

免震ベースプレート下部コンクリートの充填率自動化に向けた 大平面精密3次元画像計測技術の開発

鈴木 藍雅^{*1}・佐藤 貢一^{*2}・中村 俊之^{*3}

Keywords : Base-isolation, Automation, Quality assessment, Computer vision, 3D measurement

免震施工, 自動化, 高品質化, コンピュータビジョン, 三次元測定

1. はじめに

1.1 研究の背景

基礎免震構造では、上部躯体の荷重を地盤へ伝達するために、図1に示すように免震装置の下部に鋼製のベースプレート（Base Plate; BPL）を設けることが一般的である。BPLは内部に高流動コンクリートやグラウトを充填して初めて設計強度を發揮するが、圧送過程や材料の品質に依拠して、気泡やブリードが混入することがある。これらはBPL下部コンクリート内部に空隙を生じさせ、免震層の構造安全性を低下させる主因となる。

こうした背景のもと、日本免震構造協会(JSSI)のJSSI免震施工標準^①によって、免震BPL下部コンクリートの充填性を担保するための施工手順のアセスメント基準が定められている。これによると免震BPLの施工においては、実寸大の試験体を製作し、上部鋼板を撤去した際に露出する充填コンクリートの表面を観察し、基準値以上の長径を持つ空隙を対象として、その全体表面積に対する面積割合(充填率)を算出する。図2に示す充填率算出のイメージにおいて、検査対象のBPL全面の面積をS、橙色で示す大きな空隙の面積をs_i、緑色に示す呼び込みボルト孔や天板のめくり時に生じたコンクリート剥離などに起因する空隙箇所ではない、アーティファクト領域の面積をg_jとおくとき、その充填率ηは

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{S - \sum_j g_j} \sum_i s_i \right) \quad (1)$$

と定義される。

この充填率の評価・算定にあたって、当社標準の施工フローにおいては

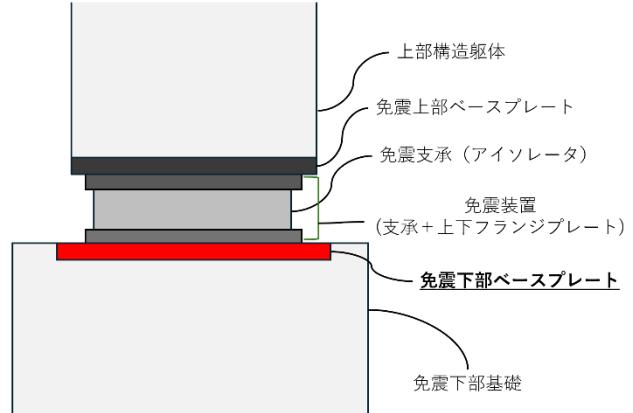


図1 免震建物におけるベースプレート
Fig.1 A base plate beneath a seismically-isolated building

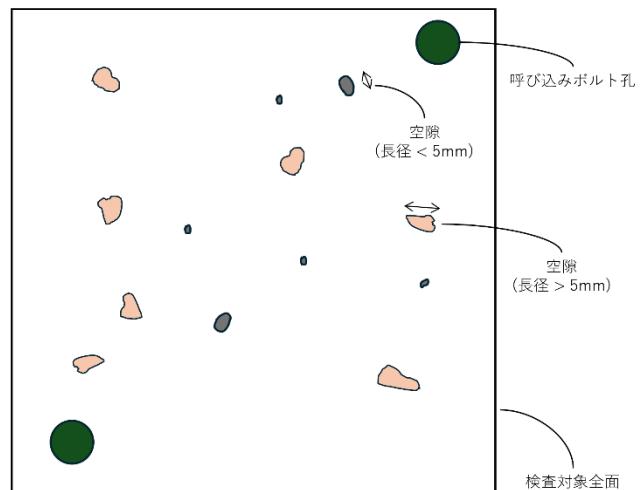


図2 免震BPL下部コンクリートに生じる空隙の例
Fig.2 An example of air voids on the surface of BPLs

1. BPL 試験体製作
2. ペンキを用いた空隙箇所の全数着色

3. 倒影撮影
 4. 画像処理ソフト上での再ペイント
 5. 画像処理ソフト上での面積率(充填率 η)算定
- という手作業でのフローが実施されている。

免震層の構造安全性を担保できる充填率 η については、JSSI の同標準¹⁾によると $\eta > 0.9$ (90%)以上が基準として与えられているが、当社では一層の品質担保や、前述の手作業工程における見落としのリスクを加味し、安全率を加えたより一層厳しい基準でのアセスメントを行っている。この検査フローは BPL の大きさや施工条件によるものの 1 サイクルに 2~5 日を要し、その作業負担の大きさや、主観性の大きさが長らくの課題となっていることから、その自動化が求められてきた。

こうした課題に対して複数の先行研究^{2),3)}では、着色前の BPL の倒影静止画像上で空隙による画素値の変化が生じることに着目して、深層学習によるセマンティックセグメンテーションに基づいた空隙率自動算定手法を提案している。これらの手法は一定の精度で空隙箇所を自動判定できることが報告されているものの、平面画像から空隙が生じさせる陰影を元にその領域を特定するため、当社における予備検討においても、骨材を空隙と誤認識したり、日照条件によってその認識精度が変化するリスクが存在する。

このような背景のもと本研究では、BPL 下部コンクリートに生じる表面空隙が本質的に「3 次元的な凹み」として観察されることに注目し、充填率の全自动算定に向けた、コンクリートの表面形状の画像三次元測定法を提案する。

1.2 研究の概要

本研究では、照度差ステレオ(Photometric Stereo; PS)法と呼ばれる、平面画像からの 3 次元形状復元を行うアルゴリズムと、開発した可搬型撮影治具と組み合わせたシステムによって、BPL 下部コンクリート表面に生じた微小空隙の位置・形状を精密に復元する方法を提案する。提案法は BPL 下部コンクリートの充填性試験という状況において仮定できる (i) 試験体上面は大局的に平面かつ生じる空隙は微小凹部という幾何的事実、(ii) 測定対象はコンクリートであるという物理的特性の二点を利用し、本来莫大な計算量を要する実条件における PS 法による精密 3 次元再構成の処理を、

ソフトウェア・ハードウェアの両面的アプローチから効率的に行う。実験では、コンクリート表面に対する 3 次元再構成を行い、大面积に対してミリメートルスケールでの精密な三次元再構成を行えることを示す。

2. 三次元再構成アルゴリズム

2.1 Photometric Stereo 法

物体の特定の位置に光が入射すると、その光の入射方向と物体の形状に対応して、観察される画像上に陰影が生じる。PS 法は「物体を撮影した画像に生じる影は、光の入射方向と物体形状によって定まる」という性質に基づき、物体に入射する光を様々に変化させ、固定されたカメラによって得られた画像から、物体の形状を逆算するアルゴリズムである^{4),5)}。

いま、画像平面上の画素位置を 2 次元平面上のベクトル $\mathbf{x} = (x, y)^T$ で表す。簡単のため光学撮像系を正射影モデルとすると、物体表面の形状は奥行き方向を正とする高さベクトル $\mathbf{z} = \mathbf{z}(\mathbf{x}, y)$ を用いて定義される写像 $X: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$X(\mathbf{x}) = (x, y, z(x, y))^T \quad (2)$$

として与えられる。

太陽光のように光源が無限遠点に存在し、物体の各点で平行な光 \mathbf{l} が入射するような条件を考える。測定対象の物体の表面輝度が等方的で、その光の反射強度が光の入射角 θ に対して、 $\cos \theta$ で減衰するような特性を持つとき、物体は Lambertian 反射特性を持つ、あるいは単に Lambertian 物体であるという。陶磁器やコンクリートの様に、微視的に多孔質構造を持つ材料は、その多孔質構造によって等方的に光を反射することから、Lambertian 物体と見なせることが一般に知られている⁶⁾。Lambertian 反射特性を持つ物体に平行光が入射したときに、撮像系で得られる画像 $I(\mathbf{x}) = I(x, y)$ は

$$I(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) \cdot \langle \mathbf{N}(\mathbf{x}), \mathbf{l} \rangle \quad (3)$$

で与えられる。ただしここで $\rho(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}$ は、物体表面の光の反射率(アルベド)、 $\mathbf{N}(\mathbf{x})$ は物体形状 $X(\mathbf{x})$ に対応する物体の各点に対応する法線ベクトル場、 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ はベクトルの Euclid 内積を表す。この方程式は Lambertian 物体に対する反射方程式(reflection equation)と呼ばれる。

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 AI研究室

*2 技術センター 都市基盤技術研究部 音響研究室

*3 建築本部 技術部

これは各点 \mathbf{x} において、光線ベクトル \mathbf{l} と物体表面の法線 $N(\mathbf{x})$ から定まる線形方程式であり、いま、 m ($m > 3$)個の相異なる平行光線ベクトルを $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_m$ とし、それら m 個の光学的条件によって得られた画像 I_1, I_2, \dots, I_m を並べた行列をそれぞれ

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \text{vec}(I_1(\mathbf{x})) \\ \vdots \\ \text{vec}(I_m(\mathbf{x})) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} \mathbf{l}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{l}_m^T \end{pmatrix} \quad (4)$$

とおくと、反射方程式は $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$ の各点ごとに

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{L}N(\mathbf{x}) \quad (5)$$

と書き下せる。 $N(\mathbf{x})$ は各点で単位ベクトルであるという仮定 ($\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2, \|N(\mathbf{x})\|_2^2 = 1$) をおけば、 L に関するMoore-Penrose型一般逆 $L^\dagger = (L^T L)^{-1} L^T$ と、

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = L^\dagger \mathbf{I}(\mathbf{x}) \quad (6)$$

と用いて、方程式系の解を

$$\rho(\mathbf{x}) = \|\mathbf{g}(\mathbf{x})\|_2, N(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{g}(\mathbf{x})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{x})\|_2} \quad (7)$$

と表すことができる。このようにPS法は、物体形状の推定問題を光線方向について、反射方程式を連立することで、線形方程式系の解として物体形状を推定するアルゴリズムである。

2.2 近接点光源 PS

2.1節に述べたような標準的なPS法は、連立方程式系のバリエーションとなる光源 \mathbf{l}_j が無限遠点に存在し、物体の各点で同一方向・同強度に光束が入射することを仮定している ($\mathbf{l}(\mathbf{x}) = \mathbf{l} \perp \mathbf{x}$)。しかし、人工的に光源を配する現実的な条件においては、光源を無限遠点に取ることができず、物体の各点で入射する光線ベクトルの方向が変化するほか、光源との距離の逆二乗に応じて、その単位面積あたりの放射強度も減衰する。図3に示すような現実的な近接点光源条件において、その反射方程式を考えると

$$I_j(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) \cdot \frac{i_0^{(j)}}{\|\mathbf{l}_j(\mathbf{x})\|_2^2} \cdot \left\langle N(\mathbf{x}), \frac{\mathbf{l}_j(\mathbf{x})}{\|\mathbf{l}_j(\mathbf{x})\|_2^2} \right\rangle \quad (8)$$

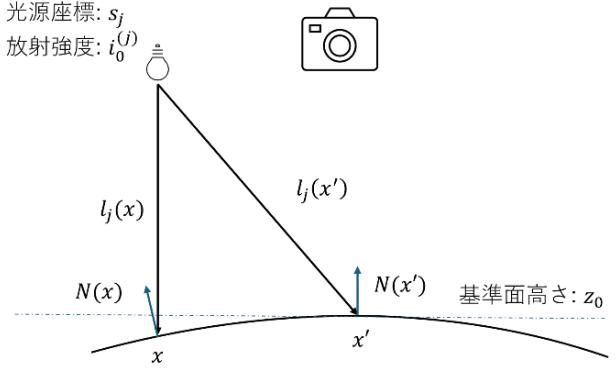


図3 近接点光源条件におけるPS法
Fig.3 Conceptual diagram of near-field photometric stereo

と、アルベド項・単位面積に入射する光束の距離減衰項・Lambertian反射の \cos (Euclid内積)項の積として表される。これを近接点光源(near-field pointlight)条件における反射方程式と呼ぶ。ここに、物体の点 \mathbf{x} に入射する光線ベクトル $\mathbf{l}_j(\mathbf{x})$ は、光源の座標 $s_j \in \mathbb{R}^3$ と、物体の形状 $X(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^3$ を用いて、

$$\mathbf{l}_j(\mathbf{x}) = \mathbf{s}_j - X(\mathbf{x}) \quad (9)$$

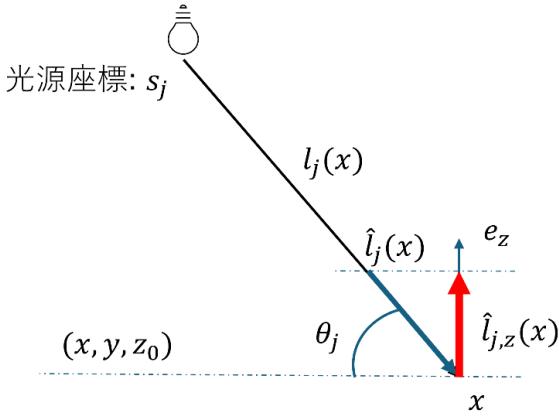
と表されることに注意する。

この近接点光源条件における反射方程式は、光源が無限遠点にあった場合の反射方程式(3)に比べ、光線の強度、入射方向のいずれもが平面画像上の位置 \mathbf{x} によって異なる。さらに式(4), (5)と同様に光源 $j = 1, \dots, m$ について連立しても、本来推定したい物体形状 $X(\mathbf{x})$ という未知量が、 $\mathbf{l}_j(\mathbf{x})$ を通して、アルベド以外の全ての項に現れることから、単純な最小二乗の枠組みでは解くことができず、各画素 \mathbf{x} についての大規模な非線形最適化問題となり、高解像度画像に対して高精度の三次元再構成を行うことは計算時間・メモリ量の観点から極めて困難な不良設定問題となることが知られている⁷⁾。

2.3 提案手法：近接点光源PSの近似解法

本研究では、対象とするBPL下部コンクリートの空隙箇所の検出という問題から得られる自然な仮定を用いて、この近接点光源PSの高速化を行う。本研究で対象とする空隙検査自動化においては、

1. 対象とするBPL下部コンクリート面はボルト痕や空隙箇所を除いて大局的に平面であり、空隙は高々微小な変位であること
2. 対象物体は彩色に乏しいコンクリート・グラウト

図4 l_{j0} と入射角 $\theta(x)$ の関係Fig.4 Relationship between incident angle θ and light vector l

であり、各点でほとんど均質なアルベドを持つ Lambertian 物体であることを仮定できる。

いま、観測系を正射影モデルとすれば、仮定 1 から、BPL 表面の大部分は平面と見なせるため、各画素に対応する座標 $\mathbf{x} = (x, y)$ は、定数変位 z_0 により基準面

$$\mathbf{X}_0(\mathbf{x}) = (x, y, z_0)^T \quad (10)$$

として表される、再構成対象としてい空隙も高々微小な高さ方向の変位として表されるとすれば、BPL 下部コンクリートの形状は

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}) = \mathbf{X}_0(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x})\mathbf{e}_z \quad (11)$$

と、微小変位 $\delta(\mathbf{x}) \approx 0$ を用いてモデル化できる。ただし、ここで $\mathbf{e}_z = (0, 0, 1)^T \in \mathbb{R}^3$ は高さ方向に対する単位ベクトルである。このようなモデルによって、コンクリートの表面形状 X を推定する問題は、画素上の各点 \mathbf{x} で物体形状を推定する問題は、微小変位 $\delta(\mathbf{x})$ を推定する問題に帰着する。

また仮定 2 によるとコンクリートのアルベドは位置 \mathbf{x} に依存しない定数として

$$\rho(\mathbf{x}) \approx \rho_0, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \quad (12)$$

とおける。

いま図 4 のとおりに、 j 番目の近接点光源の位置を $\mathbf{s}_j = (s_{jx}, s_{jy}, s_{jz})^T$ 、その放射強度を $i_0^{(j)}$ とする。物体上の位置 \mathbf{x} と s_j までの距離は微小変位 $\delta(\mathbf{x})$ を無視すれば、対象物体によらず

$$D_j(\mathbf{x}) = \|\mathbf{s}_j - \mathbf{X}_0(\mathbf{x})\|_2 \quad (13)$$

とおける。ここに $\delta = 0$ とおいたときの基準面 $\mathbf{X}_0(\mathbf{x})$ に対する単位光線ベクトル $\hat{\mathbf{l}}_{j0}(\mathbf{x})$ を

$$\hat{\mathbf{l}}_{j0}(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mathbf{s}_j - \mathbf{X}_0(\mathbf{x})}{D_j(\mathbf{x})} = (\hat{l}_{j0,x}, \hat{l}_{j0,y}, \hat{l}_{j0,z})^T \quad (14)$$

と書くこととすると、図 5 に示す単純な幾何的対応から、光線ベクトルの入射角を θ_j として、

$$\hat{l}_{j0,z} = \cos \theta_j \quad (14)$$

なる関係を示せる。

式(12)のモデル化によって、表面形状の推定はもはや $\delta(\mathbf{x})$ の推定問題に緩和されていることから、式(8)の分母に表れる $\|\mathbf{s}_j - \mathbf{X}(\mathbf{x})\|^{-2}$ を δ に関して一次 Taylor 展開すると、

$$\frac{1}{\|\mathbf{s}_j - \mathbf{X}(\mathbf{x})\|^2} = \frac{1}{D_j^2} \left(1 + \frac{2\delta(\mathbf{x}) \hat{l}_{j,z}}{D_j} \right) + \mathcal{O}(\delta^2) \quad (15)$$

を得る。

また、式(14)と同様の記法を用いると、式(8)に現れる内積項は $\langle \mathbf{N}(\mathbf{x}), \hat{\mathbf{l}}_j \rangle$ と書ける。同様の計算で $\hat{\mathbf{l}}_j$ の一次 Taylor 展開も

$$\hat{\mathbf{l}}_j = \hat{\mathbf{l}}_{j0} - \frac{\delta}{D_j} + \mathcal{O}(\delta^2) \quad (16)$$

と書ける。また、 $\mathbf{N}(\mathbf{x})$ について、外積による法線ベクトル場の定義と式(11)から

$$\begin{aligned} \mathbf{N}(\mathbf{x}) &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\partial y} \\ &= (-\partial_x \delta, -\partial_y \delta, 1)^T = \mathbf{e}_z - \nabla \delta \end{aligned} \quad (17)$$

であることを用いれば、内積項は

$$\langle \mathbf{N}(\mathbf{x}), \hat{\mathbf{l}}_j \rangle \approx \hat{l}_{j0,z} + \nabla_{x,y} \delta \cdot (\hat{l}_{j0,x}, \hat{l}_{j0,y})^T - \frac{\delta}{D_j} \quad (18)$$

と書き下せる。

式(16), (18)を近接点光源条件における反射方程式(8)

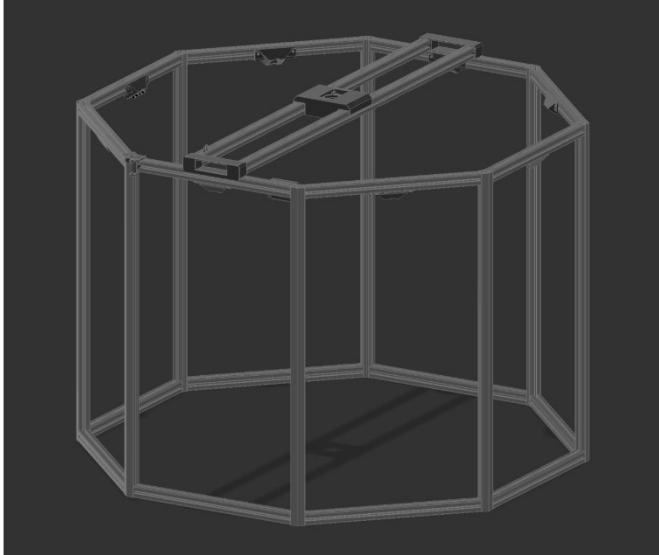


図-5 測定装置の概観(遮光暗幕除く)
Fig.5 Overview of the measurement rig

に代入して各項整理し、高次項を棄却することで、 $\delta(\mathbf{x})$ に関する近似された反射方程式

$$I_j(\mathbf{x}) \approx \frac{\rho_0 l_0^{(j)}}{D_j^2} \left(\hat{l}_{j0,z} + \frac{2\hat{l}_{j0,z}^2 - \hat{l}_{j0,z}}{D_j} \delta + (\hat{l}_{j0,z}(\hat{l}_{j0,x}, \hat{l}_{j0,y})^T, \nabla \delta) \right) \quad (19)$$

を得る。この近似された反射方程式は $\delta, \nabla \delta$ に対する線形橍円方程式の形式となっており、有限差分法の手続きによって、疎行列からなる最小二乗問題に帰着させることができ⁸⁾、式(8)の ρ, X, \mathbf{l} に対する大規模な非線形交互最適化を回避できる。このようにコンクリートの表面形状という設定から得られる自然な仮定を元に数理モデル化を行うことで、近接点光源 PS による精密三次元再構成を CPU のみでも現実的な計算時間のうちにを行うことができる。

3. 測定ハードウェアの開発

2章で述べたように測定対象の物体がほとんど平面で、均質なアルベドを持つ Lambertian 物体であることを仮定すれば、近接点光源条件においても高速に PS 法による表面形状の復元を行えることを示した。このような理論のもと、実作業所のような直射日光が存在する屋外昼光下において、近接点光源 PS の条件を満たすような BPL 下部コンクリートの画像を取得する測定装置を開発した。

測定装置は図 5, 6 に示すような近接点光源 PS の条件を模擬するための、固定のカメラ座標と複数の既知点

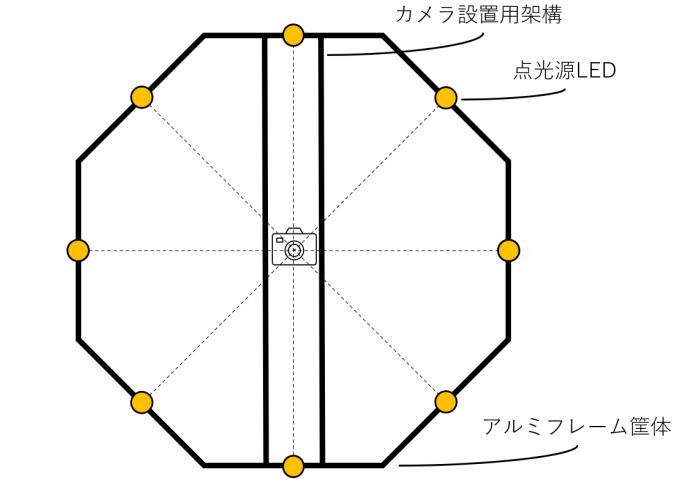


図-6 測定装置の上部俯瞰図と LED 配置
Fig.6 Top view of the rig showing LED positions

光源とを配置する 8 角柱形状のフレームと、PC によりその点灯パターンとシャッタータイミングを制御する制御装置からなる。治具の外観を図 X, Y に示す。屋外昼光下において、撮像対象となるコンクリート表面に既知点光源から放射された光以外が入射しないよう、装置外殻には暗幕からなる遮光機構を備えた。

光源には点光源に近い放射特性を持つ白色 LED として、Optsuply 社の OSW4XNE3C1S を用い、発光基板を制作した。発光基板には後述するカメラの露出キャリブレーションのために PWM 調光回路を備え、また配線における電圧降下を防ぐために小型の DCDC コンバータを各基板上に配置した。各発光基板はデイジーチェーンによって接続され、MCU (RP2040)を備えた制御回路から選択信号と、調光のための PWM 信号を受け取り点灯制御される。

カメラには安価な一般流通品でありつつ、十分な解像度・光学特性を備え、PC から露出やシャッタータイミングが制御可能な製品として、Sony 社製の ZV-1 を用いた。PC と制御基板、PC とカメラをそれぞれ USB ケーブルを通して接続し、制御回路へは USB-Serial 通信を、デジタルカメラへは同社から提供されている Camera Remote SDK⁹⁾によって、露出調整→順次点灯→連続撮影を一貫して行う Python プログラムを開発した。

露出調整の際には、治具内に計 8 個設けられた LED を $duty=1/8$ で同時点灯し、画像上に陰影が生じない状態でシャッター速度・絞りの露出調整を行う。その後、各々の LED を連続点灯させ、光源位置ごとに相異なる $I_k(k = 1 \dots 8)$ を取得し、PS 法を適用する。測定装置を用いた画像 3 次元再構成の流れを図 7 に示す。

上記の設計に則り、1000mm×1000mm の領域を一度

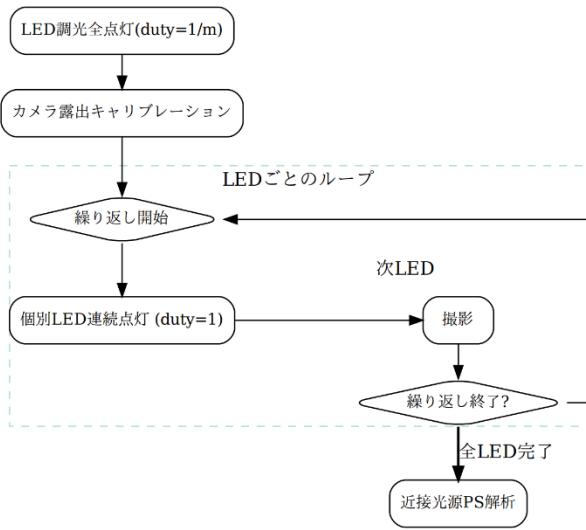


図-7 提案手法によるコンクリートの表面の再構成処理の流れ

Fig.7 Flowchart of the proposed method

に撮影可能なコンクリート表面三次元測定装置の制作を行った。装置の外観を図8に示す。フレームにはアルミフレームを用い、接合部や発光基板・デジタルカメラのマウンタは3Dプリンタを用いて制作した。ZV-1が1型センサを搭載し、広角側24mmの焦点距離を持つことから、1000mm×1000mmの領域を一度に撮影するための治具のスケールは、底面長辺1750mm、高さ1500mmの8角柱形状と決定した。撮影時には撮影面に対する外光の侵入を防ぐため、フレーム全体を暗幕で被覆して撮影を行う。

4. 実験

実験では実BPL試験体での充填率自動算定の検証に先だって、提案した近接点光源PSアルゴリズムと測定装置によってコンクリート表面の三次元形状の精密測定が行えることを検証するため、実験ヤードのコンクリート床スラブ平面の表面形状の測定を行った。床面の画像を図9に示す。

床面は普通コンクリート製で施工時に自然に生じる空隙のほか、実験ヤードとしての経年使用に伴う、凹みや傷など、3次元的な損傷も呈している。特に図9上で赤枠で示した箇所は特に大きな凹み損傷箇所であり、一見すると大きな凹みに見えるが、実際は半透明のパテで補修されている。

2.3節で述べた近接点光源PS法のプログラムはPython 3.13とnumpy 2.2.4, scipy 1.15.2を用いて実装し、WSL上動作するUbuntu 22.04をインストールしたラップトップPC(Intel Core i5 1350P, Mem: 32GB)で実行し



図-8 制作した測定装置

Fig.8 Measurement system for BPL inspection

た。撮像された画像は、1000mm×1000mmの領域に対して、

$$r = \frac{1000}{2560} \approx 0.4 \text{ [mm/px]}$$

の空間分解能を担保すべく、視野中央のROIに対して、画像解像度を一律2560x2560[px]にリサイズして、PS法を適用した。

図9の領域に対する3次元再構成結果の高さマップを図10に示す。このように汚れや補修痕のように、平面画像のみからはその表面形状を判断するのが困難な表面形状に対しても、その陰影の出現の仕方を元に三次元形状を精密に再構成できている。

上記の設定下で再構成処理に要した時間は312秒であった。同条件での計算時間は平均しておよそ5分、プログラムが最大で占有したメモリはおよそ5GBであり、提案手法によって一般的なPCにおいても現実的な計算リソースによっても、サブミリ精度の三次元再構成を行えることを示した。

5. おわりに

本稿では、免震BPL下部コンクリートの充填率検査の自動化に向けた、コンクリートの表面形状の精密三次元測定装置の実現方法について述べた。平面画像からの三次元再構成手法であるPS法の理論に基づき、計測対象面に対して人工的に配した近接点光源条件においても、現実的な計算量で三次元再構成が行えるよう、

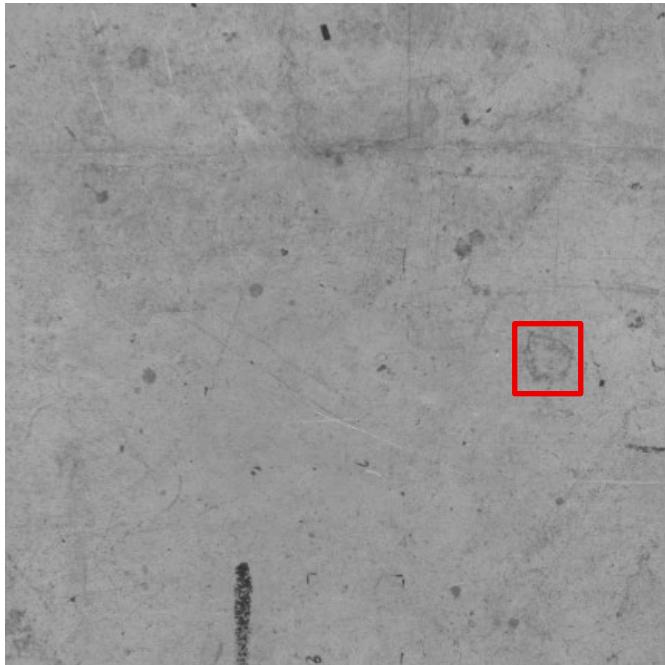


図-9 測定対象のコンクリート床面
Fig.9 Target concrete slab in the test yard

コンクリート表面の三次元測定という設定から得られる仮定を導入し、モデルの単純化と効率的な数値解法を開発した。また、屋外日光下においても、このような近接点光源 PS に必要な画像を簡便に取得可能な測定装置を開発した。実験ではコンクリートスラブ表面の三次元再構成を行い、平面画像のみでは推定が困難な表面形状を簡易な操作によって、精密に測定できることを示した。

今後、作業所での実利用を推進すべく、本稿で述べた 3 次元測定アルゴリズムで得られた表面形状の 3 次元モデルと法線ベクトル場から、空隙の位置と形状を自動で検出・評価し、実 BPL 試験体からの空隙率自動算定を行うシステムとしての改良を進める。

謝辞

本研究の遂行にあたり、測定装置の制作においてご協力を賜りました、ヨツハック 末田卓巳氏に心より御礼申し上げます。

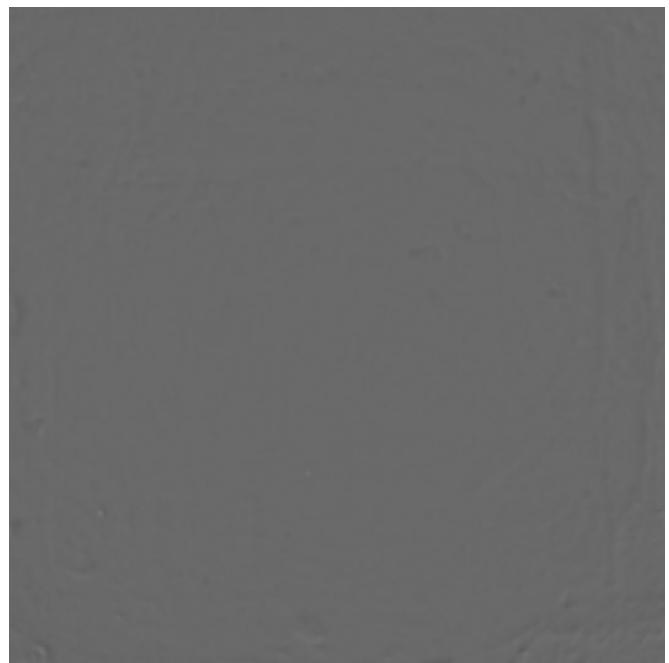


図-10 提案手法による表面形状再構成結果深度マップ
(凹部→黒、凸部→白)
Fig.10 Depth map reconstructed by the proposed method
(dark = concave, bright = convex)

参考文献

- 1) 日本免震構造協会（編），“JSSI 免震構造施工基準”，経済調査会, 2021
- 2) 中林拓馬・和田后司・内海良和, "AI による免震基礎コンクリートの空隙自動検出手法", 大林組技術研究所報, 2019.
- 3) 三谷和裕・加藤優輝, "AI を用いた免震下部基礎コンクリートの充填率の計測に関する検討", 2021 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.775-776, 2021.
- 4) Woodham, R.J.. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. Optical Engineering 19, I, 139-144, 1980.
- 5) B. K. P. Horn. Obtaining shape from shading information., Shape from Shading, 121–171. MIT Press, , 1989.
- 6) Oren, M. • Nayar, S. K. : Generalization of Lambert's Reflectance Model, Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '94), pp.239-246, 1994
- 7) Lichy, Daniel, Soumyadip Sengupta, and David W. Jacobs. "Fast light-weight near-field photometric stereo." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022.
- 8) LeVeque, Randall J. *Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: steady-state and time-dependent problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- 9) [Camera Remote SDK | Camera Remote Toolkit | SONY](#)