彦 : 地下空洞調査機器の開発とその適用, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.821-822, 2004.
- 5) 山邊晋, 坂上敏彦, 槌谷勝之, 藤原盛光 : 3D キャビティスキャナー“CALS”の空洞調査への適用～従来型技術との比較～, 全地連, 技術 e-フォーラム, 2007.