第２０１４-０１号

写真画像から形状復元した3次元点群データによる構造物の変状把握

広島大学大学院　工学研究院
准教授　一井　康二

平成２７年１１月

（一財）日本建設情報総合センター研究助成事業

写真画像から形状復元した
3次元点群データによる構造物の変状把握
報告書

平成２７年８月

助成研究者紹介

いちい　こうじ
一井　康二
現職：広島大学大学院工学研究院准教授・博士（工学）
主な著書：防災絵本　’What’s Derolin－A story of earthquake and tsunami－‘（ウェイツ刊，2005年），地震なんかに負けない！幼稚園・保育園・家庭　防災ハンドブック（学習研究社，2006年）（分担執筆），港湾構造物設計事例集（改訂版）（財団法人沿岸開発技術研究センター刊，2007年）（分担執筆）

共同研究者紹介

たまき　とおる
玉木　徹
現職：広島大学大学院工学研究院准教授・博士（工学）

ふじい　たかし
藤井　堅
現職：広島大学大学院工学研究院教授・博士（工学）

目次

１．研究目的と研究手順..... 1

２．３次元形状復元の原理と方法 2

３．形状復元の精度評価と撮影方法の検討（アンカー壁面の事例）..... 9

４．形状復元の精度評価（道路路面の事例）..... 29

５．撮影マニュアルの検討..... 33

６．形状復元結果を用いた残存耐力評価..... 54

７．まとめ 62

参考文献 63

付録Ａ：本研究で使用したソフトウエアの使い方 64

付録Ｂ：３次元形状復元のための構造物撮影マニュアル（案）..... 74

英文サマリー 82

１．研究目的と研究手順

現場写真を画像解析すると，3次元点群データとして構造物の形状把握を行うことが近年では可能となってきた．これは，一般のデジタルカメラ撮影を用いて，撮影位置を特定しないスナップ写真でも実施可能である．しかし，構造物によって変状の着目点が異なるため，適切な画像の撮影条件（撮影枚数や撮影角度）は異なる．この点が，実務においてこれらの画像解析技術が普及しない理由の一つであると考えられる．

そこで，本研究では，各種の構造物に対し，適切な撮影条件を検討し，維持管理のための変状把握手法の体系化を行う．

本研究では，各種構造物として以下の構造物を対象とする。

・水平面に近い構造物：道路路面
・鉛直壁面に近い構造物：
　盛土や切土等の法面，岸壁，石積み擁壁
・腐食劣化する構造物：橋梁躯体，欄干

そして，撮影方法の検討として，天候や撮影距離の条件が異なる画像を用いて，形状復元を試みる．さらに，成功例を形状把握精度の指標とともに例示し，マニュアルとする．

精度の検討においては，模型実験によって直接測定した変形量と解析で得られた変形量の比較を行う．さらに，形状把握結果を用いた強度解析等の可能性なども検討し，成功例を例示する．

２．３次元形状復元の原理と方法

一般に3次元形状復元は3段階の作業からなる．まず第1段階は，画像内の特徴点の検出である．**図-2.1**に特徴点検出の概要を示す．**図-2.1**に示すように，特徴点とは画像中のエッジやコーナーに与えられるものである．複数の画像で同一と認識できた点について，その3次元位置が得られると形状の認識ができる．特徴点とはこの様に，同一点として対応付けるための何らかの特徴を持つ点である．特徴点を手動で与えると，復元は容易であり，既にいくつかのソフトが市販されている[1),2)]．しかし，手動で特徴点を与える作業は大変である．これに対し，自動で特徴点を検出する方法としてSIFTが提案されている[3)]．SIFTは画像中の輝度変化を基に特徴点を検出し，特徴点周辺の輝度勾配と輝度方向により特徴量を算出するアルゴリズムである．

本研究では，このSIFT特徴量を用いた特徴点検出に基づく方法を採用し，既存のプログラムを利用する．実務において画像解析技術が普及しない理由の一つは，プログラムが存在しないことや高価であることよりも，対象とする構造物によって変状等の着目点が異なるため，適切な画像の撮影条件（撮影枚数や撮影角度）が異なり，期待できる復元精度の目安が存在しないことによると考えられるからである．つまり，既存のプログラムの能力にも優劣は存在すると思われるが，比較的一般的で利用しやすい方法を用いた場合の精度評価，および撮影方法の標準化を本研究は目的としており，この観点ではプログラムの新規開発は必要ないと判断した．

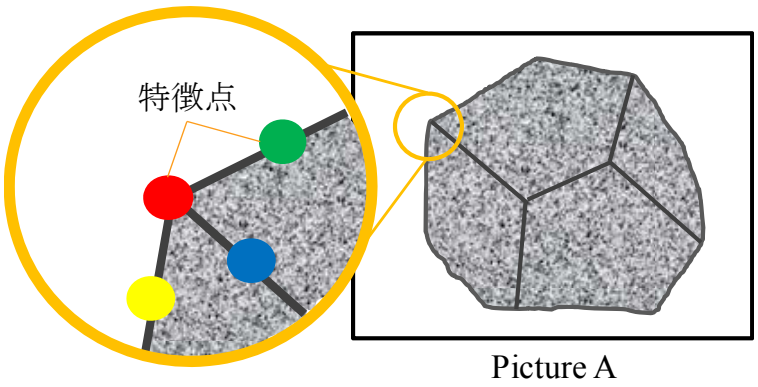


図-2.1　特徴点検出の概要[4)]

次の段階は，特徴点の対応付けである．**図-2.2**に特徴点の対応付けの概要を示す．対応付けとは，検出した特徴点が他の画像ではどこにあるかを探すことである．手動で特徴点を与える場合，人間の判断で対応付けを行うが，その作業は極めて大変である．これに対しSIFTを用いる方法では，特徴量の類似性を用いて，自動で対応付けを行うことができる．

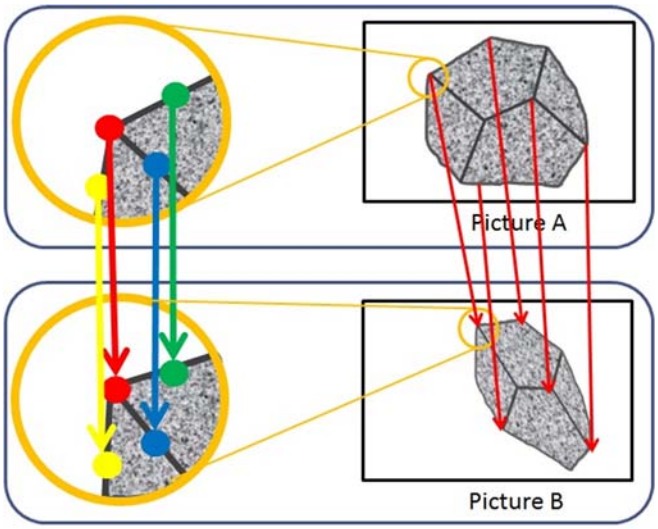


図-2.2　特徴点の対応付けの概要[4)]

そして最後の段階は，対応付けられた特徴点の座標値を用いた3次元形状復元である．**図-2.3**に3次元形状復元の概要を示す．三角測量の原理を用いて，カメラから特徴点へ直線を引き，対応する特徴点を通る2本の直線の交点が復元した3次元点となる．検出した特徴点ごとにこの作業を行うことにより，3次元形状復元を行うことができる．なお，カメラの3次元位置は特徴点の対応関係から逆解析で得ることができる．

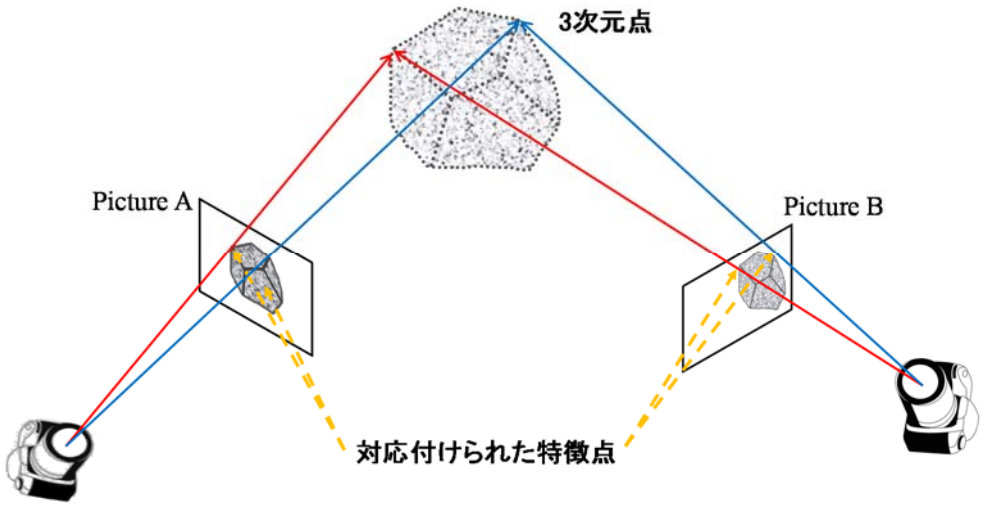


図-2.3　3次元形状復元の概要[4)]

SIFTによる画像解析は，土木分野での適用事例が極めて少ない．そのため，現在SIFTによる画像解析の土木分野への適用に向けて，各種の研究がなされている．以下に，そのいくつかを例示する．

(1) 消波ブロックの安定性評価手法に関する検討

一井・玉木[5]は，SIFTを用いた画像解析を用いてブロックの形状・配置を手軽に把握する手法を検討している．そして，消波ブロック，特にテトラポッドを対象に，画像解析によって個々のブロックの配置を評価する手法，及びその結果を用いて安定性を評価する手法を提案している．

この検討においては，まず，現場でテトラポッドを撮影した写真を用いた3次元形状復元が可能であることが確認されている．**写真-2.4**に復元に用いた画像の一例，**図-2.5**に3次元形状復元結果をそれぞれ示す．そして，その後の検討においては，モルタル製のテトラポッド模型を用いた模型実験が行われている．**写真-2.6**に，モルタル製のテトラポッド模型の3次元形状復元に用いられた写真の例，**図-2.7**に3次元形状復元結果をそれぞれ示す．

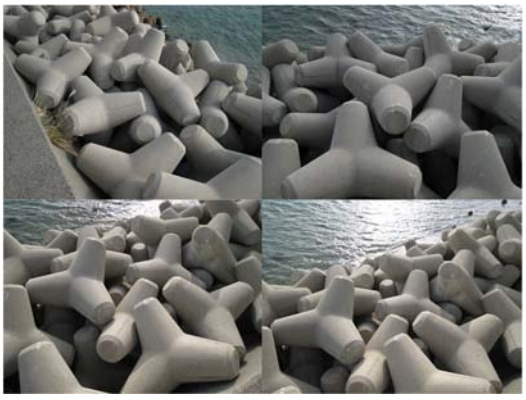


写真-2.4　3次元形状復元に用いた現地のデジタルカメラ画像の例[5]

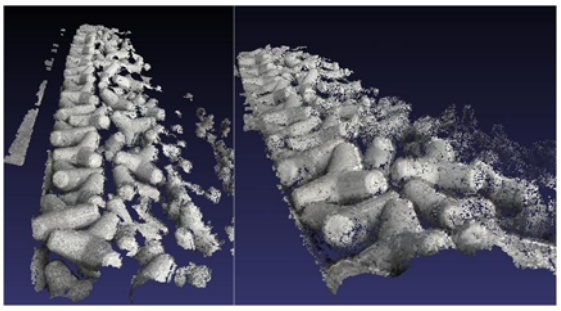


図-2.5　消波ブロックの3次元形状復元結果の例[5]

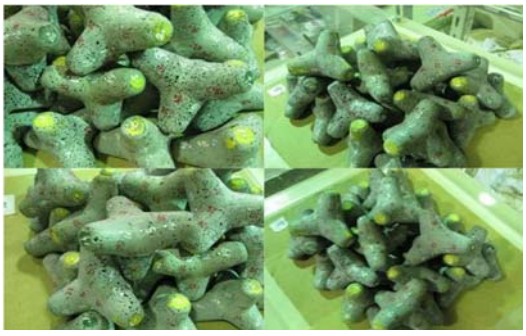


写真-2.6　3次元形状復元に用いたデジタルカメラ画像の例[5]

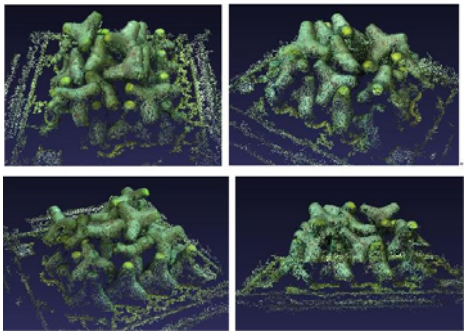


図-2.7　モルタル製消波ブロック模型の3次元形状復元結果の例[5]

3次元形状復元の結果からは，テトラポッド頂点部とその中心座標値の検出法が提案されている．具体的には，テトラポッド頂点部の形状特性が「平坦で円形」であることに着目し，それぞれの点を頂点であると順に仮定して，形状に応じて存在するはずの頂点付近の形状復元点の検索を行い，検索した範囲にある程度の点の存在が確認された時，最初の点の位置を頂点部と判断している．

図-2.8に模型実験結果において目視で頂点部を抽出したもの，**図-2.9**に自動化したプログラムで頂点部を抽出した結果を示す．いくつか抽出できなかったものや，誤抽出されたものが存在するが，それなりの精度で抽出できていると解釈されている．

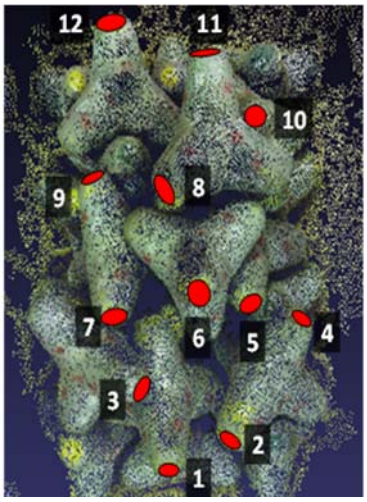


図-2.8　目視による
頂点部抽出結果[5)]

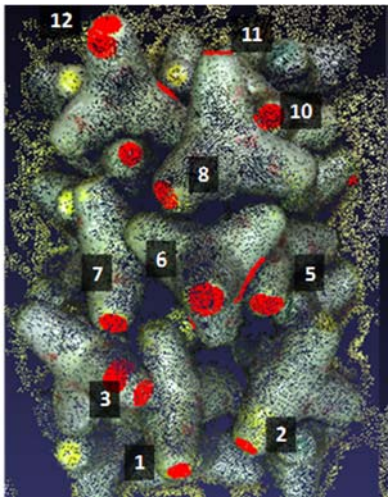


図-2.9　提案方法による
自動抽出結果[5)]

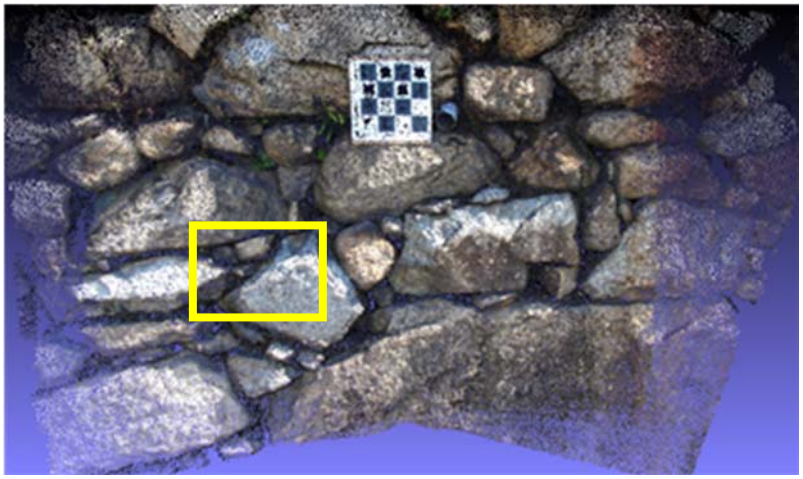
(2) 石積み擁壁の維持管理手法への適用性検討

角田ら[6)]は，石積み擁壁の維持管理に対してSIFTを用いた画像解析の適用性を検討している．

この検討では，まず，現場で石積み擁壁を撮影し，得られた壁体の画像群を用いて3次元形状復元が可能であることを確認している．同時に，石積み擁壁内の石を移動させ，石の移動前後の撮影画像から変位検出が可能であることも確認されている．**写真-2.10**に石積み擁壁の画像の一例，**図-2.11**に3次元形状復元結果，**図-2.12**に変位検出結果を示す．**図-2.12**では，1.0cm以上変位したと検出された部分が赤く表示される．黄色の枠内以外の赤くなっている部分は，移動後の状態においては復元されなかった部分であるため，誤検出ではなく，復元範囲の設定の問題である．

このように，野外撮影したデジタルカメラ画像により，石積み擁壁の形状変化が検出できることが確認された．

写真-2.10　石積み擁壁の画像の一例[6)]



(a)　移動前

(b)　移動後

図-2.11　石積み擁壁の3次元形状結果[6)]

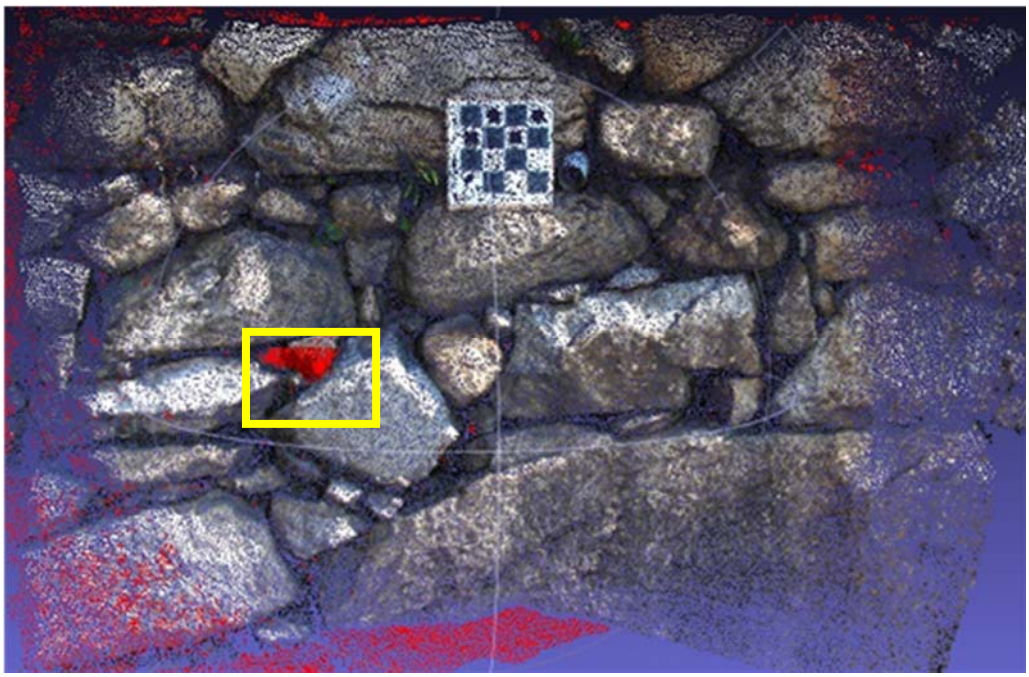


図-2.12　変位検出結果[6)]

(3) 復元スケールの定量把握

ここで示した3次元形状復元手法では，復元形状だけでなく，撮影位置も同時に得られる．しかし，得られた復元形状および撮影位置は無次元の座標値で表される点群であり，実スケールとの対応が分からない．従って，得られた復元形状のままでは形状を定量的に把握するのは不可能である．そこで，角田ら[7)]は**図-2.12**に示すようなスケーラーと逆解析で求まるカメラ間距離を用いた定量把握手法を提案している．

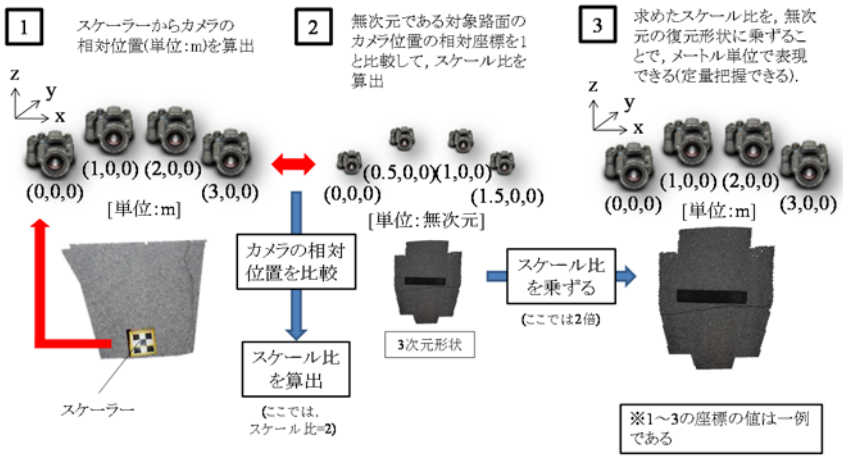


図-2.12　スケーラーを用いたカメラ間の相対位置の把握[7)]

まず，カメラ間の相対位置(基準となるカメラ位置を原点としたときの他のカメラ位置の座標)の把握を行う．カメラ間の相対位置は実測によって把握できるが，実測には多くの労力を要する．そこで，スケーラーを撮影し，スケーラーの形状復元を行うことで実スケールにおけるカメラの相対位置の把握を行っている．カメラ間の相対位置が一定になるようにカメラを固定しておくと，実スケールであるメートル単位系で表されたカメラ位置の相対座標(**図-2.12**中の1)と形状復元で得られる無次元で表されたカメラ位置の相対座標(**図-2.12**中の2)とを比較することで，対象とする復元形状の実スケールとの比n(A/B)を算出することができる．求めたスケール比nを対象とする復元形状を構成する3次元点の座標に乗ずることにより，復元形状をメートル単位系で表現できる．

上記で紹介した事例および本研究で使用したソフトは，Bundler[8]とPMVS2[9]である．3次元点群の可視化にはMeshLab[10]を用いている．**図-2.13**に3次元形状復元におけるデータ処理の流れを示す． Bundler[8]は入力情報として対象物を写した3枚以上の画像を用い，SIFTを用いて各画像で特徴点を検出する．そして，各画像間で特徴点の比較を行い，特徴点情報の一致を基に撮影位置の3次元位置情報と対象物の3次元形状情報を出力する．得られる3次元点群はSIFT特徴量で対応がとれた点のみのため，通常，対象物全体に対して密に得られることはなく，疎な点群として得られる．そこでさらに，PMVS2[9]を用いて対象物の密な3次元形状復元を行う．その際には，Bundler[8]で出力されたカメラの3次元位置情報と画像をそれぞれ入力情報として用いる．

実際のソフトの使い方は本報告書の末尾に参考として記す．

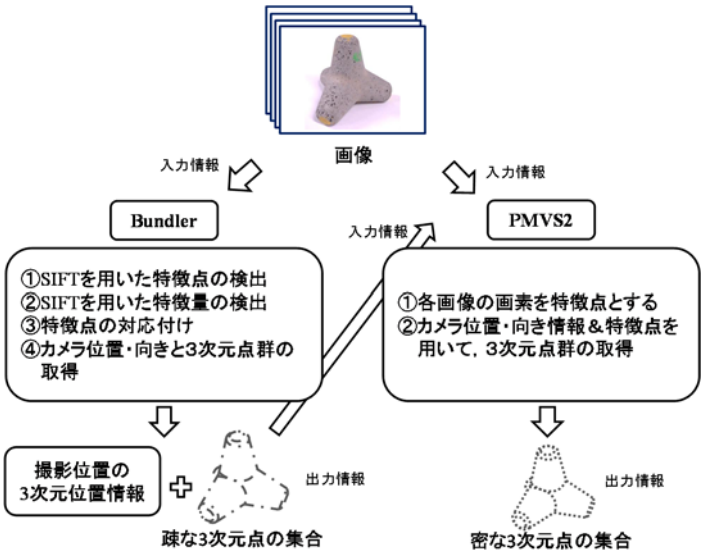


図-2.13　3次元形状復元におけるデータ処理の流れ[5]

３．形状復元の精度評価と撮影方法の検討（アンカー壁面の事例）

（１）アンカー壁面を対象とした模型実験と現地計測による精度検討

まず，アンカー壁面を対象とした検討事例により，検討法の概要と，検討結果の例を示す．アンカー壁面に関しては，広島大学内の池ノ上学生宿舎で模型実験を行った．**図-3.1**に実験場所を示す．

図-3.1　実験場所

撮影に用いたカメラはNikon COOLPIX P7700である．アンカーは，アンカーヘッドの模型として，**図-3.2**に示すコンクリート平板の上に**図3.3**に示す台形型束石を乗せて作成した．

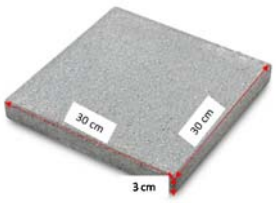


図-3.2　コンクリート平板

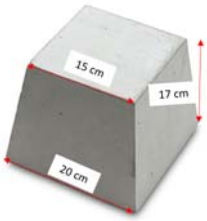


図-3.3　台形型束石

変状は模型に木板を挟むことで浮きを与えた．浮き量は1.5cm，3cm，4.5cmの3ケースとし，束石の下と平板の下に入れ6ケースとした．また，浮きを与えないケースを含め，計7ケースで撮影を行った．**図-3.4**に浮きを与えたアンカーヘッドの模型のイメージを示す．

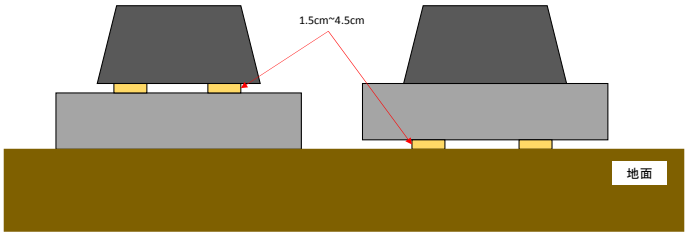


図-3.4　浮きを与えたアンカーヘッドの模型のイメージ

3つのアンカーヘッドの模型を1.5m間隔で水平に設置した．撮影位置の把握のため，フィールドを50cm四方のメッシュで区切り，メッシュの交点から撮影を行うことにした．**図-3.5**に計測フィールドの撮影位置のイメージを示す．カメラは高さを85cmで固定し，斜面下側から撮影を行った．ただし，カメラの角度はアンカーヘッド模型が写るように手動で調整している．カメラの設置状況イメージを**図-3.6**に示す．

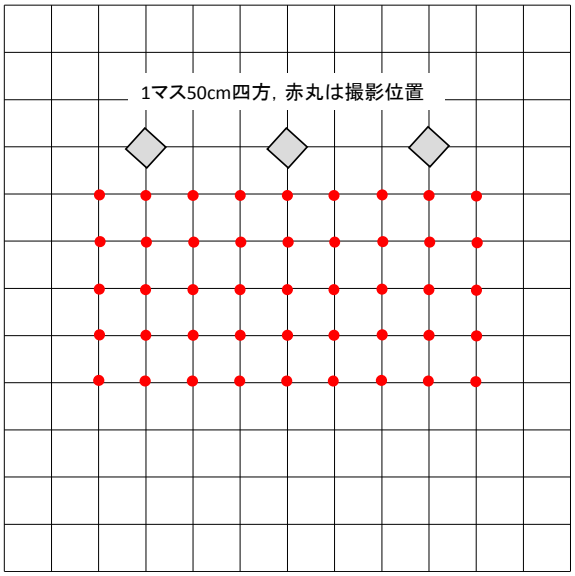


図-3.5　計測フィールドの撮影位置イメージ

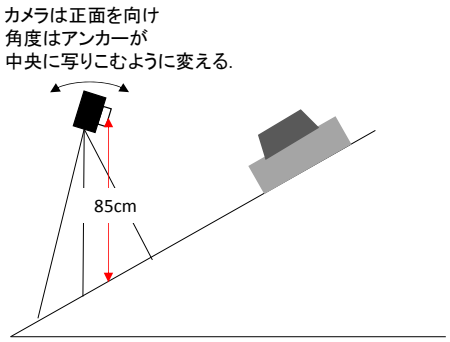


図-3.6　カメラの設置状況のイメージ

最初に復元精度が確保できる撮影方法について検討した．撮影枚数は45枚として，まず浮きを与えていないケースに着目し，形状復元に用いる画像の枚数を変えながら復元を行い，それぞれの精度を評価した．**写真-3.1**に計測フィールド，**写真-3.2**に撮影画像を示す．

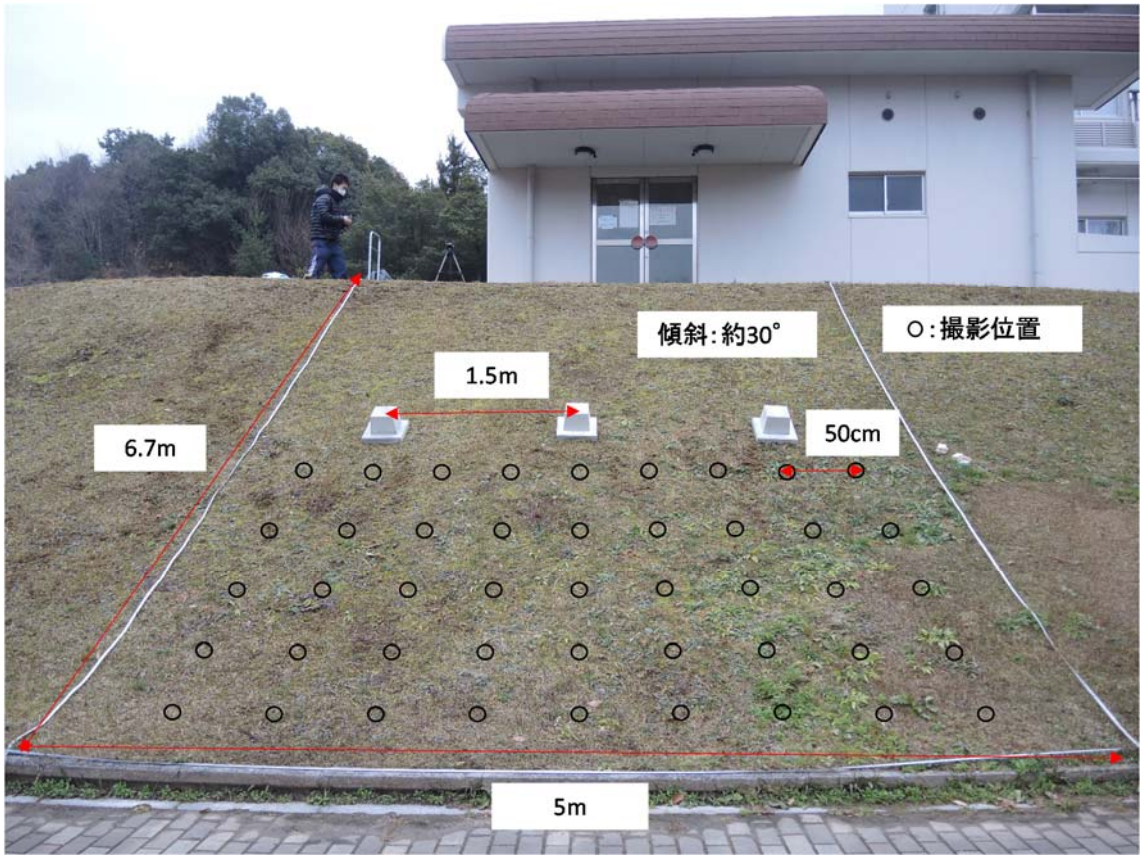


写真-3.1　計測フィールド

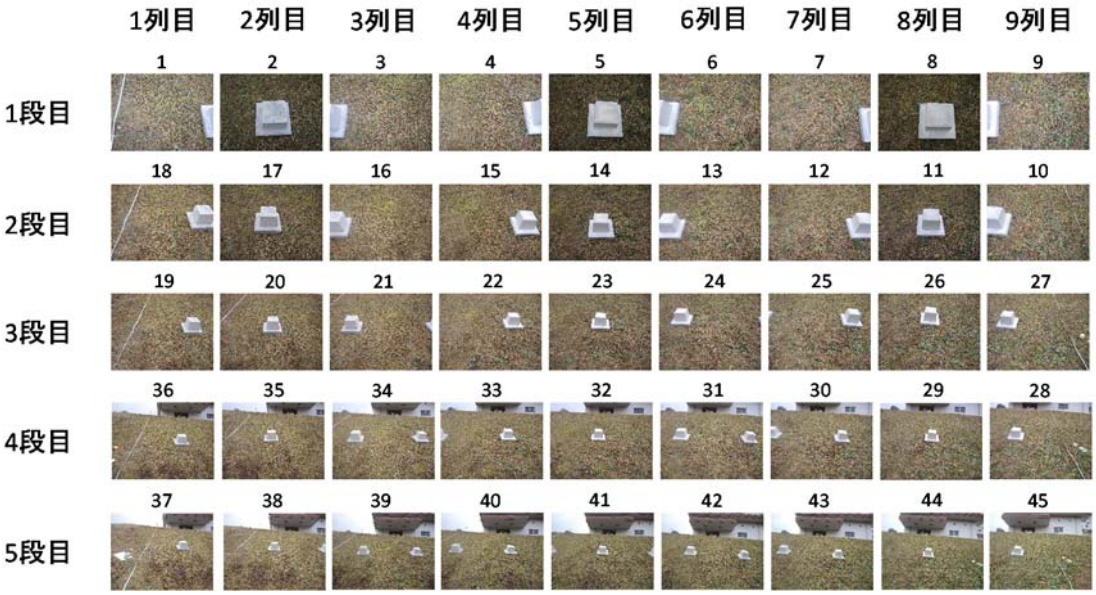


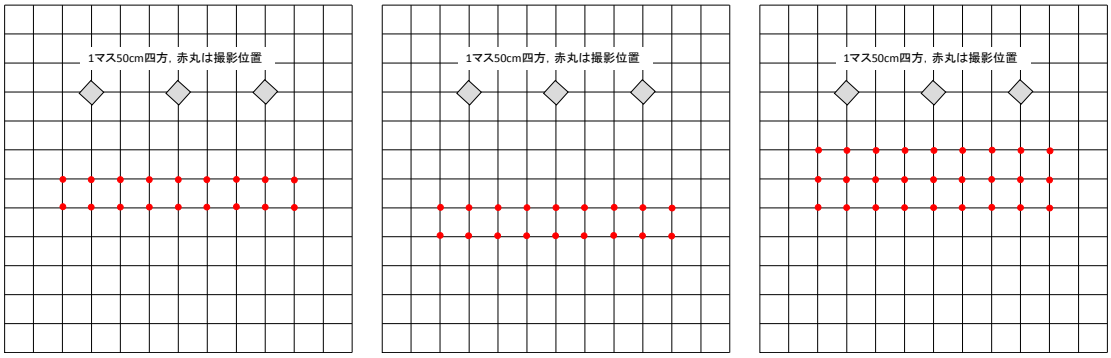
写真-3.2　撮影画像

45枚の画像から，復元に使う画像を変えながら計29パターンの復元を行った．**表-3.1**に復元を試みた画像選択パターンの一覧を示す．復元形状については，左端のアンカーヘッド模型のコンクリート平板の辺長をもとにスケール合わせを行い，右端のアンカーヘッド模型のコンクリート平板の辺長を実際の値と比較して誤差を算定した

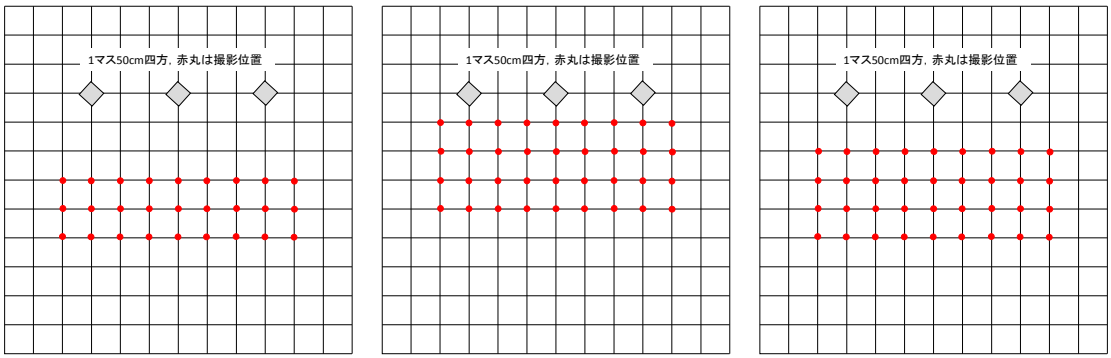
表-3.1　復元を試みた画像選択パターン

	段	列	枚数	復元	誤差(%)
パターン1	1	全列	9	×	−
パターン2	2	全列	9	×	−
パターン3	3	全列	9	×	−
パターン4	4	全列	9	×	−
パターン5	5	全列	9	×	−
パターン6	1,2	全列	18	×	−
パターン7	2,3	全列	18	×	−
パターン8	3,4	全列	18	○	0.15
パターン9	4,5	全列	18	○	2.10
パターン10	2,4	全列	18	×	−
パターン11	1,2,3	全列	27	×	−
パターン12	2,3,4	全列	27	○	0.38
パターン13	3,4,5	全列	27	○	2.38
パターン14	1,3,5	全列	27	×	−
パターン15	1,2,3,4	全列	36	○	0.35
パターン16	2,3,4,5	全列	36	○	0.40
パターン17	全段	全列	45	○	0.82
パターン18	1,2	2,5,8	6	×	−
パターン19	2,3	2,5,8	6	×	−
パターン20	3,4	2,5,8	6	×	−
パターン21	4,5	2,5,8	6	×	−
パターン22	2,4	2,5,8	6	×	−
パターン23	1,2,3	2,5,8	9	×	−
パターン24	2,3,4	2,5,8	9	×	−
パターン25	3,4,5	2,5,8	9	○	26.05
パターン26	1,3,5	2,5,8	9	×	−
パターン27	1,2,3,4	2,5,8	12	×	−
パターン28	2,3,4,5	2,5,8	12	×	−
パターン29	全段	2,5,8	15	○	14.90

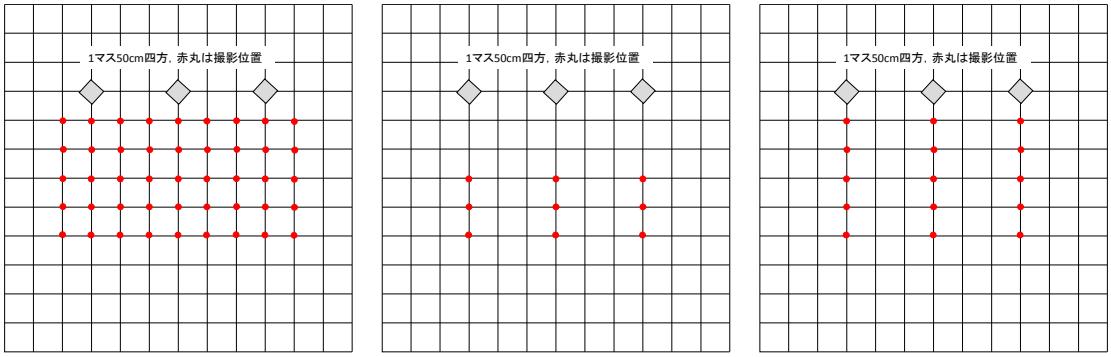
3次元形状復元が可能であったのは29パターンのうち9パターンであった．**図-3.7**に復元に成功したパターンの撮影位置を示す．



パターン8　　パターン9　　パターン12



パターン13　　パターン15　　パターン16



パターン17　　パターン25　　パターン29

図-3.7　復元に成功したパターンの撮影位置

段に着目すると，一段のみの画像では復元が困難であり3,4段および4,5段からの画像が復元成功例には使われている．つまり，今回のスケールでは，アンカーから1.5m~2.5m離れた位置からの撮影が必須である．

次に列に着目すると，復元に全列を使用したものが6パターン，2,5,8列を使用したものが2パターン復元可能であった．しかし，2,5,8列のみの画像を使ったものは誤差が非常に大きくなっており，列に関しては全列の画像が必要である．

以上をまとめると，今回のケースで精度よく復元を行うためには，アンカーから

1.5m~2.5m離れた位置から，4mの幅にわたって50cm間隔で撮影を行えばよいことが分かった．最も精度の良かったパターン8の復元形状を**図-3.8**に示す．

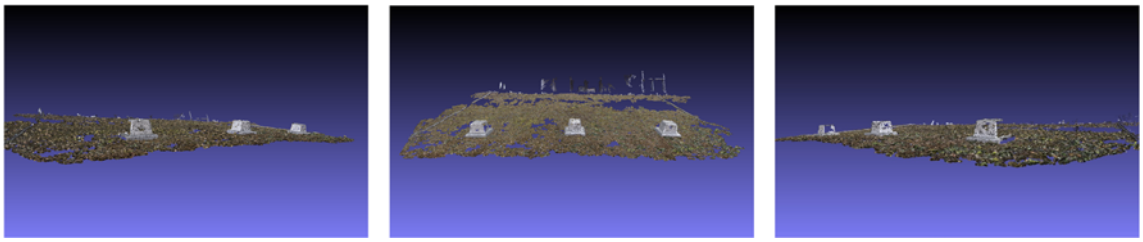


図-3.8　3次元形状に復元されたアンカーヘッドの模型(パターン8)

実験結果を検証するため，実アンカーの壁面でも形状復元を試みた．撮影場所を**図-3.9**，撮影対象のグラウンドアンカーを**写真-3.3**，撮影場所の平面図を**図-3.10**，グラウンドアンカーの受圧板構造図を**図-3.11**に示す．受圧板の主な材質は鉄である．角田ら[5)]によって，鉄にはSIFTの適用性があることが示されている．なお，3段あるグラウンドアンカーのうち，下段の12個のグラウンドアンカーを撮影対象とした．便宜上，12個のグラウンドアンカーを**図-3.12**のように番号付けし，ひとつひとつのグラウンドアンカーの角を斜面上部側から時計回りに(a)~(d)とした．

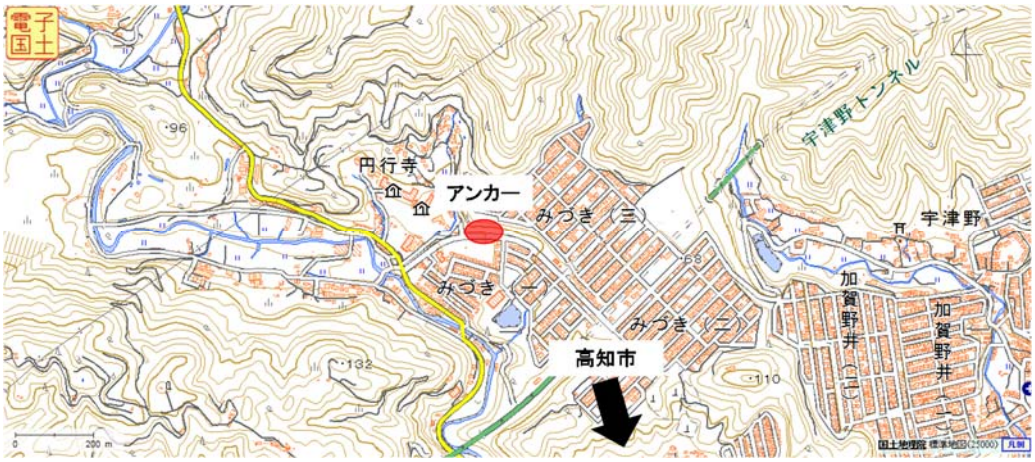


図-3.9　撮影場所

写真-3.3　撮影対象のグラウンドアンカー(中央部)

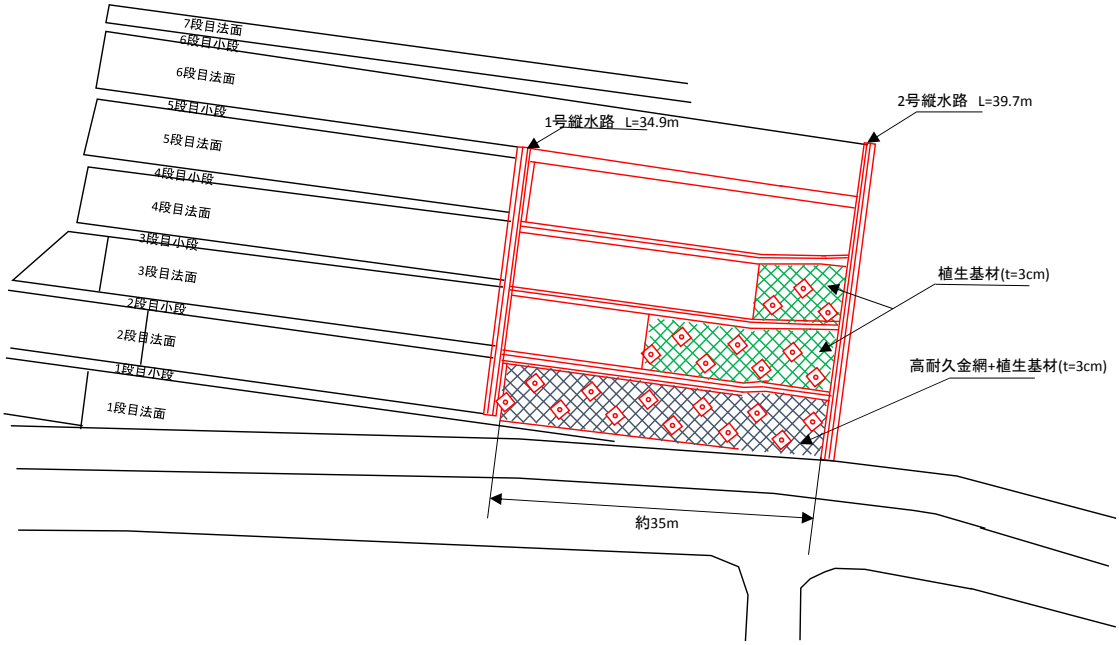


図-3.10　撮影対象の平面図

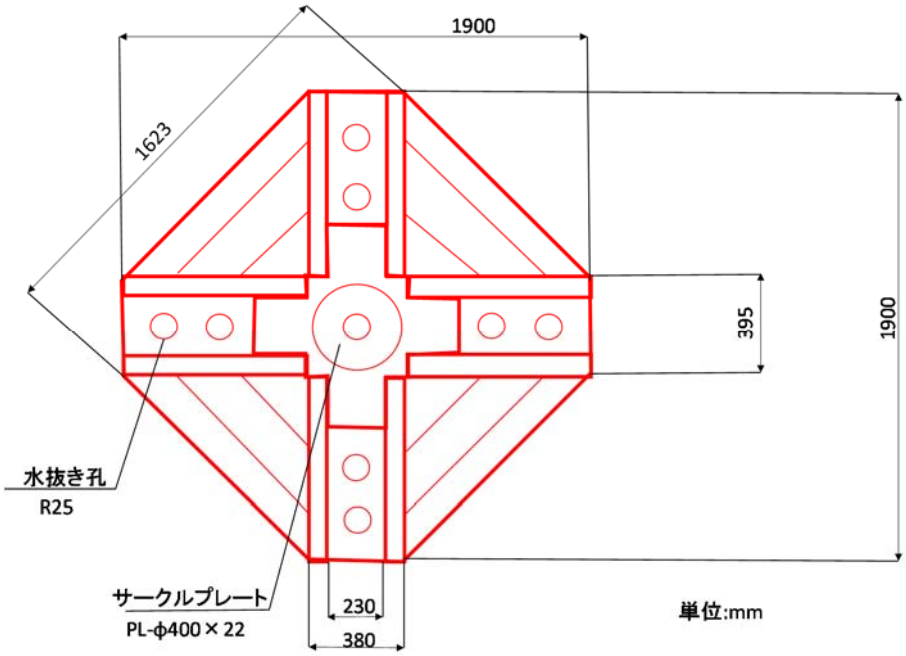


図-3.11　グラウンドアンカーの受圧板(アンカーヘッド)構造図

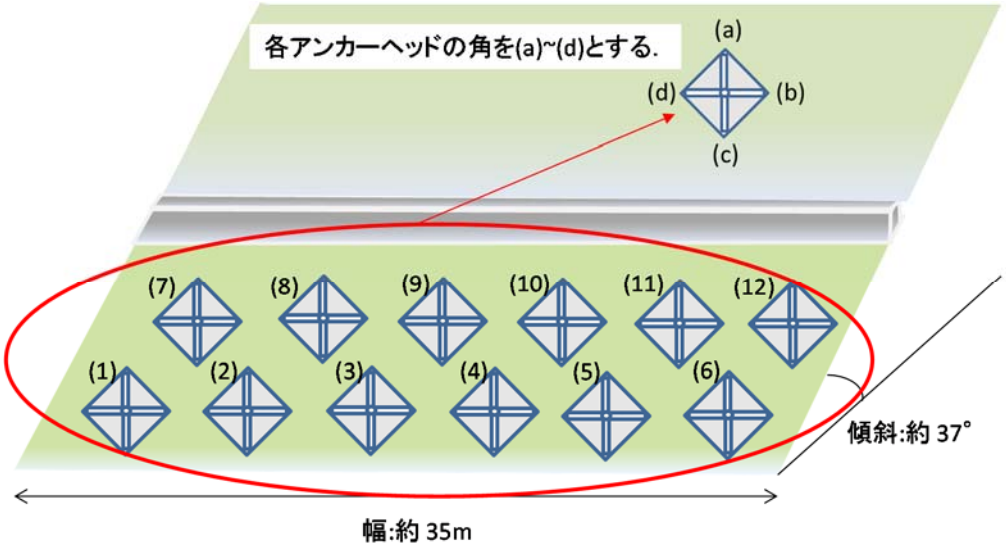


図-3.12　グラウンドアンカーのナンバリング

様々な角度からの撮影を可能にするため，ラジコンヘリを用いてグラウンドアンカーの撮影を行った．ラジコンヘリはDJI Phantom 2，ラジコンヘリに取り付けるカメラはGoPro HERO 3+を使用した．**写真-3.4**にラジコンヘリとカメラを示す．ラジコンヘリを使用して撮影を行う利点として，人が立ち入ることが出来ないような場所でも対象に近づかずに撮影が行えること等も挙げられる．ラジコンヘリを操作しながら静止画を撮影することは困難であるので，アンカーを動画で撮影し，画像をキャプチャして復元を行った．**表-3.2**に

カメラの撮影モードを示す．なお，GoProのレンズは魚眼レンズのため，撮影した動画もその影響を受けてしまう．そこでGoPro専用アプリのGoPro Studio[11]を用いて魚眼レンズによる影響を取り除いた．**写真-3.5**に魚眼レンズの影響の補正前と補正後の画像の例を示す．また，**写真-3.6**に撮影風景を示す．

写真-3.4　使用したラジコンヘリとカメラ

表-3.2　撮影モード

カメラ: GoPro HERO 3+		
解像度	フレームレート	視野角
1920×1080	60fps	ナロー

補正前の画像の例

補正後の画像の例

写真-3.5　魚眼レンズの影響の補正前と補正後の画像

写真-3.6　撮影風景

ラジコンヘリから撮影した動画から36枚の画像をキャプチャした．ラジコンヘリからの画像だけでは撮影位置間の距離が分からないためスケール比を求めることができない．そこで，復元の際にカメラ間の距離を固定したデジタルカメラで撮影された画像を2枚混ぜてスケール比を得られるようにし，計38枚の画像を用いて復元を行った．**写真**-3.7に復元に用いた38枚の画像，距離を固定したデジタルカメラの詳細を**写真**-3.8と**表**-3.3に示す．距離を固定したデジタルカメラの画像は，**図**-3.13に示す方法により，スケール比に換算され，復元形状を実スケールで把握するのに用いられる．**図**-3.14に38枚の画像による復元形状を示す．草木に覆われた地面も一部復元できている．

写真-3.7　アンカー(3)とアンカー(8)の画像
(*は通常のデジタルカメラによる撮影画像)

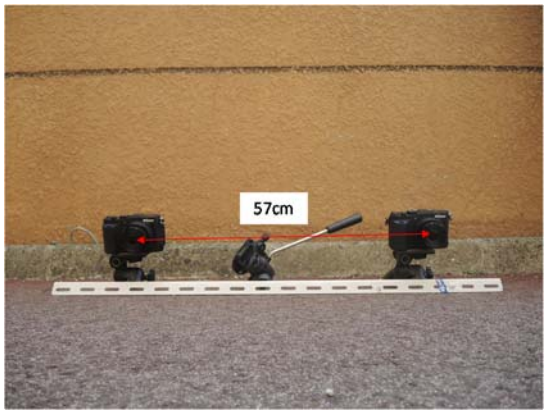


写真-3.8　距離を固定したデジタルカメラ

表-3.3　デジタルカメラの仕様

製品名	COOLPIX P7700
有効画素数	1219万画素
撮影素子	1/1.7型減色CMOS, 総画素数1276万画素
レンズ	光学7.1倍ズーム, NIKKORレンズ
焦点距離	6.0-42.8mm(35mm判換算28-200mm相当)
開放F値	f/2-4
レンズ構成	10群13枚(EDレンズ2枚)
手ぶれ補正機能	レンズシフト方式
オートフォーカス	コントラスト検出方式

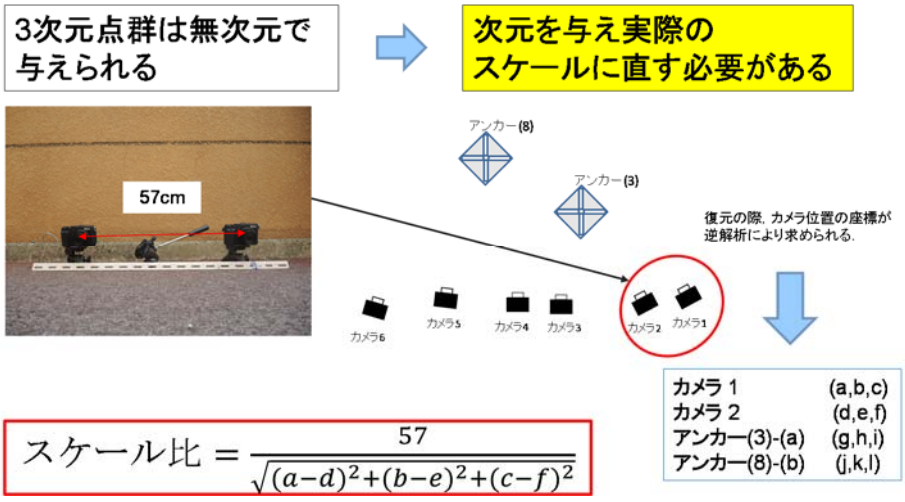


図-3.13　スケール比の求め方

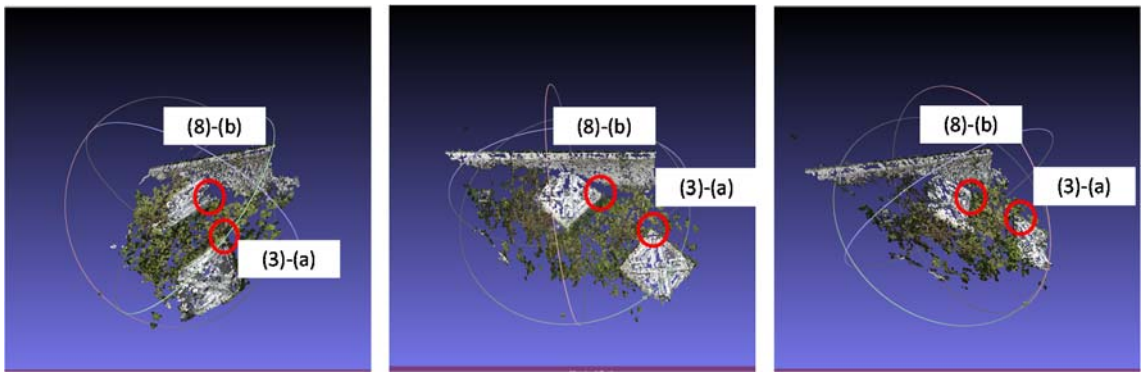


図-3.14　38枚の画像による復元形状

このように，実アンカーにおいても画像解析で形状を復元することができた．撮影条件と精度を評価するため，**図-3.15**に斜面に投影されたアンカーヘッドと撮影位置の座標，**表-3.4**に復元されたアンカーヘッド間の距離を示す．

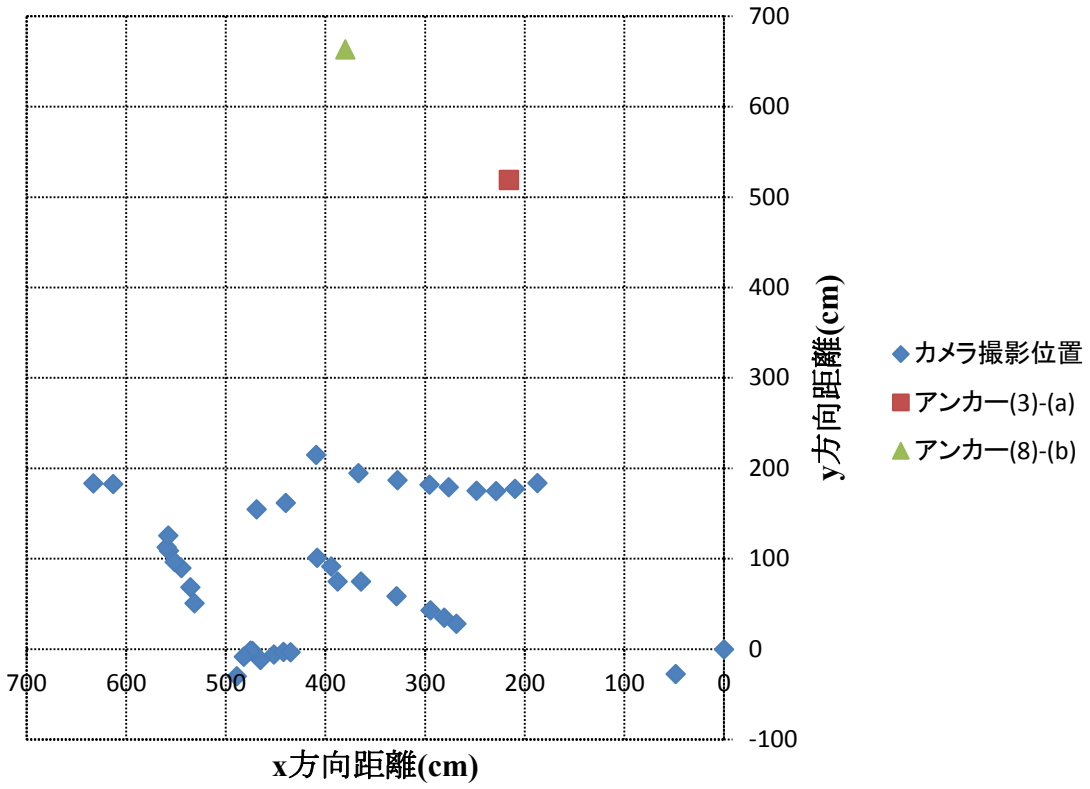


図-3.15　斜面に投影されたアンカーヘッドと撮影位置の座標

表-3.4　復元されたアンカーヘッド間の距離

復元に用いた画像38枚	x	y	z	
カメラ座標範囲	0.0 ～ 633.0	-27.5 ～ 663.3	-196.5 ～ 267.0	
アンカー座標(3)-(a)	215.9	518.9	267.0	
アンカー座標(8)-(b)	380.1	663.3	257.9	(単位：cm)

復元から計算した距離	218.8	cm
実際の距離	214.0	cm
誤差	2.2	%

実際のアンカーヘッド間の距離（メジャーで実測）と復元された距離の誤差は2.2%である．

模型実験の結果と合わせると，測定精度を確保できる撮影条件は，もちろん，カメラの使用によっても変化することが想定されるが一例として，下記のようにまとめられる．つまり，**図-3.16**に示すように，対象となるアンカーヘッド間の距離Lの1倍及び2倍，あるいは2倍及び3倍の距離から，$\frac{1}{3}$L程度の間隔で幅3L程度にわたり撮影すると良いと考えられる．なお，この条件に対応できるカメラの仕様を**表-3.5**に示す．なお，本研究では画素数は4000×3000，撮影はオートモードで行った．

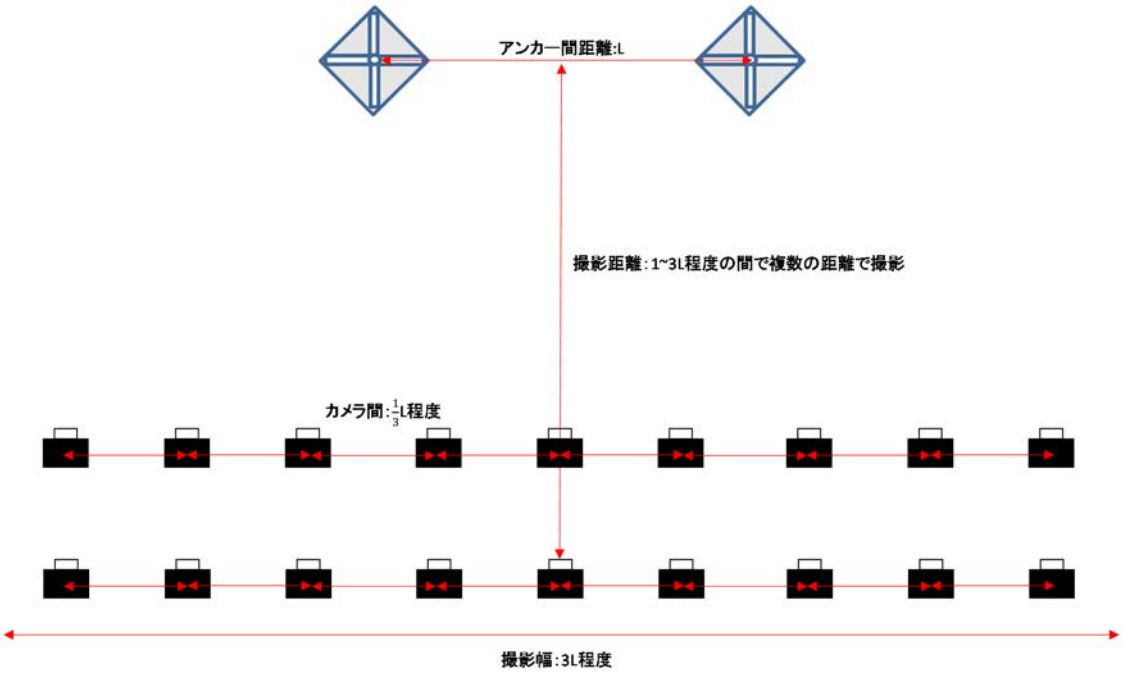


図-3.16　アンカーヘッド２点を対象とする場合の撮影位置

表-3.5　カメラ仕様（製品名を指定するものではない）

製品名	COOLPIX P7700
有効画素数	1219万画素
撮影素子	1/1.7型減色CMOS, 総画素数1276万画素
レンズ	光学7.1倍ズーム, NIKKORレンズ
焦点距離	6.0-42.8mm(35mm判換算28-200mm相当)
開放F値	f/2-4
レンズ構成	10群13枚（EDレンズ2枚）
手ぶれ補正機能	レンズシフト方式
オートフォーカス	コントラスト検出方式

（2）アンカー壁面の形状復元結果による変状把握

変状の例として，アンカーの浮きが画像解析で把握できるかを検討する．

(a)　浮き量1.5cmの場合(束石の下に木板) (case1)

写真-3.9に復元に用いた画像を示し，**図-3.17**に復元形状，**図-3.18**に拡大された浮き部分を示す．

写真-3.9　復元に使われた画像(束石の下に1.5cmの浮き)

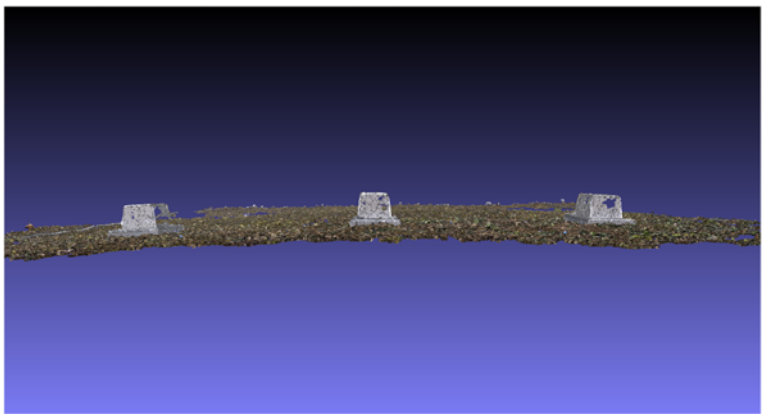


図-3.17　3次元形状に復元されたアンカーの模型(束石の下に1.5cmの浮き)

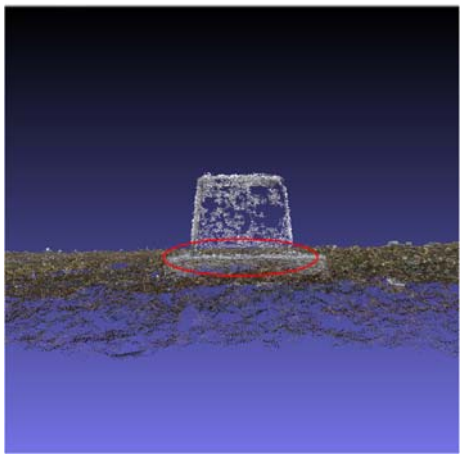


図-3.18　拡大された浮き部分(束石の下に1.5cm)

わずかに浮いていることが目視で確認できる．

(b)　浮き量3cmの場合(束石の下に木板) (case2)

写真-3.10に復元に用いた画像を示し，**図**-3.19に復元形状，**図**-3.20に拡大された浮き部分を示す.

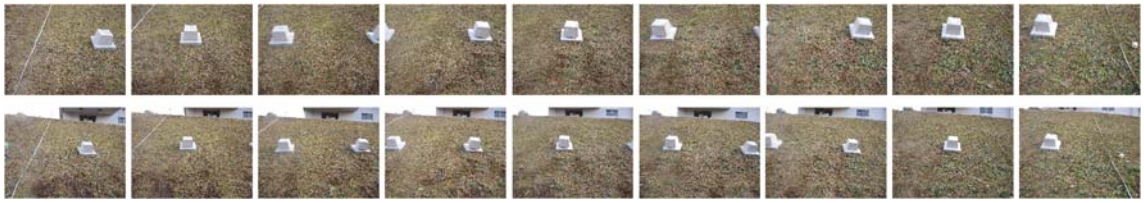


写真-3.10　復元に使われた画像(束石の下に3cmの浮き)

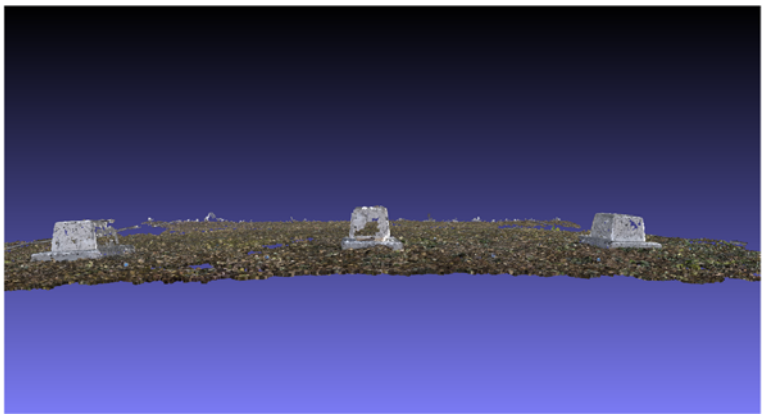


図-3.19　3次元形状に復元されたアンカーの模型(束石の下に3cmの浮き)

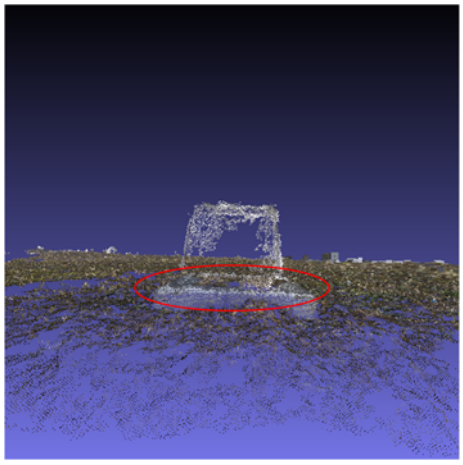


図-3.20　拡大された浮き部分(束石の下に3cm)

case1よりもはっきりと浮きが見てとれる.

(c)　浮き量4.5cmの場合(束石の下に木板) (case3)

写真-3.11に復元に用いた画像を示し，**図**-3.21に復元形状，**図**-3.22に拡大された浮き部分を示す.

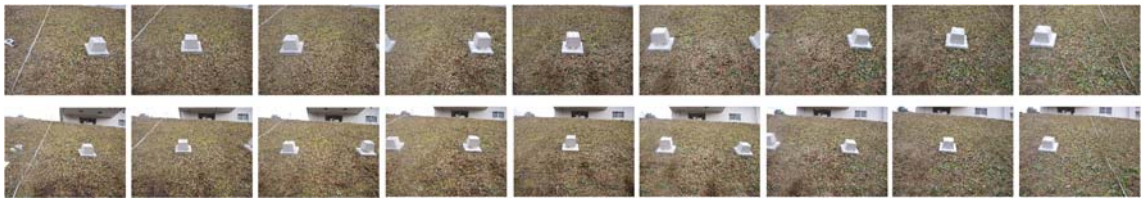


写真-3.11　復元に使われた画像(束石の下に4.5cmの浮き)

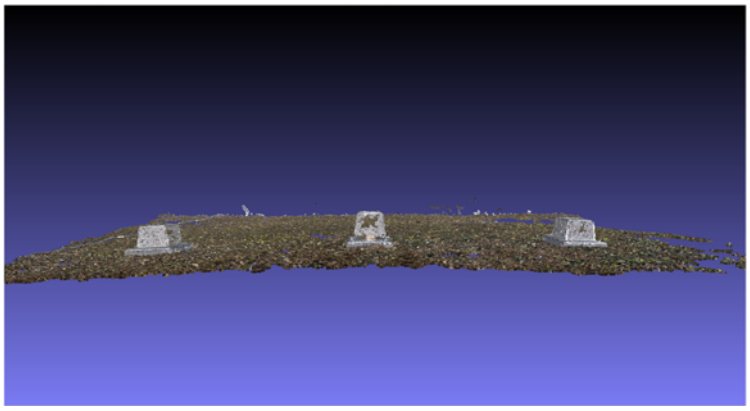


図-3.21　3次元形状に復元されたアンカーの模型(束石の下に4.5cmの浮き)

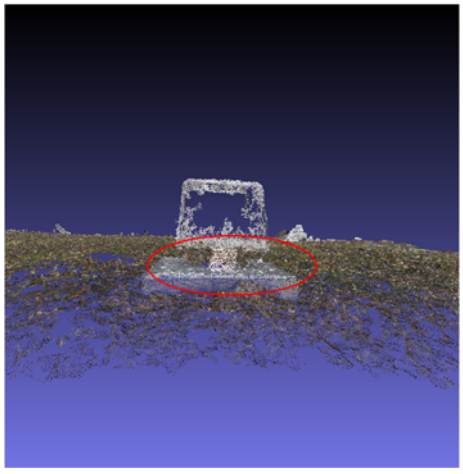


図-3.22　拡大された浮き部分(束石の下に4.5cm)

明らかな浮きが確認できる.

(d)　浮き量1.5cmの場合(平板の下に木板) (case4)

写真-3.12に復元に用いた画像を示し，**図**-3.23に復元形状，**図**-3.24に拡大された浮き部分を示す.

写真-3.12　復元に使われた画像(平板の下に1.5cmの浮き)

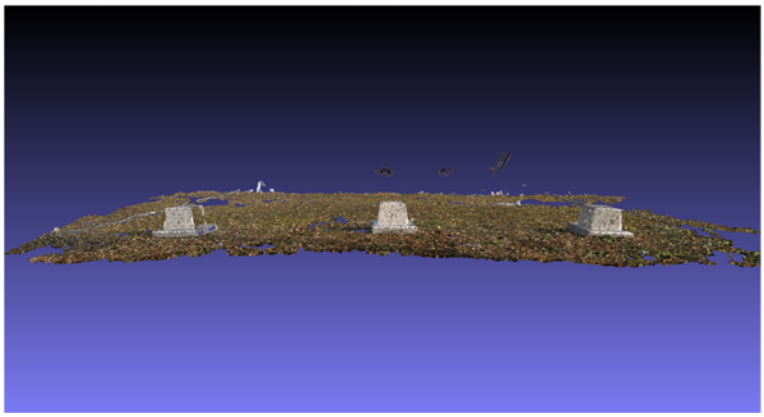


図-3.23　3次元形状に復元されたアンカーの模型(平板の下に1.5cmの浮き)

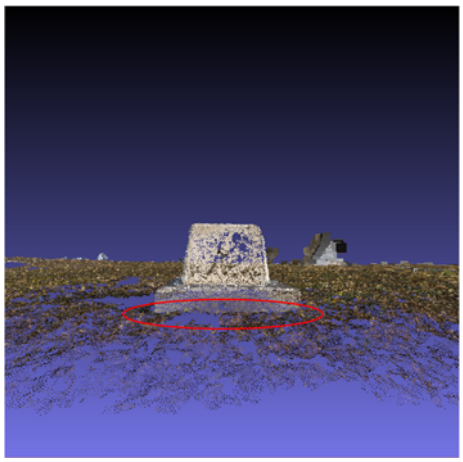


図-3.24　拡大された浮き部分(平板の下に1.5cm)

浮きはほとんど確認できない.

(e)　浮き量3cmの場合(平板の下に木板) (case5)

写真-3.13に復元に用いた画像を示し，**図**-3.25に復元形状，**図**-3.26に拡大された浮き部分を示す.

写真-3.13　復元に使われた画像(平板の下に3cmの浮き)

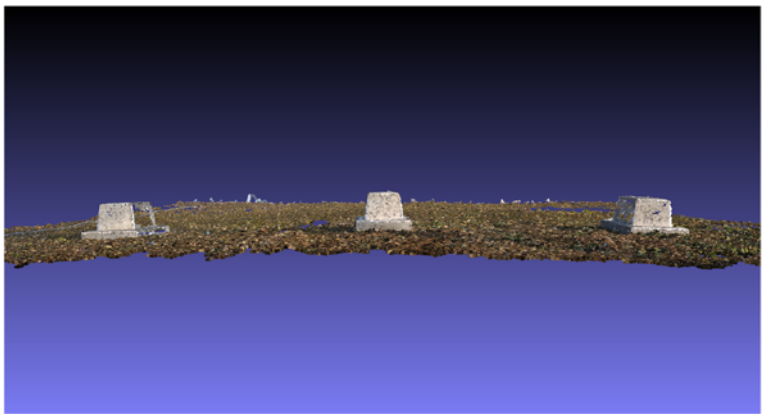


図-3.25　3次元形状に復元されたアンカーの模型(平板の下に3cmの浮き)

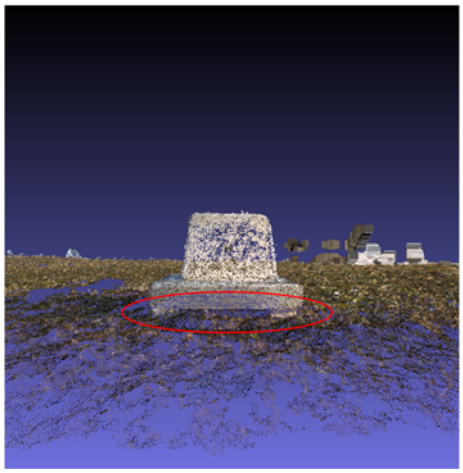


図-3.26　拡大された浮き部分(平板の下に3cm)

わずかな浮きが確認できる.

(f)　浮き量4.5cmの場合(平板の下に木板) (case6)

写真-3.14に復元に用いた画像を示し，**図**-3.27に復元形状，**図**-3.28に拡大された浮き部分を示す.

写真-3.14　復元に使われた画像(平板の下に4.5cmの浮き)

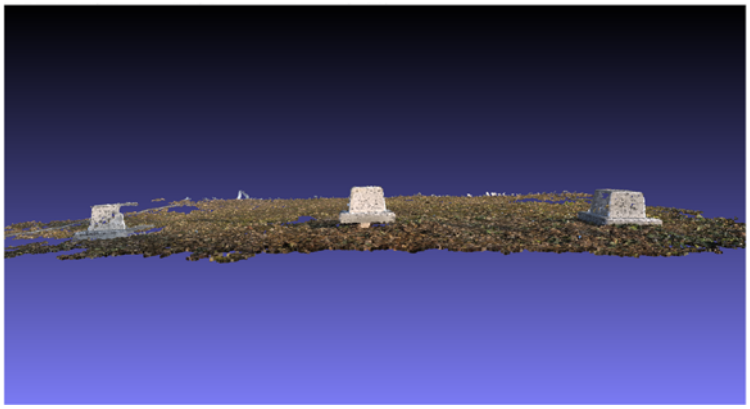


図-3.27　3次元形状に復元されたアンカーの模型(平板の下に4.5cmの浮き)

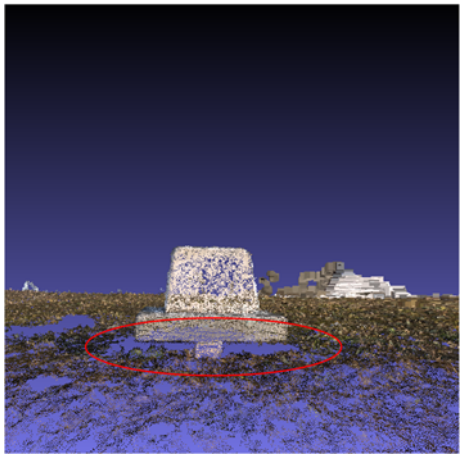


図-3.28　拡大された浮き部分(平板の下に4.5cm)

明らかな浮きが確認できる.

表-3.6にそれぞれのケースの復元の精度を示す.

表-3.6　それぞれのケースの復元精度

浮きを与えた場所	case	実際の浮き量(cm)	復元で得られた浮き量(cm)	誤差(%)
束石下	case1	1.5	1.59	6.27
	case2	3	2.99	0.19
	case3	4.5	4.66	3.64
平板下	case4	1.5	–	–
	case5	3	1.89	36.94
	case6	4.5	3.60	20.08

コンクリート板に対してアンカーヘッドに浮きを生じさせたcase1~3については浮き量の誤差は大きくとも数mm程度であったため，概ね良好な結果が得られたと考えられる．しかし平板の下に浮きを与えたcase4~6は誤差が非常に大きく，case4に関しては復元によって浮きを確認すること自体が不可能であった．なお，復元で浮きを確認する際は，**図-3.29**のように目視で浮きが確認できる部分を選択し，二点間の距離を求めることで浮きを求めている．

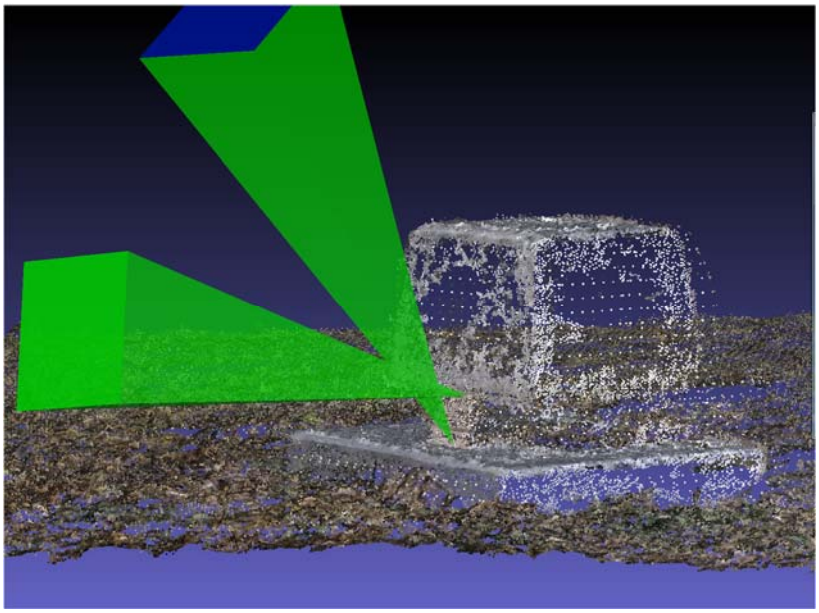


図-3.29　浮きの確認方法

case4~6の誤差が大きくなった原因として，地面に草が生えており，地面に近い部分の復元が困難で安定した復元ができていないことが考えられる．草木の多い地面に接する部分の対する浮き等の相対変位を画像から評価することは現時点では困難である．　しかし，この問題については，対象となるグラウンドアンカー周囲の地表面をセメント処理することで対応可能であると考えられる．

４．形状復元の精度評価（道路路面の事例）

図-4.1 に本研究で用いた走行車両を示す．ルーフトップに設置したベースキャリアに鉄製のアングルを固定した．そして，アングルに三脚の雲台を設置し，カメラを固定している．カメラは合計 2 台設置しており，レリーズを用いて助手席から 2 台同時にシャッターを押すことができる．

図-4.1　本研究における撮影システム

ここでは，3 次元形状復元を実際の道路へ適用することを目標に，走行車両上からの撮影画像による路面形状の把握を行い，平坦性の算出を試みた結果を示す．

平坦性とは，**図-4.2** に示す 3 m プロフィルメータにより，測定車線に沿った路面の凹凸を測定し，路面凹凸の標準偏差を算出したものである．

実際の調査手順は次のとおりである．1 車線につき 1 本の測定線を車線の中央線と重なるように設定し，通常の歩行速度で 3 m プロフィルメータをけん引する．記録された波形から，舗装路面と想定平坦路面（路面を平坦となるよう補正した場合に想定される舗装路面をいう）との高低差を 1.5 m 間隔で読み取り，式(4.1)によって標準偏差を単位 mm，小数点以下 2 桁で計算し，平坦性の測定値とする．

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{\left(\sum d^2\right)}{n}}{n-1}} \qquad (4.1)$$

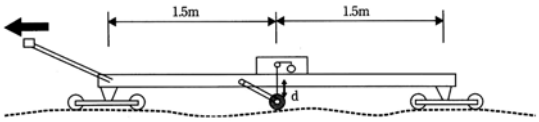


図-4.2　3 m プロフィルメータ

ここで，σ：平坦性（mm），d：測定値（mm），n：データ数である．現在では，3 m プロフィルメータではなく路面性状測定車による測定が行われるが，測定方法は同様である．

3 次元形状復元結果に基づく平坦性の算出方法としては，2 つのカメラの撮影位置の軌跡の中心を車線の中心線と仮定し，中心線から車両の進行方向に対して左側 1 m の地点の幅 3 cm の範囲に存在する路面を抽出することとした．

図-4.3 に復元した路面形状の例と抽出位置（図中の測定線 A）を示す．実際の復元形状は 3 次元点群で示され，ノイズ状に，点が異常な位置に存在することもある．そこで，抽出した路面形状の点群を進行方向に対して 3 cm 毎に区切り，各 3 cm で鉛直方向座標の平均値を算出する．そして，各区間，3 cm 間隔の路面高さの平均点から，進行方向に対して 1.5 m および 3.0 m 隔てた区間の路面高さを用いて，**図-4.4** のように平坦性を算出することとした．平坦性の算出式は式(4.1)と同じである．

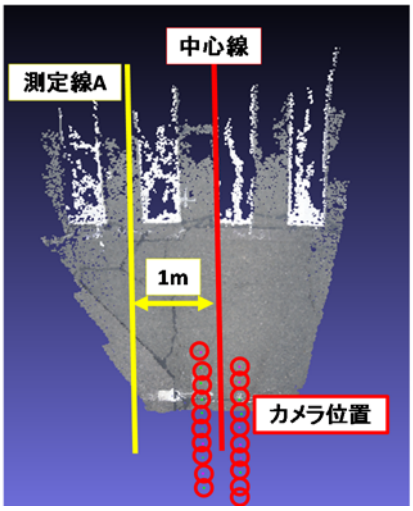


図-4.3　路面形状復元結果の例と抽出位置

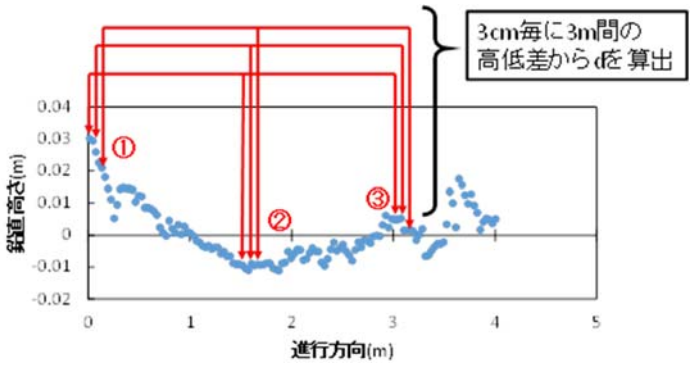


図-4.4　路面形状復元結果からの平坦性の算出

広島県東広島市の広島大学第 8 入口前の横断歩道で，補修前後の道路の平坦性を算出し，提案手法の適用性を検証した．復元精度を確保するため，各カメラ 15 枚の計 30 枚をもちいた．撮影場所を**図-4.5** に示す．**表-4.1** に撮影に用いたカメラの設定を示す．走行速度は 50 km/h 程度，カメラのシャッタースピードは 1/3200 秒である．

図-4.6 と**図-4.7** に補修前後の路面の撮影写真の例を示し，**図-4.8** と**図-4.9** に路面の復元形状と進行方向に対して 3 cm 毎に平均をとった結果を示す. 撮影画像からも分かるように，補修前の路面には幅広のクラックが広がり，クラックによる路面の凹凸が復元形状でも再現されている．

表-4.1　用いたカメラの設定

記録画素数	1280×960[pix]
フラッシュ	発光禁止
35mm判換算焦点距離	28[mm]
俯角（水平面と視線方向のなす角）	45[°]
撮影速度（1秒当たりの撮影枚数）	60[fps]

図-4.5　補修前後の路面の撮影場所

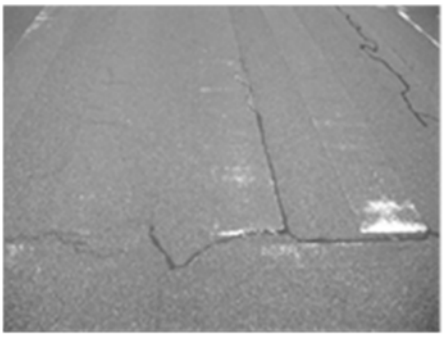


図-4.6　補修前の路面画像の例

図-4.7　補修後の路面画像の例

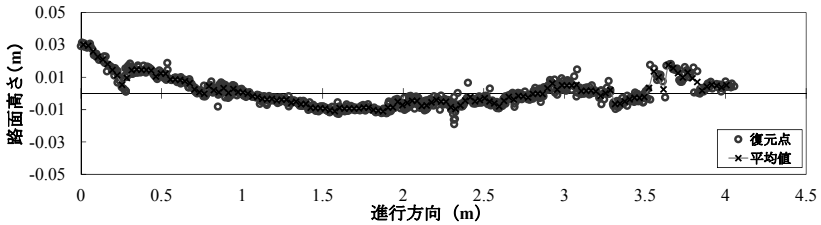


図-4.8　補修前の路面形状と 3cm 間隔の路面高さの平均値

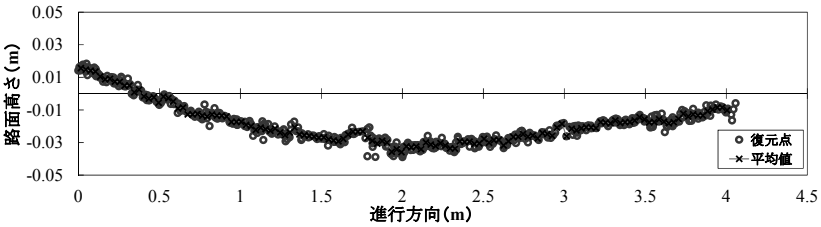


図-4.9　補修後の路面形状と 3cm 間隔の路面高さの平均値

復元範囲において，34 点の高低差のデータを算出し，平坦性を求めた．補修前の路面の平坦性は σ=5.61 mm，補修後の　補修後の算出結果は平坦性：σ=3.18 mm である．一般に，交通量の多い一般道路の補修の目安となる平坦性は σ=4.0～5.0 mm であり [12]，形状復元結果から算出した平坦性はこの補修基準と整合的である．

５．撮影マニュアルの検討

本研究では，以下の構造物を対象として，形状復元を試み，成功例をもとに撮影マニュアルを検討した．

・水平面に近い構造物：道路路面
・鉛直壁面に近い構造物：
　　盛土や切土等の法面，岸壁，石積み擁壁
・腐食劣化する構造物：橋梁躯体，欄干

道路路面の例は４章に，アンカー壁面の例は３章にて詳述しているため，その他の構造形式についての検討事例を以下に記す．また，撮影マニュアル(案)を本報告書の末尾に付録 B として示す．

（１）石積み擁壁

広島県東広島市西条町西条の御建神社の石積み擁壁を対象に形状復元実験を行った．対象施設の位置を**図 5-1** に示す．撮影に使用したカメラは Nikon COOLPIX P7700 である．撮影時のカメラの設定を**表 5-1** に示す．石積み擁壁から約 2m 程度離れた場所からカメラの向きを 90°回転させた状態で撮影した．また，石積み擁壁に対して平行に約 50cm ずつ移動しながら撮影した．**図 5-2** に撮影風景を示す．

図 5-1　対象施設の位置（石積み擁壁）

表5-1　カメラの設定

記録画素数	4000×3000[pix]
35mm判換算焦点距離	28[mm]
絞り値	f/2
シャッタースピード	1/30[秒]
フラッシュ	発光禁止

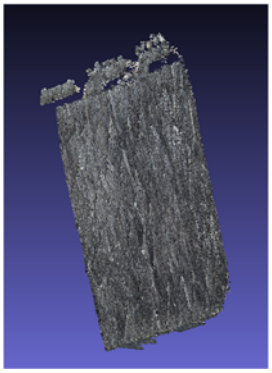
図 5-2　撮影風景（石積み擁壁）

図5-3に3次元形状復元に用いた画像，**図5-4**に復元結果を示す．対象とした石積み擁壁の形状がうまく復元できている．

図 5-3　形状復元に用いた画像（全 12 枚）

（a）正面

（b）横



（c）左斜め

（d）右斜め

図5-4　石積み擁壁の形状復元結果

（2）コンクリート擁壁

広島県東広島市の広島大学東広島キャンパス西側のコンクリート擁壁を対象に形状復元実験を行った．対象施設の位置を**図 5-6** に示す．撮影に使用したカメラは Nikon COOLPIX P7700 である．撮影時のカメラの設定を**表 5-2** に示す．コンクリート擁壁から約 2m 離れた場所でカメラの向きを通常のまま撮影した. また, コンクリート擁壁に対して平行に約 50cm ずつ移動しながら撮影した．**図 5-7, 図 5-8** にそれぞれ撮影風景，コンクリート擁壁の 1 ブロックの大きさを示す.

図 5-6　対象施設の位置（コンクリート擁壁）

表5-2　カメラの設定

記録画素数	3000×4000[pix]
35mm換算焦点距離	28[mm]
絞り値	f/2
シャッタースピード	1/100[秒]
フラッシュ	発光禁止

図 5-7　撮影風景（コンクリート擁壁）

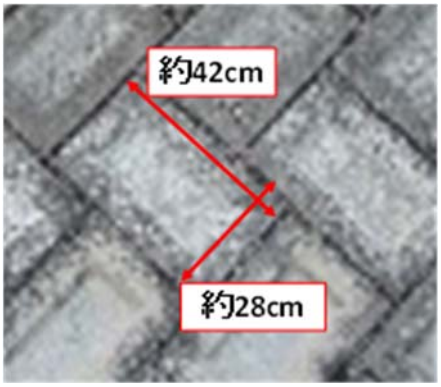


図 5-8　コンクリートブロックの大きさ

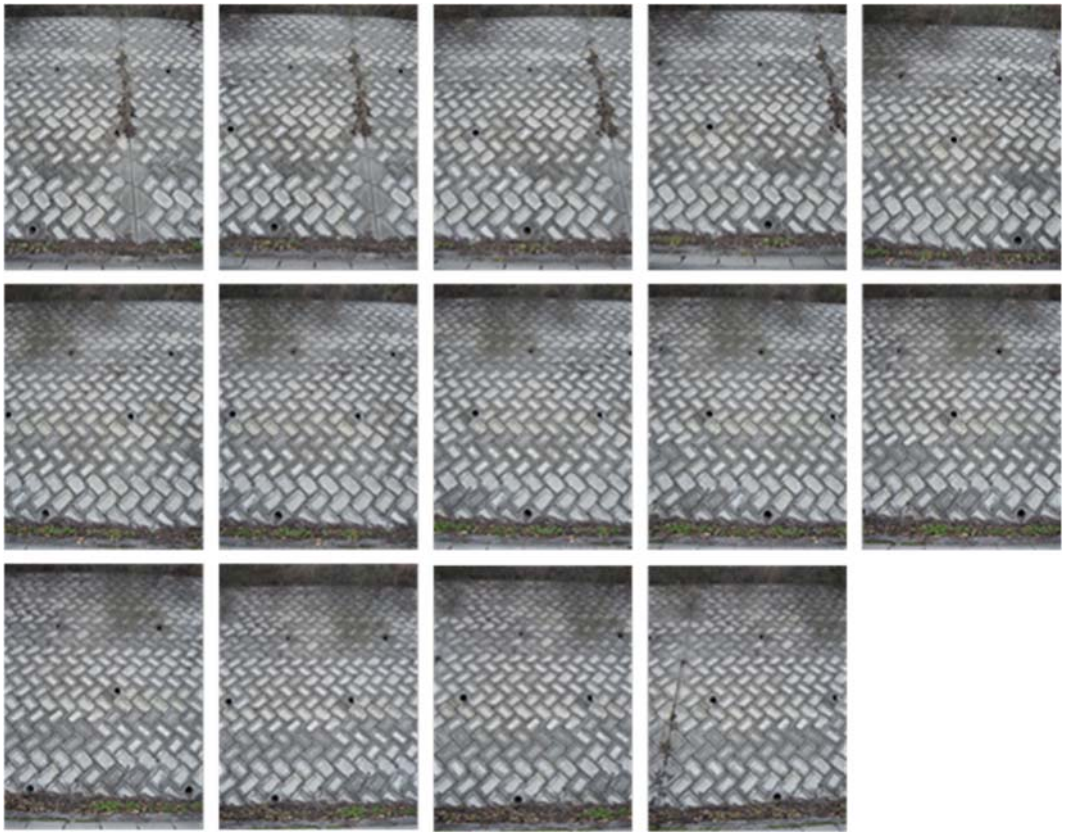
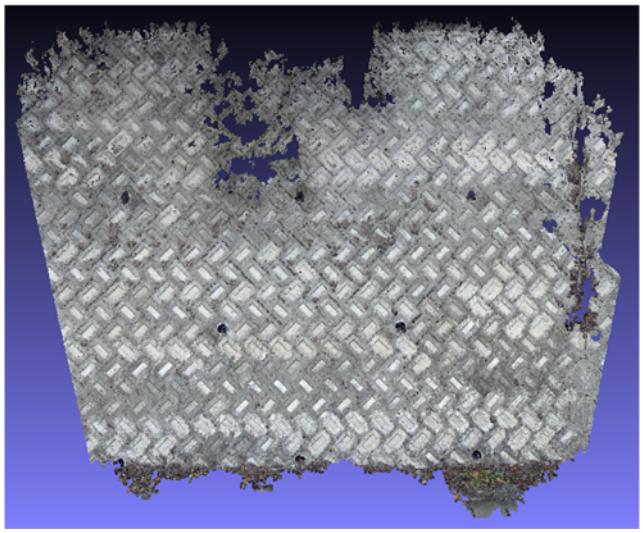
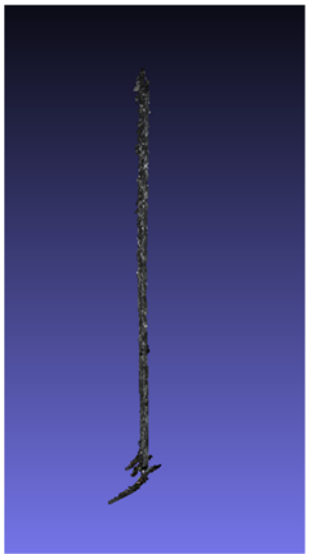


図 5-9　形状復元に用いた画像（全 14 枚）

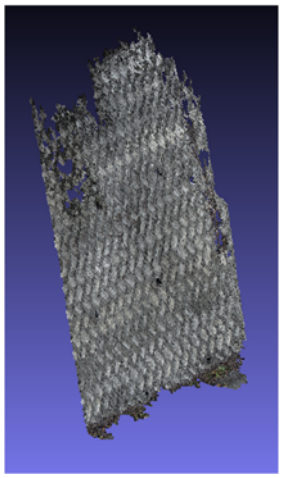
図 5-9, **図 5-10** に，それぞれ 3 次元形状復元に用いた画像とコンクリート擁壁の復元結果を示す．対象とした範囲が適切に形状復元されている．



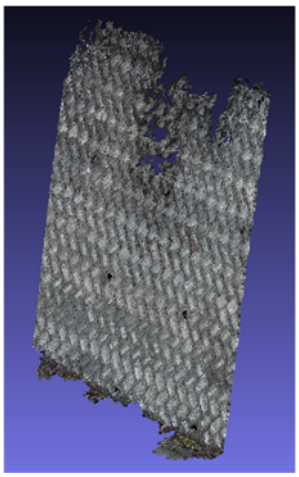
(a) 正面



(b) 横



(c) 左斜め



(d) 右斜め

図5-10　コンクリート擁壁の復元結果

（３）芝生法面

広島県東広島市の広島大学・池ノ上学生宿舎の芝生法面を対象に形状復元実験を行った．対象施設の位置を**図 5-11** に示す．撮影に使用したカメラは Nikon COOLPIX P7700 である．撮影時のカメラの設定を**表 5-3** に示す．芝生面から約 2m 離れた場所でカメラの向きを通常のまま撮影した．また，芝生面に対して平行に約 50cm ずつ移動しながら撮影した．**図 5-12** に撮影対象の大きさを示す．

図 5-11　対象施設の位置（芝生法面）

表5-3　カメラの設定

記録画素数	3000×4000[pix]
35mm換算焦点距離	28[mm]
絞り値	f/2
シャッタースピード	1/200[秒]
フラッシュ	発光禁止

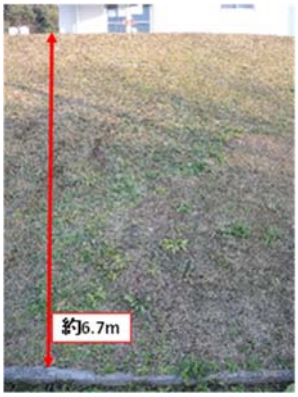


図 5-12　対象施設(芝生法面）のスケール

図 5-13, **図 5-14** に，それぞれ 3 次元形状復元に用いた画像とコンクリート擁壁の復元結果を示す．芝生といっても，芝が短く，風等の影響を受けにくいことが功を奏して，対象とした範囲がある程度は形状復元されている．しかし，復元に成功していない部分があり，法面に穴が生じているようにも見える．

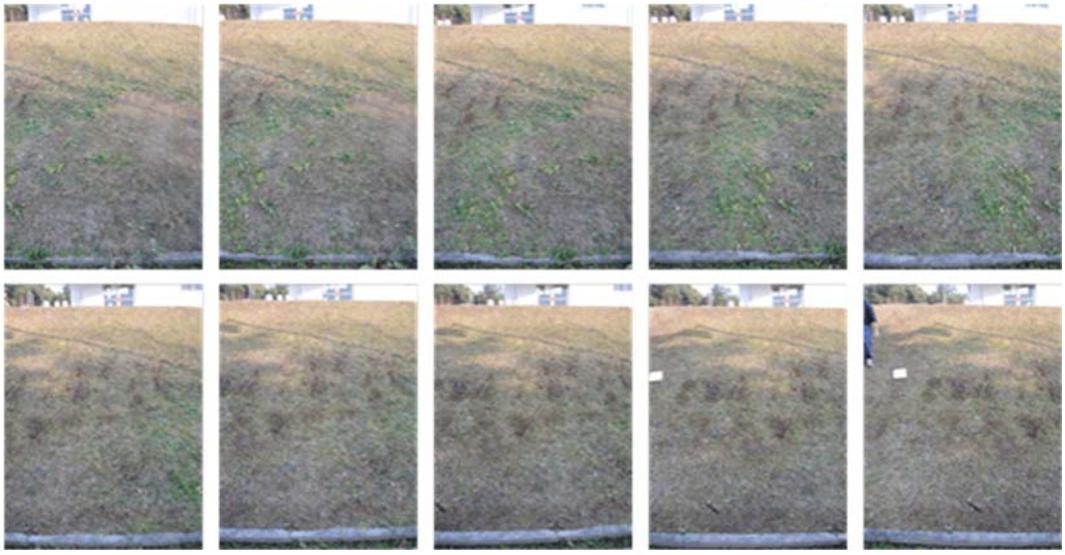
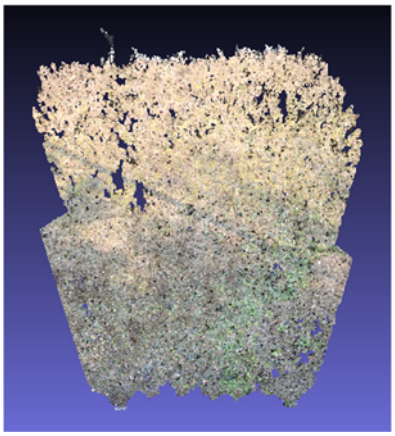
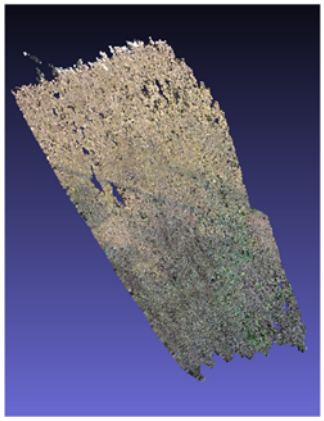


図 5-13　形状復元に用いた画像（全 10 枚）

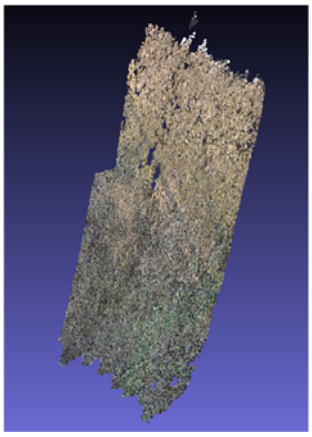


(a) 正面

(b) 横



(c) 左斜め



(d) 右斜め

図5-14　復元結果

（4）岸壁（コンクリート護岸）

岸壁等の港湾施設を対象とした場合，海上からの撮影が難しいという問題が生じる．この点については，ラジコンヘリ等による撮影のほか，**図 5-15** に示すような自撮り棒の使用が考えられる．ここでは，護岸壁面のコンクリート面の劣化等の把握を目的として，護岸直上から自撮り棒を用いてコンクリート護岸壁面の形状把握を行った例を示す．

対象施設は，横須賀市の港湾空港技術研究所・国土技術政策総合研究所の護岸である．３章でのラジコンヘリを用いた形状復元で用いたのと同様に，GoPro カメラを用いて動画を撮影し，動画から画像をキャプチャして復元に用いた．用いた画像（全 20 枚）を**図 5-16** に示す．

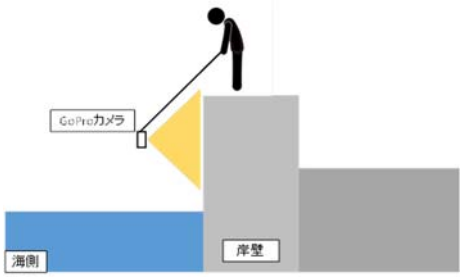


図 5-15　岸壁（コンクリート護岸）の撮影方法

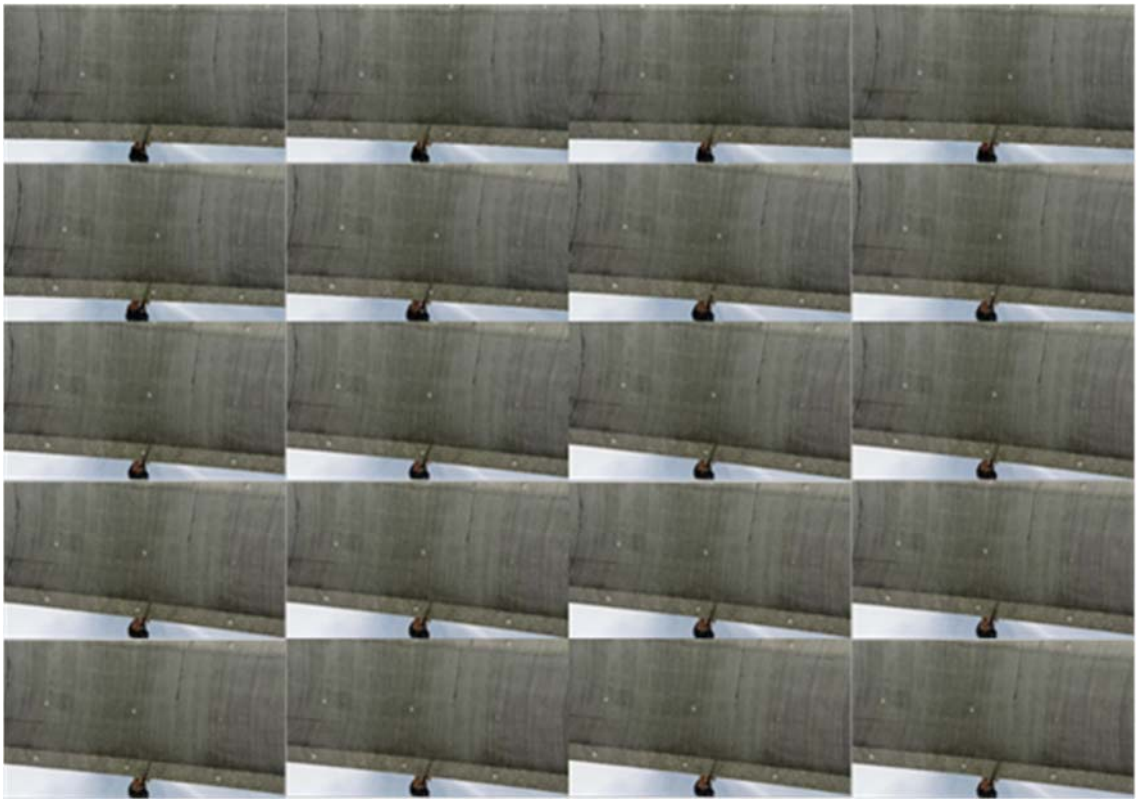
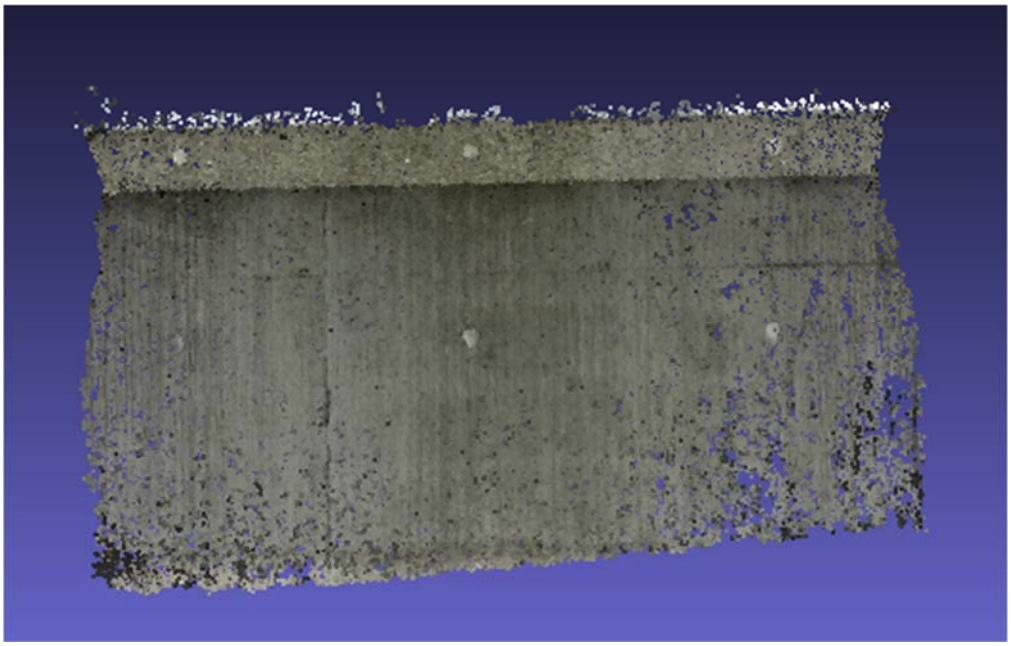
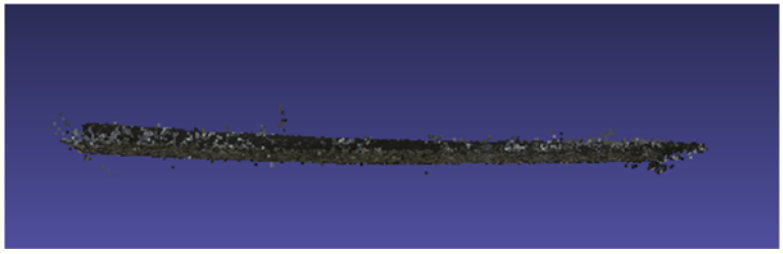


図 5-16　岸壁（コンクリート護岸）の形状復元に用いた画像（全 20 枚）

形状復元結果を**図 5-17** に示す．多くの画像に移りこんでいる中央部は，コンクリート擁壁の場合と同様に適切に形状が復元できている．しかし，端部ではノイズが多く，形状把握の対象範囲を明確に設定したうえで，撮影を行うことが重要である．



(a) 正面



(b) 真上

(c) 横

図5-20　岸壁（コンクリート護岸）の復元結果

（５）岸壁（桟橋床板裏面）

岸壁を対象とした場合，劣化進行が激しいにもかかわらず，状態把握が難しいのは，桟橋床板の裏側である．一般には引き潮時にボートで調査や，ダイバーによる調査が必要となり，安全確保等も含めて準備等が大掛かりとなる．そこで，ラジコンボートにカメラを設置し，桟橋床板裏側の劣化状況の把握を試みた．

計測用に作成したラジコンボートの概要を**図 5-21** に示す．ラジコンボートは約 18cm の高さがあるが，水面に浮かべた場合，水面上に約 8cm，水面下に約 10cm 程度の割合になる．ラジコンボートの稼働時間は，バッテリーの能力により，最長で 15 分となる．搭載したカメラは，GoPro HERO3＋と CASIO EXILIM EX-FR10 の２台である．このうち，CASIO のカメラは，Bluetooth 機能により，手元で画像の確認が可能である．この画像をもとに，ラジコンボートの運転を行うことを想定している．CASIO の撮影されている画像を確認できるコントローラー部を**図 5-22** に示す．また，GoPro と CASIO の撮影条件を**表 5-4** と**表 5-5** に示す．

また，兵庫県南あわじ市の桟橋においてラジコンボートによる計測実験を行った．**図 5-23** に対象施設の位置，**図 5-24** に対象施設の写真を示す．なお，計測実験においては，（株）日本港湾コンサルタントの協力を得た．

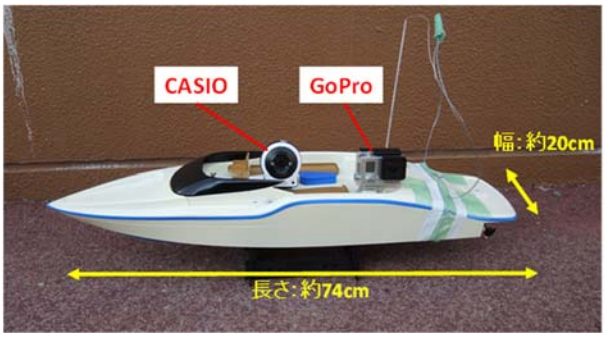


図 5-21　岸壁（桟橋床板裏側）の撮影用ラジコンボート

図 5-22　撮影用ラジコンボート操作用の画像表示（Bluetooth）端末

表5-4　GoProカメラの撮影条件

記録画素数	1920×1080[pix]
35mm判換算焦点距離	ワイド設定時：14 [mm] ミディアム設定時：21[mm] ナロー設定時：28[mm]
撮影速度（1秒当たりの撮影速度）	60[fps]
シャッタースピード	オート 最小シャッタースピード：1/8192秒 最大シャッタースピード：1/60秒

表5-5　CASIOカメラの撮影条件

記録画素数	1920×1080[pix]
35mm判換算焦点距離	21[mm]
撮影速度（1秒当たりの撮影速度）	30[fps]
シャッタスピード	オート 最大：1/30秒

図 5-23　ラジコンボートによる計測実験の対象施設（兵庫県南あわじ市沼島）

図 5-24　対象施設（兵庫県南あわじ市沼島）の状況

干潮時に計測を実施したが，季節的な要因により水面が高く，**図 5-25** に示すように床板下のクリアランスが 30 cm 程度しかない状況であった．このため，ゴムボート等による床板下の実際の状況の確認は実施できていない．

撮影は，**図 5-26** に示すように，ラジコンボートを床板下をくぐらせる形で実施した．なお，コンクリート床板が厚く，**図 5-22** に示した Casio のカメラの Bluetooth 端末では画像が受信できなかったため，ラジコンボートの適切な操船は困難であった．

図 5-27 と**図 5-28** に，形状復元に最も成功したケースの撮影画像を示す．水位が低く，対象に対し近接した撮影状況となったため，ピントをあわしきれていない．また，**図 5-29** に形状復元結果と画像の撮影位置（図中の緑および赤の点）を示す．波は穏やかであったが，ボートは左右に揺れながら走行しており，ボートの安定性が低いことが読み取れる．

図 5-25　対象施設（兵庫県南あわじ市沼島）の床板下クリアランス

図 5-26　床板下の撮影のための操船コース

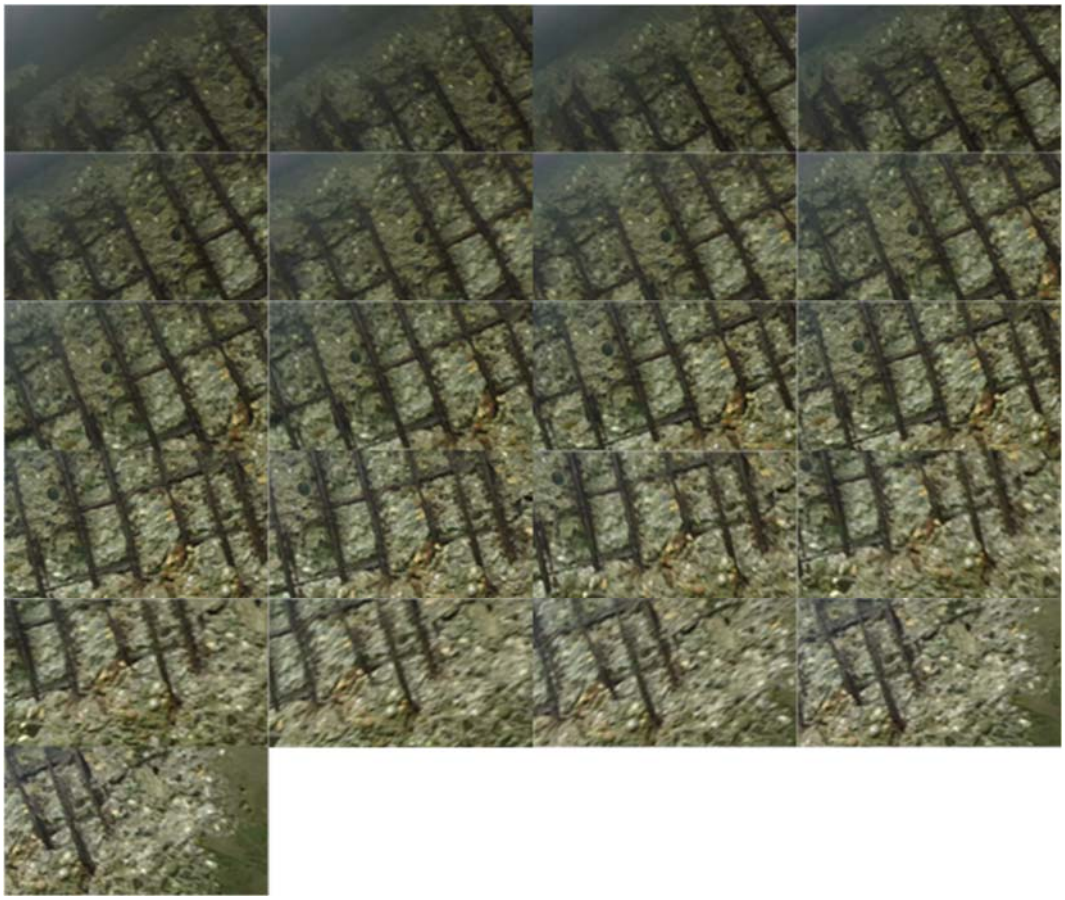


図 5-27　岸壁（桟橋床板裏側）の形状復元に用いた画像（全 21 枚）

図 5-28　岸壁（桟橋床板裏側）の形状復元に用いた画像の拡大図（ちょっとピンボケ）

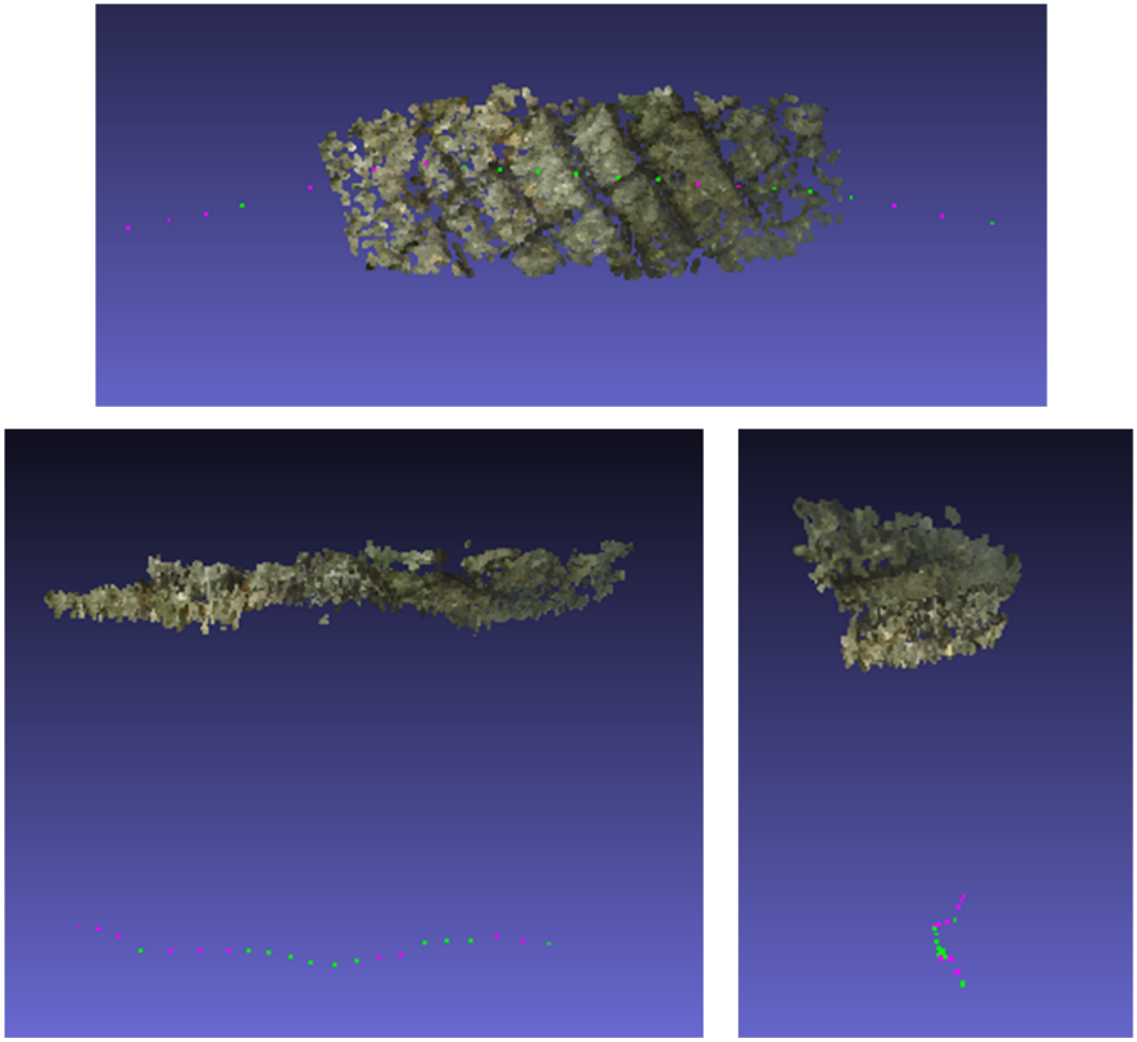


図5-29　桟橋床板裏側の形状復元結果およびカメラ撮影位置

調査項目として，コンクリートのかぶりが剥落して鉄筋がむき出しとなっている面積等を評価したいものの，操船が難しく，広範囲の形状復元はできていない．しかし，鉄筋がむき出しとなっている状況をぼんやりととらえることはできており，今後の技術改良（例えば，ラジコンボートの安定性の向上や，操作性の改善，接写レンズの使用）により，形状復元のレベルの向上が期待できる．

（６）橋梁

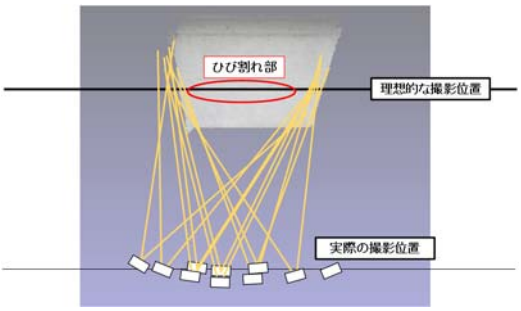
広島県東広島市の広島大学東広島キャンパス内の思案橋を対象として，橋梁ひび割れ部の状況を把握することを目標とした形状復元実験を行った．対象施設の位置を**図 5-30** に示す．撮影に使用したカメラは Nikon COOLPIX P7700 である．撮影時のカメラの設定を**表 5-6** に示す．ひび割れ部の位置が高く，ひび割れ部を正面から撮影することができないので，**図 5-31** のように下側から撮影するようにした．撮影は撮影対象（ひび割れ）が小さいので，ひび割れを常に画像内に収めるようにして撮影した．

図 5-30　対象施設の位置（橋梁）

表5-6　撮影の設定

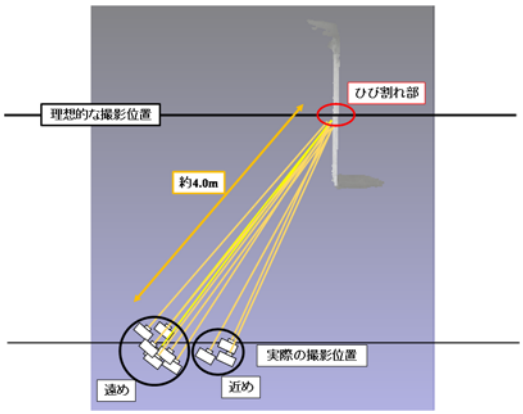
記録画素数	4000×3000[pix]
35mm換算焦点距離	28[mm]
絞り値	f/2
シャッタースピード	1/500[秒]
フラッシュ	発光禁止

図 5-32 と**図 5-33** に，それぞれ 3 次元形状復元に用いた画像と形状復元結果を示す．ひび割れを含む範囲を復元できているが，横から見た図ではひび割れの幅や深さを把握することは難しく，データの処理方法等を今後検討していく必要がある．



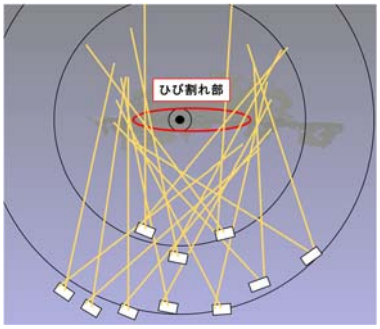
(a) 壁の正面

理想的な撮影位置はひび割れと同じ高さであるが，今回は撮影対象が高所にあるため，無理せずに撮影できる位置からひび割れ部と平行に移動するように撮影した．移動の間隔はだいたい50cm(横に一歩ぐらい).



(b) 壁の真横

左図のようにひび割れ部から遠めと近めの距離から撮影した．遠めからの撮影だけでも良かったが，より精度の良い復元を行うため，二か所からの撮影を行った．撮影した二か所の距離はだいたい50cm.



(c) 壁の真上

ひび割れ部からの距離をほぼ一定にして，遠めと近めの距離で撮影した.

図 5-31　橋梁のひび割れ部を対象とした撮影方法の検討

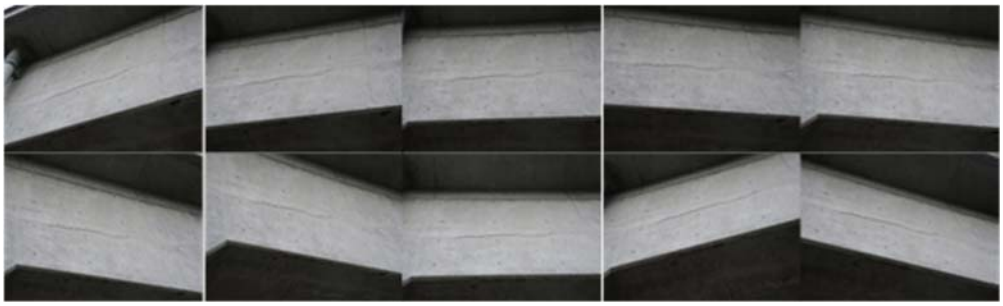
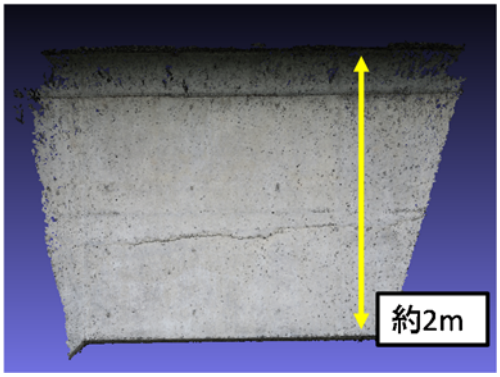
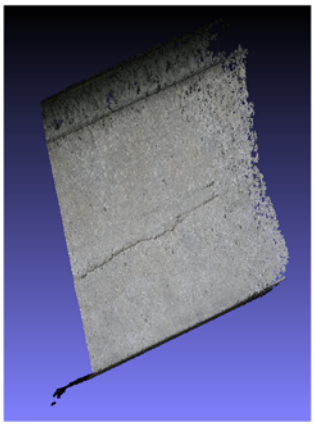


図 5-32　橋梁のひび割れ部の形状復元に使用した画像（全 10 枚）

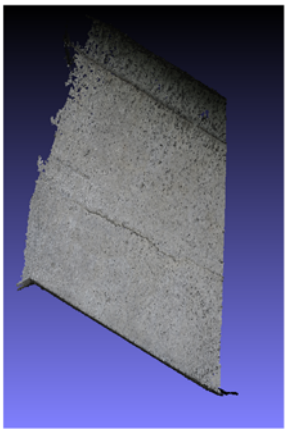


(a) 正面

(b) 横



(c) 左斜め

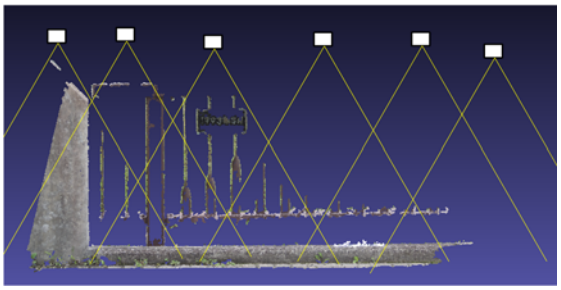


(d) 右斜め

図 5-33　橋梁のひび割れ部の形状復元結果

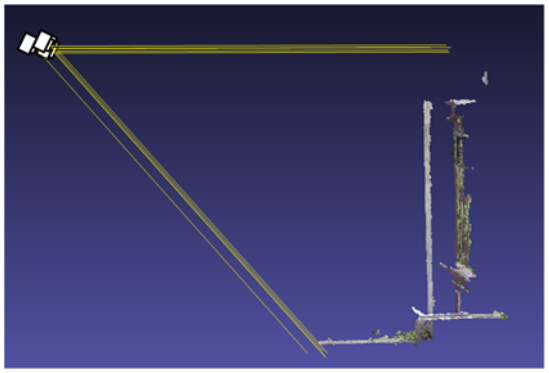
（７）欄干

広島県東広島市の広島大学東広島キャンパス内の思案橋を対象として，欄干の腐食部の状況を把握することを目標とした形状復元実験を行った．対象施設は**図 5-30** に示したものと同じである．撮影に使用したカメラは Nikon COOLPIX P7700 であり，撮影時のカメラの設定は**表 5-6** と同じである．撮影位置を**図 5-34** に示す．



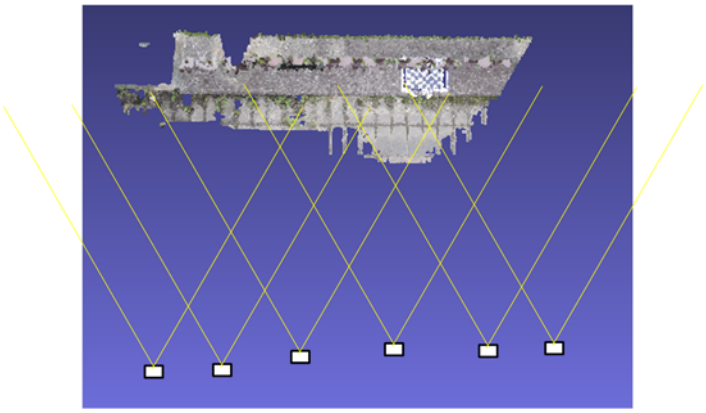
(d) 欄干の正面

欄干の横に立って，移動しながら撮影した．



(e) 欄干の真横

高さがほぼ一定の位置から撮影している．

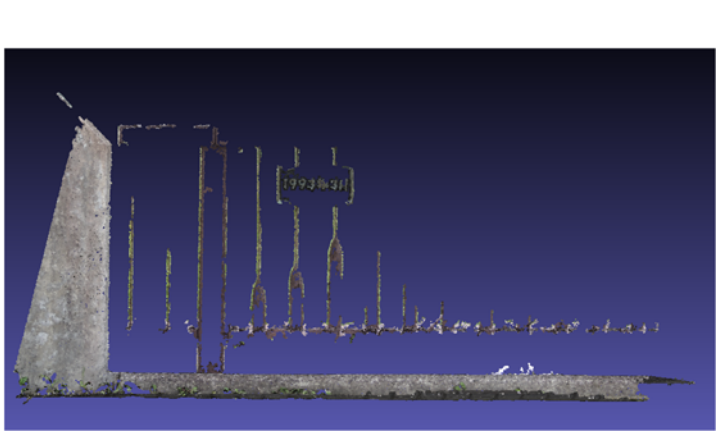


(f) 欄干の真上

欄干からの距離をほぼ一定にして，一歩（約 50cm）ずつ平行移動しながら撮影した．

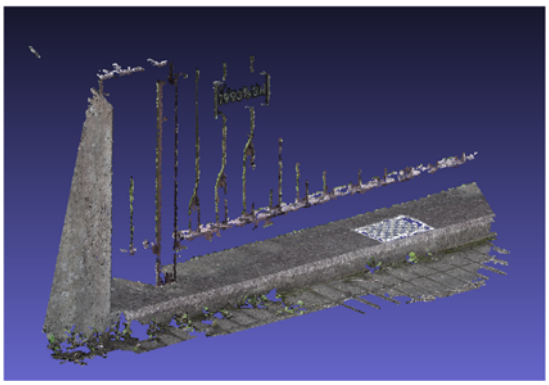
図 5-34　欄干を対象とした撮影位置

図 5-35　欄干の形状復元に用いた画像（全 6 枚）

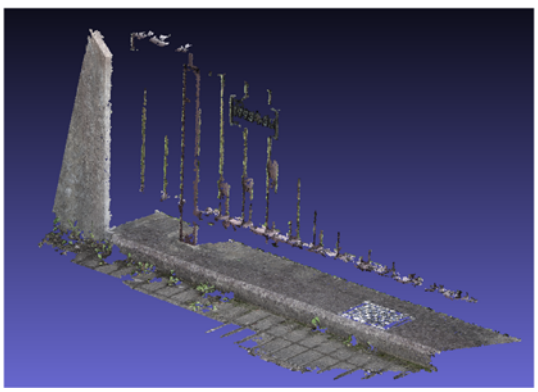


(e) 正面

(f) 横



(g) 左斜め



(h) 右斜め

図 5-36　欄干の形状復元結果

形状復元に用いた画像を**図 5-35** に，形状復元結果を**図 5-36** に示す．形状が復元できた部分とできていない部分があり，これは，欄干の材質が金属のため，光の反射等の悪影響があったものと考えられる．

（８）撮影マニュアルの提案

以上の検討結果をもとに，撮影マニュアル（案）を作成した．内容を付録 B として，本報告書末尾に示す．

６．形状復元結果を用いた腐食鋼板の残存耐力評価

構造物の全体像を形状復元で把握することがマクロな画像解析の利用であるとすると，構造物の特に劣化した部分を局部的に形状復元し，耐力評価等を行うなど，ミクロな視点での画像解析の利用も考えられる．そこで，腐食した鋼板を対象に 3 次元形状復元行い，残存耐力評価を試みた．

（１）腐食鋼板の 3 次元形状復元

まず，実際の鋼板を様々な角度から 15 枚程度撮影した．鋼板の腐食面にはっきりした色彩の違いがあり，さらに表面の錆びによって鋼板表面が凸凹しており，形状復元対象のポイントとして意識して撮影した．

図 6-1 に撮影に用いたカメラ(CASIO EXILIM F1)，**表 6-1** に撮影に用いたカメラの仕様を示す．また，**図 6-2** に形状復元に使用した写真の例，**図 6-3** に形状復元結果を示す．このように，腐食鋼板の形状を把握することは可能であることを確認した．しかし，表面のさびがある状況では，復元精度の評価や残存耐力の評価は難しい．表面のさびを除去した状態での検討が別途必要である．

図 6-1　撮影に用いたカメラ(CASIO EXILIM F1)

表 6-1　撮影に用いたカメラ(CASIO EXILIM F1)の仕様

形式	CASIO EXILIM F1
有効画素数	600万画素
撮像素子	1.8型高速CMOS
レンズ	F値:2.8(W)～4.6(T) 焦点距離:f=7.3～87.6mm 35mmレンズ換算焦点距離:f=36～432mm
ズーム	光学12倍

図 6-2　3 次元形状復元に使用した写真の例

図 6-3　3 次元形状復元結果

（2）模擬腐食鋼板の 3 次元形状復元

腐食を模擬した人工的な凹凸が施された鋼部材（模擬腐食鋼板）を対象に撮影を行い，3 次元形状復元を行った．模擬腐食鋼板の長さは 1100mm，中心部に腐食部の長さ 250mm，幅 100mm で無腐食部の板厚は 12mm である．腐食部の凹凸は実際の腐食凹版と統計的な性質が同等となるように作成されており，実際の腐食鋼板をサンドブラスト等で処理したものに対応する．

表 6-1 に示したカメラで 40 枚程度撮影し，形状復元を行った．復元に使用した画像の例を**図 6-4** に，形状復元結果を**図 6-5** に示す．撮影時の背景も復元されているが，これは背景部の特徴点も復元時に認識されていることを意味している．すなわち，適切な背景を用いることでカメラ位置の推定精度が向上し，復元精度が向上している可能性が示唆される．

図 6-4　3 次元形状復元に使用した写真の例

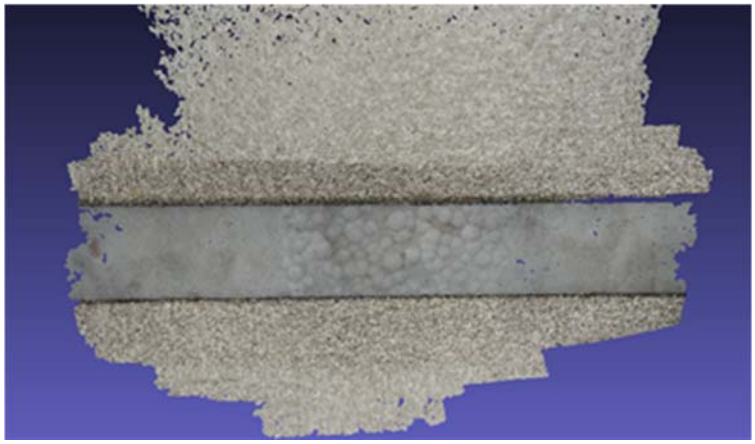


図 6-5　3 次元形状復元結果

３次元形状復元結果では，鋼板のうち，表面の凸凹している部分や色彩の違いがある部分は復元された座標点が多く，表面が平らであり，同色の部分は座標点が少ない．このように，３次元座標位置を計測できる測定点はメッシュ状に分布しているわけではなく，そのままでは扱いが難しい．

つまり，平均板厚や標準偏差などの統計量の算出や解析モデルを作成するために，測定点の場所的な偏りをなくす必要がある．そこで，計測された座標系のデータを用いて， 1mm 間隔のメッシュ点上の座標値を求めた．その際， 1mm 間隔のメッシュ点での座標値は，**図 6-6** に示すように各格子点に近い 3 点が成す平面と直交座標との交点から各格子点上の座標を算出した．なお，この方法では，格子点近くの計測ノイズの影響が大きくなる可能性があり，ノイズの考慮方法が今後の課題である．

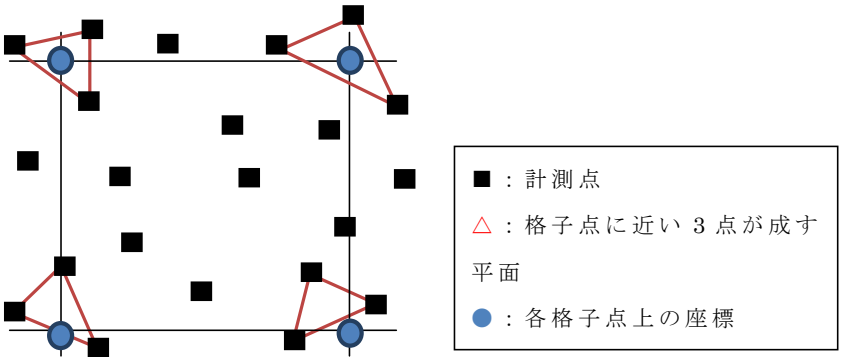


図 6-6　3 次元形状復元結果のメッシュ座標への変換

模擬腐食鋼板の腐食表面のレーザー変位計による計測結果と画像解析からの計測結果を板厚の等高線として，**図 6-7** および**図 6-8** に示す．ただし，画像解析からの板厚等高線において，黒で示した点は，形状復元できなかった部分である．しかし，形状復元できていない部分の多くは表面が凸凹していないために復元できなかった部分であると考えられ，腐食していない部分とみなすことができる．

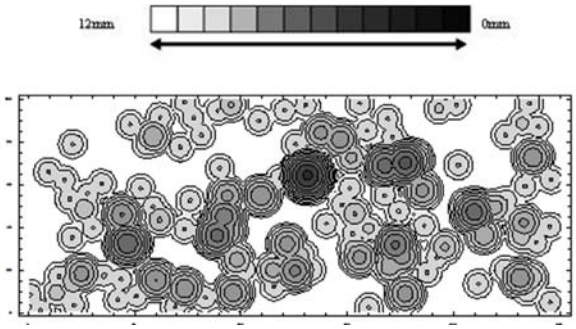


図 6-7　レーザー変位計による模擬腐食鋼板の板厚測定結果

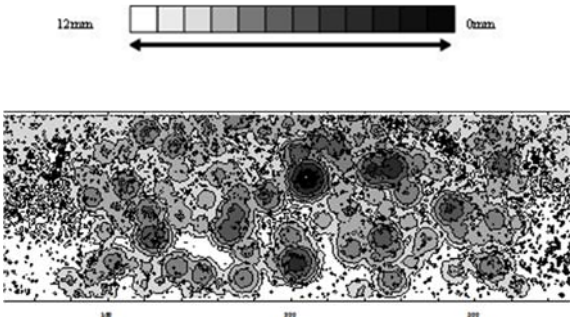


図 6-8　画像解析による模擬腐食鋼板の板厚測定結果

模擬腐食鋼板の両面を同様に計測し，断面平均板厚分布を求めた．中立軸からの表面までの断面平均板厚分布を**図 6-9** に，中立軸からの裏面までの断面平均板厚分布を**図 6-10** に示す．また，全板厚の断面平均板厚分布を**図 6-11** に示す．高精度（誤差は平均約 0.3mm 以内）に板厚を測定できていることがわかる．

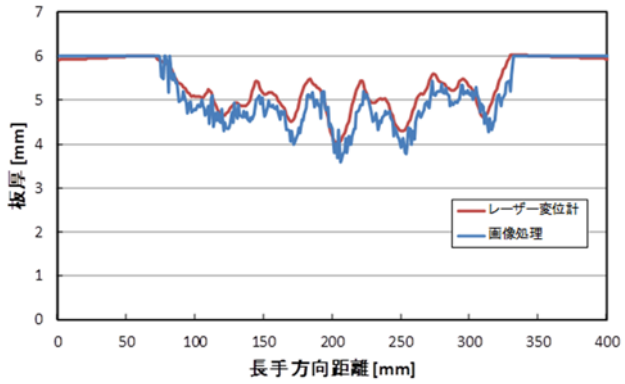


図 6-9　模擬腐食鋼板の断面平均板厚分布（表面）

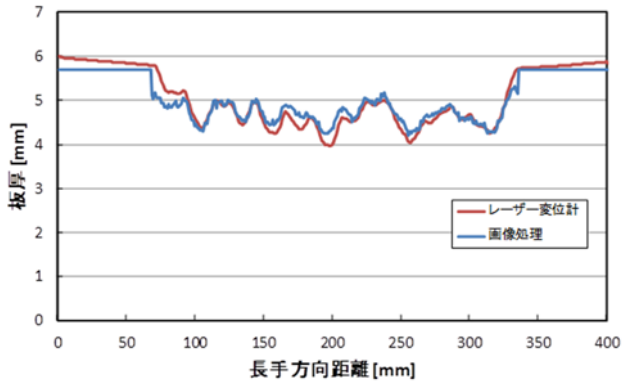


図 6-10　模擬腐食鋼板の断面平均板厚分布（裏面）

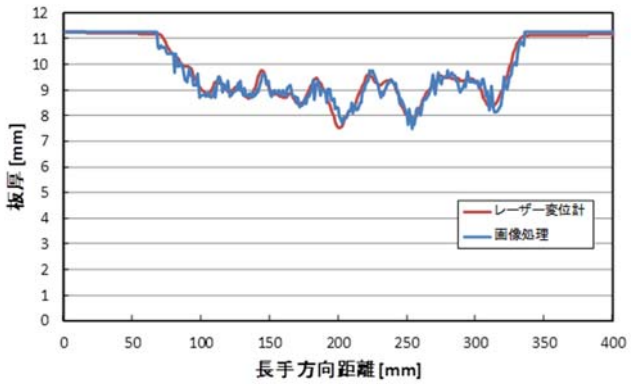


図 6-11　模擬腐食鋼板の断面平均板厚分布（全厚）

（3）模擬腐食鋼板の残存強度解析

模擬腐食鋼板の残存強度について，汎用構造解析コード ABAQUS を用いた有限要素法による強度解析結果と実験結果を比較した．模擬腐食鋼板の鋼種は SS400 であり，弾性係数 200.0GPa，降伏応力 260.0MPa，ポアソン比 0.30 とした．また，解析では降伏後のひずみ硬化は考慮せず，完全弾塑性とした．

解析の境界条件は実験での境界条件と対応させることとし，両端の回転を固定した．荷重条件は，一方の端面に強制変位を与える変位制御とした．

腐食鋼板の残存板厚は，有限要素法の各節点位置について，元板厚の約 12mm から表面と裏面のそれぞれの同じ座標点での腐食深を引くことにより算出した．実験供試体の長手方向の無腐食部分は長さ 1100mm であるが，画像解析においては長手方向の長さ 400mm の「範囲しか形状復元していない．そこで，長手方向に長さを合わせることとし，延長部分は板厚は腐食区間外であるため板厚 12mm で統一した．

引張試験は長手方向 1100mm の人工腐食モデルの健全部の両端を 100mm ずつ固定させて引張試験をするため，解析範囲は 900mm となる．なお，引張試験では明らかに減肉された腐食部分に応力が集中し，破壊も腐食部分で起こるため，長手方向の板厚を実験と合わせても特に問題はない．

解析で使用した要素は 4 節点アイソパラメトリックシェル要素で，要素の大きさは 1 mm×1 mm，長手直角方向に 100 要素，長手方向に 900 要素に分割し，90,000 要素，91,001 節点とした．また，解析では**図 6-12** に示すように表面計測結果から得られた中央面の座標を初期たわみとして各節点に与え偏心を考慮した．

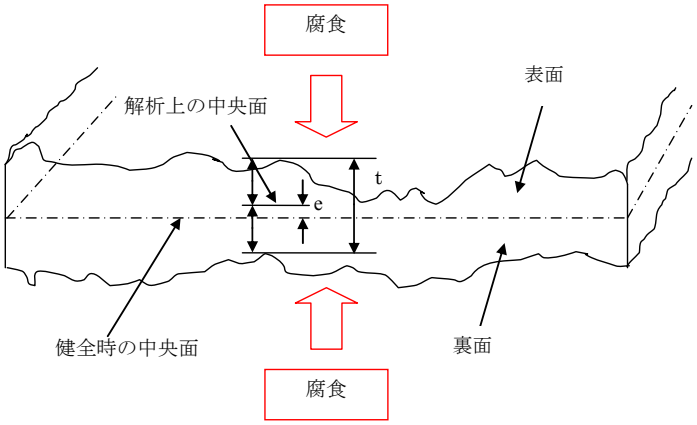


図 6-12　仮想中立面及び偏心量

解析結果と実験結果の比較を以下に示す. **図 6-13** は実験時の破壊後の鋼板の写真であり, **図 6-14** は破壊部の写真である．もっとも腐食の激しい部分において破壊が生じている.

図 6-15 と**図 6-16** に強度解析における鋼板の変形状況を示す．また，**図 6-17** に応力分布を示す．実験では供試体中央部で，供試体幅が小さくなるように横断方向の変位を伴いながら破壊している. 解析においても, 供試体中央部で横断方向の変位が大きい部位があり, また，中央部での応力の値が大きい．このように解析結果は実験結果と整合している.

降伏荷重は実験値では 221.17kN, 強度解析では 229.36kN と約 4%の誤差にとどまる結果であった．これは，画像解析による形状復元結果の誤差が，模擬腐食鋼板の表面と裏面の両方で概ね 0.3mm 以内となり, 精度の高い形状把握ができたためであると考えられる. なお, 表面の最小腐食深はレーザー変位計での計測が-1.99mm，画像解析からの最小腐食深は -2.17mm，裏面の最小腐食深はレーザー変位計が-1.98mm，画像解析が-1.75mm であった.

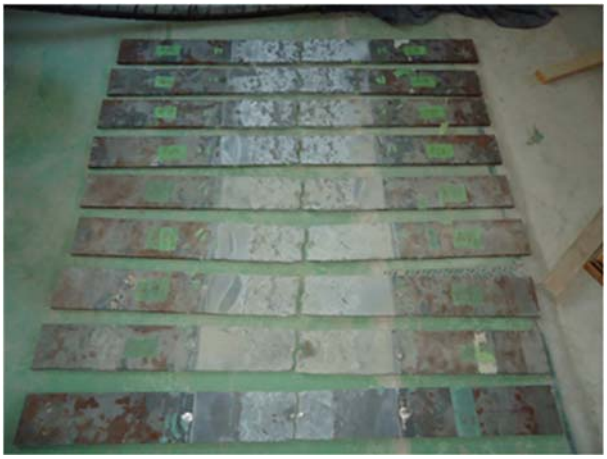


図 6-13　実験後の模擬腐食鋼板

図 6-14 模擬腐食鋼板の破壊部

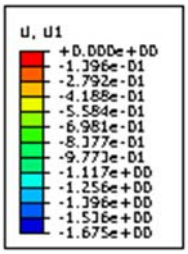


図 6-15 長手方向の変位分布（解析結果）

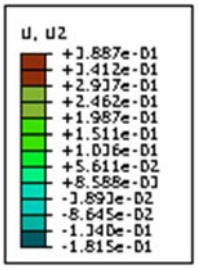
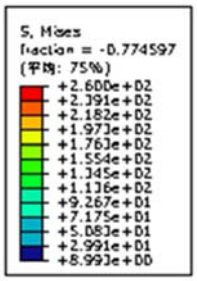


図 6-16 横断方向の変位分布（解析結果）



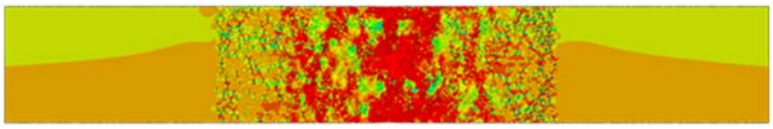


図 6-17 応力分布（解析結果）

画像解析から算出した板厚の誤差が少なかったことは，中立軸のずれも少なく，偏心を適切に解析に反映することができたと考察される．また，解析と実験の降伏荷重が概ね等しいことから，画像解析による 3 次元形状復元を鋼構造物の安全性評価に適用できる可能性が示唆された．

７．まとめ

本研究では，維持管理目的で，精度よく形状を評価するための撮影方法を，種々の構造物に対して提案し，成功事例を精度とともに例示することを目指した．また，プログラムの使用方法も示すことで，画像解析技術の普及を目指した．

これまでのところ，下記の項目について達成した．

・本研究で用いた 3 次元形状復元の方法を，より多くの方が把握できるように明示した．
（本報告書の付録 A）
・アンカー壁面を例に，形状復元の制度を評価し，撮影方法を例示した．
（本報告書の第３章）
・道路路面を例に，平坦性の評価方法を例示した．
（本報告書の第４章）
・種々の構造物を対象とした 3 次元形状復元の成功例を示した．
（本報告書の第５章）
・形状復元の成功例をもとに，形状把握を目的とした撮影マニュアルを提案した．
（本報告書の付録 B）
・鋼材の腐食状況および残存耐力の把握においても，提案手法が適用できることを示した．
（本報告書の第６章）

解析プログラム自体は新規開発したものではないが，種々の適用事例を，期待できる復元精度とともに提示する点には新規性があり，今後の実務における画像解析技術の普及への寄与が期待される．

参考文献

1) 倉敷紡績株式会社：3D Photogrammetry system Kuraves-MD, http://www.kurabo.co.jp/el/3d/kuraves_01.html，確認年月日 2015 年 1 月 15 日.
2) 株式会社ニコンシステム：2006 年 4 月 17 日報道資料, http://www.nikon.co.jp/news/2006/0417_gs1_01.htm，確認年月日 2015 年 1 月 15 日.
3) David Lowe：Distinctive image features from scale-invariant keypoints，*International Journal of Computer Vision*，Vol.60，No.2，pp.91-110，2004.
4) 角田光法・一井康二・玉木徹・石田裕章・小野淳子：地盤構造物の防災・減災における SIFT を用いた画像解析技術の適用可能性，防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム，地盤工学会関東支部，pp.125-130，2012.
5) 一井康二・玉木徹：画像解析を用いた護岸消波工の積層構造分析技術の開発と維持管理及び長寿命化への応用，平成 22 年度中国地方建設技術開発交流会，2010.
6) 角田光法・小野淳子・一井康二：石積み擁壁の維持管理における SIFT を用いた画像解析技術の適用可能性，公団法人地盤工学会中国支部，地盤と建設，Vol.30，No.1，pp.117-124，2012.
7) 角田光法：画像解析を用いた舗装損傷評価システムの開発，平成 24 年度広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻修士論文，2013.
8) Bundler(Structure from Motion for Unordered Image Collections)：http://phototour.cs.washington.edu/bundler/，確認年月日 2015 年 1 月 15 日
9) Patch-based Multi-view Stereo Software(PMVS-Version2)：http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/，確認年月日 2015 年 1 月 15 日
10) Mesh Lab：Main page，http://meshlab.sourceforge.net/，確認年月日 2015 年 1 月 15 日.

付録A　本研究で使用したソフトウエアの使い方

本研究では，研究目的等で使用可能なソフトを利用した．将来における再現性等の検討の為，本研究での使用方法を下記に示す．なお，個々のソフトの実務等における使用許諾の条件や著作権は該当サイトを参照されたい．

1）3次元形状復元データの作成

1. http://ccwu.me/vsfm/からパソコンに合わせた VisualSFM をインストールする．(本研究では 64bit 版を利用)

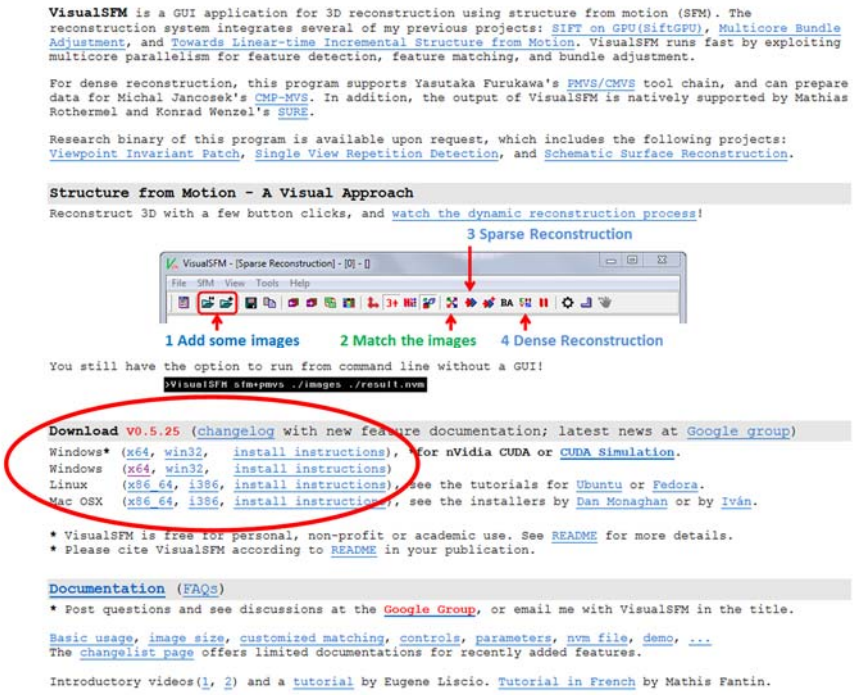


図1

2. インストールされた VisualSFM は現時点では以下の図のようになる.

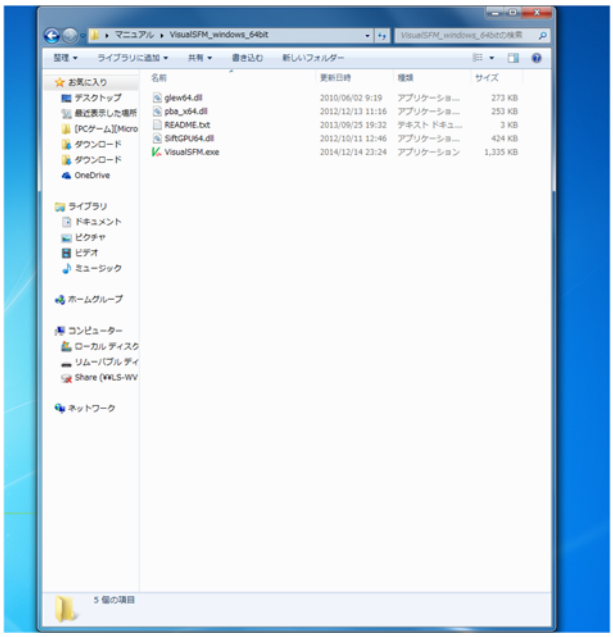


図2

3. http://code.google.com/p/osm-bundler/downloads/detail?name=osm-bundler-pmvs2-cmvs-full-32-64.zip から osm-bundler-pmvs2-cmvs-full-32-64.zip をインストールする.

図3

4. インストールした osm-bundler の中の osm-bundler>osm-bundlerWin64>software>cmvs>bin から cmvs.exe と pthreadVC2.dll と genOption.exe をコピーして，VisualSFM.exe と同じディレクトリに貼り付ける．同様に osm-bundler>osm-bundlerWin64>software>pmvs>bin から pmvs2.exe をコピーして VisualSFM.exe と同じディレクトリに貼り付ける．

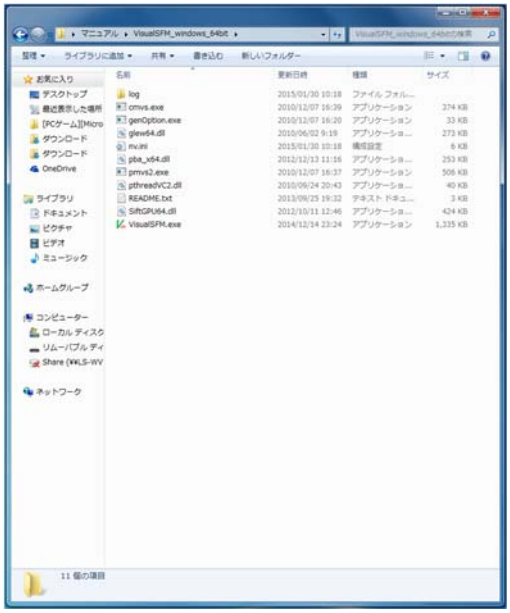


図4

5. VisualSFM.exe を開き，Open Multiple Images から復元に使用する画像を選択する．

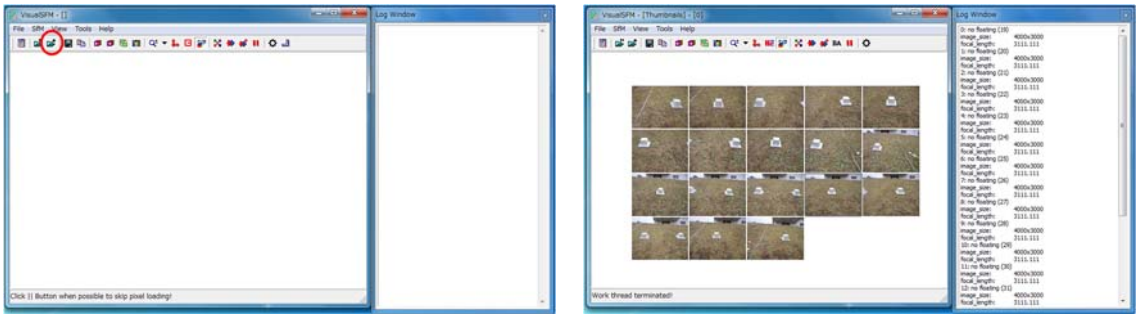


図5

6. Compute Missing Matches をクリックし, Compute Missing Pairwise Matching, finished というメッセージを確認する.

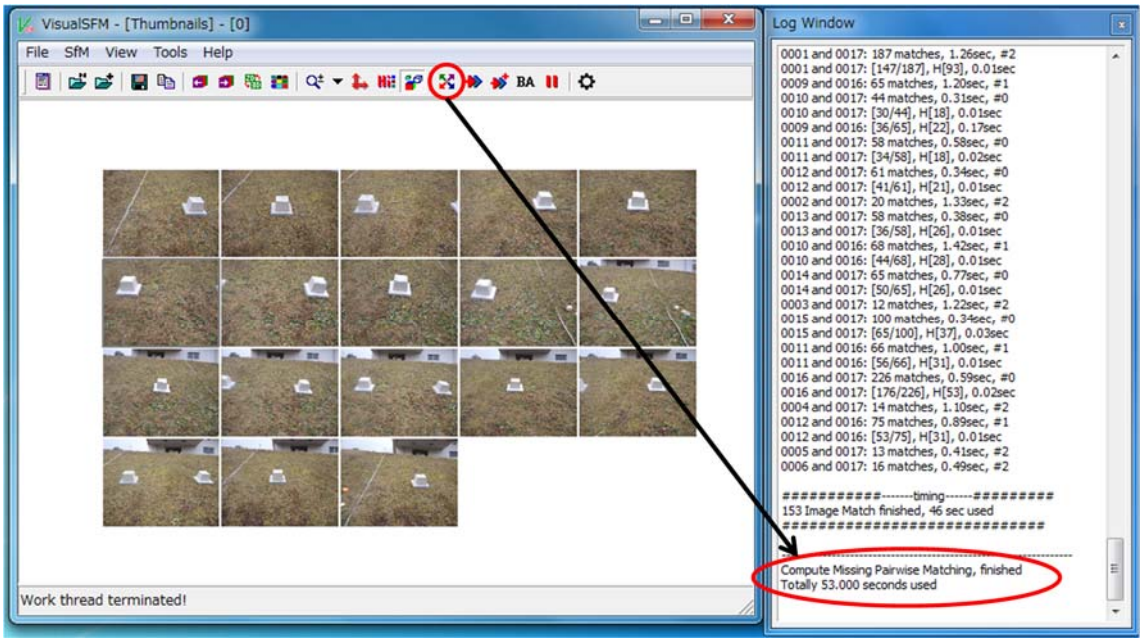


図6

7. Compute 3D Reconstruction をクリックし，Run full 3D reconstruction, finished というメッセージを確認する.

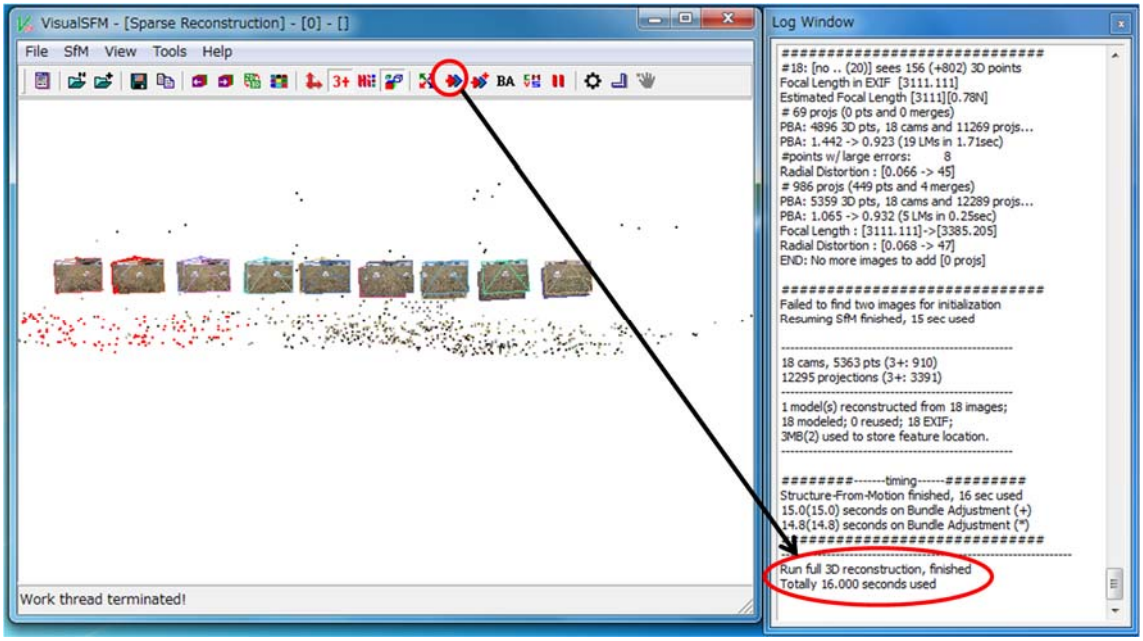


図7

8. Run dense reconstruction をクリックし，適当な場所を保存先に指定し，Run dense reconstruction, finished というメッセージが確認できたら終了．

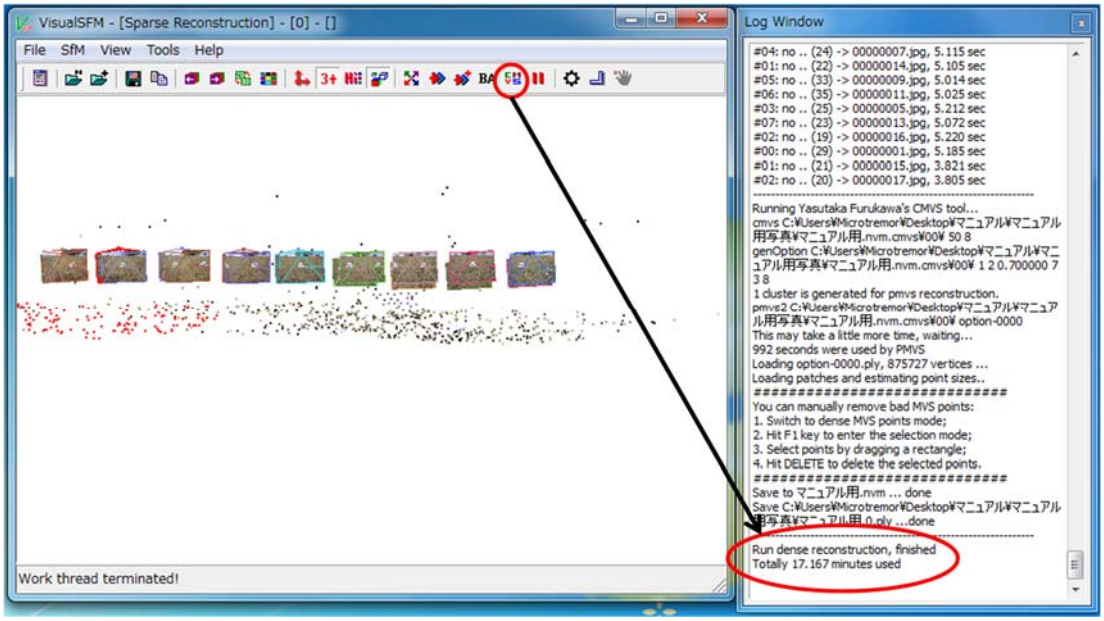


図8

2）復元データの可視化

1. http://meshlab.sourceforge.net/から MeshLab をインストールする．

図9

2. Meshlab を開き Import mesh から 3 次元形状復元データの作成の手順 8 で作成された.ply ファイルを選択する.

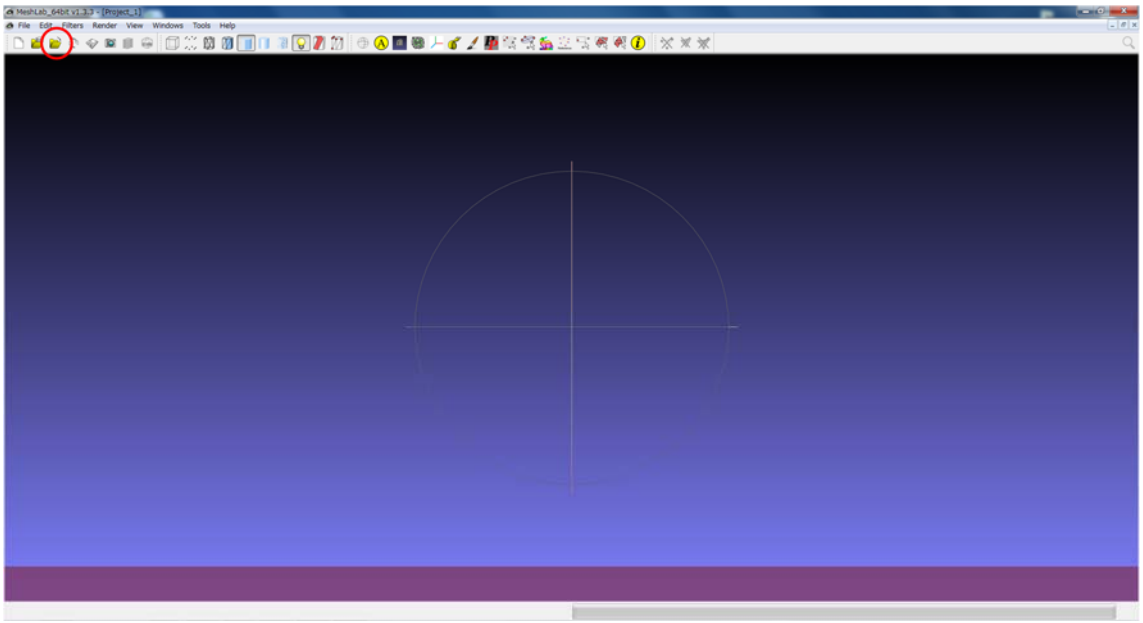


図10

3. 復元データの可視化完了. Ctrl キーや Shift キー，ホイールの操作などを使うことで動かすことができる.

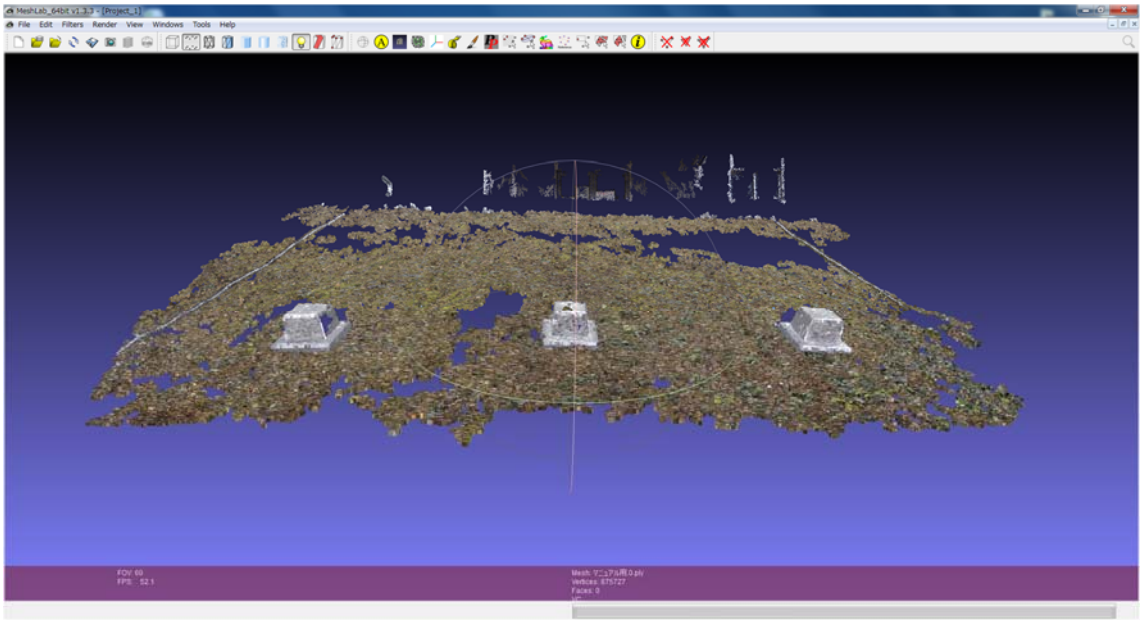


図11

3）スケール合わせ（復元データの可視化の続き）

1. Filters>Remeshing, Simplification and Reconstruction>Surface Reconstruction:Poisson を選択.

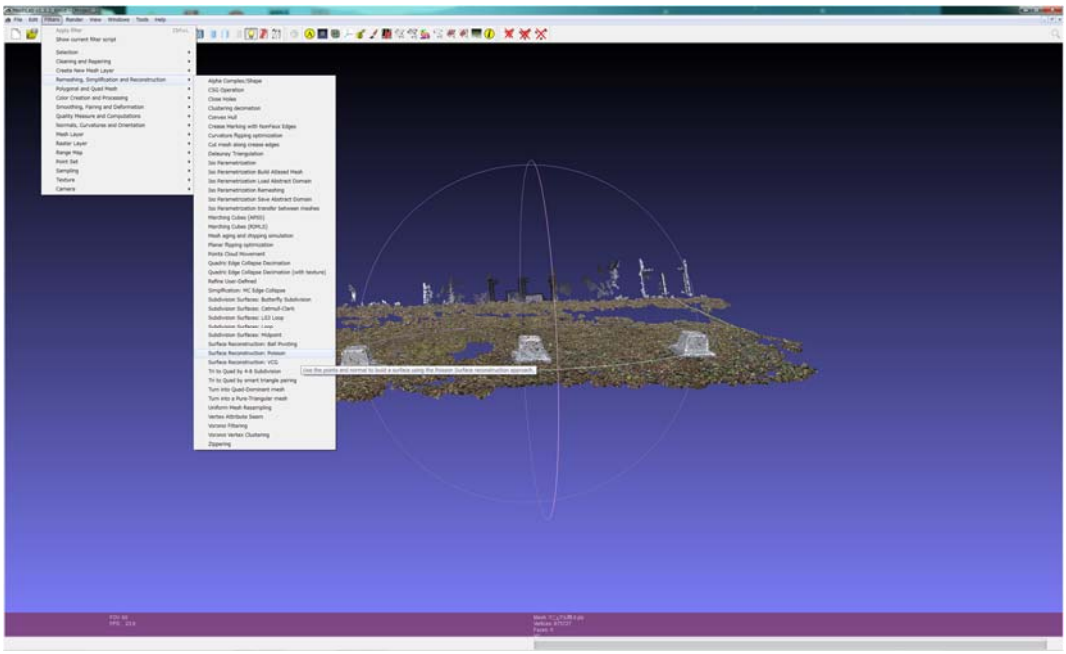


図12

2. Octree depth を 10 に設定して Apply を選択.

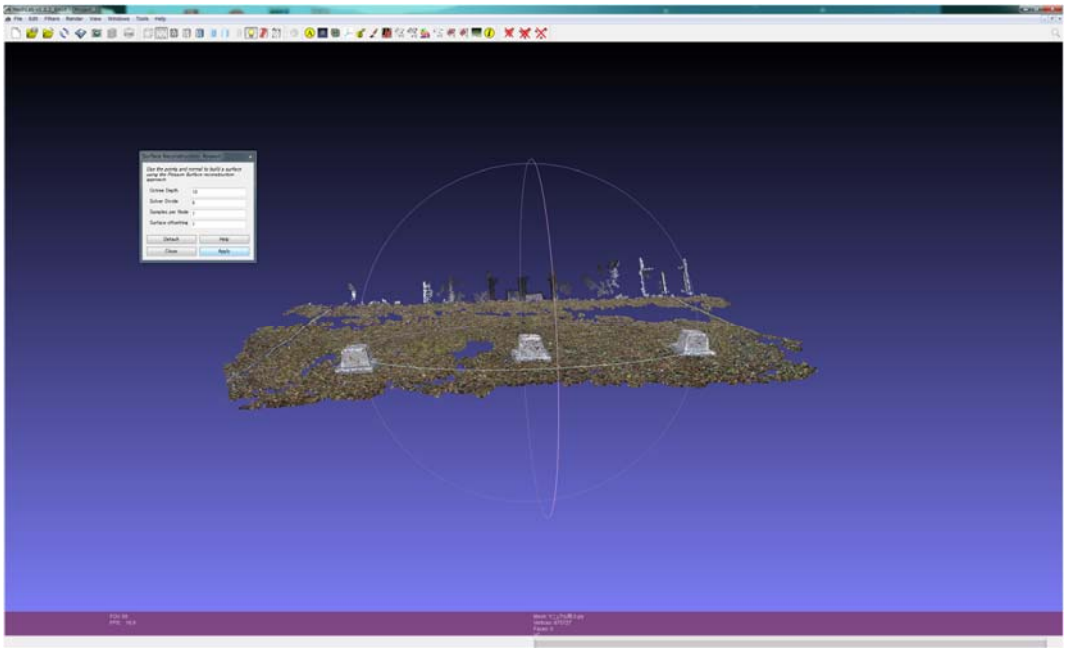


図13

3. PickPoints を選択し，座標が知りたいところを右クリックすることで座標が得られる．

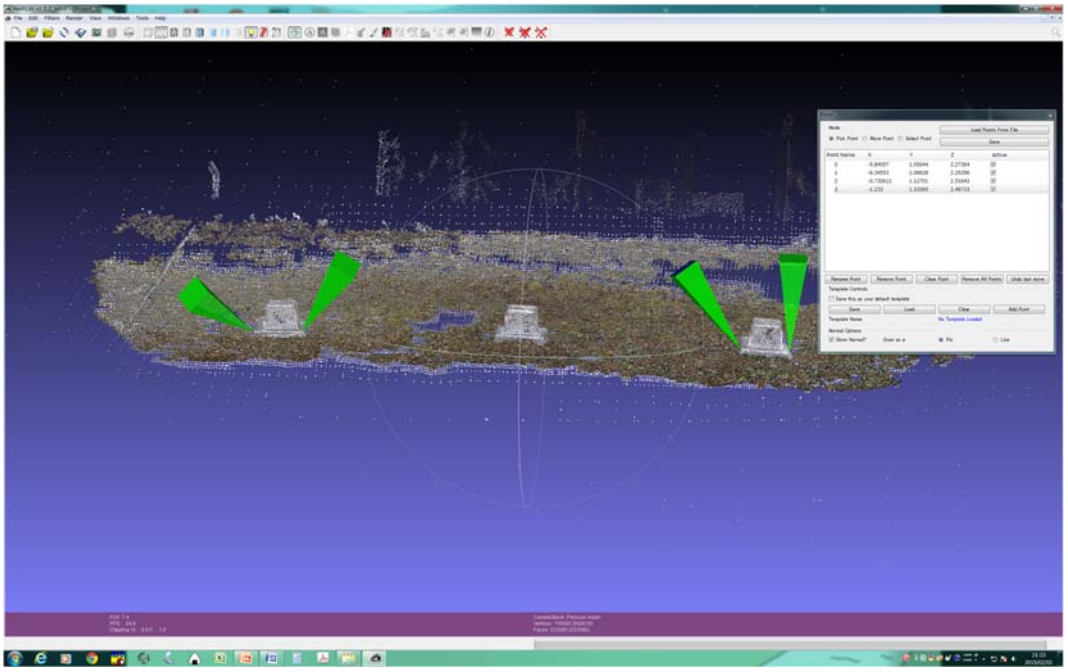


図14

4. 得られた座標は無次元のものである．このままではスケールが分からないので，スケールを与える必要がある．左側のアンカーの座標に着目すると(Point name0 と Point name1)座標間の距離は約 0.5 である．実際のコンクリート板の辺長は 30cm なので，スケール比は 60 倍である．無次元で与えられた座標を 60 倍にすると，cm 単位での相対座標が得られる．

4）簡単なレジストレーション（点群のマッチングと比較）

1. レジストレーションしたい 2 つの復元データの可視化を行い，Align を選択する．

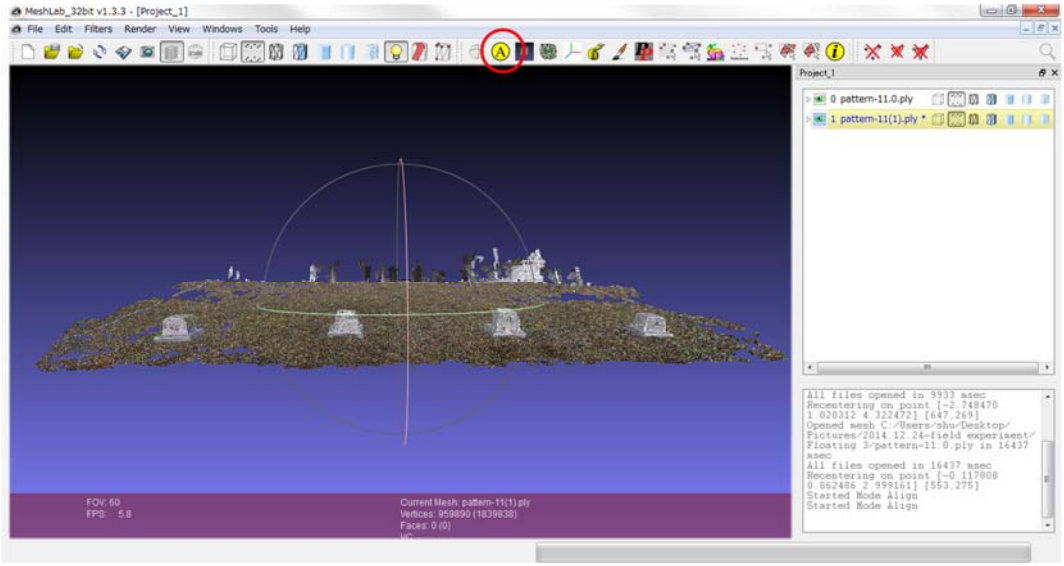


図15

2. 片方で Glue here Mesh，もう一方で Point based Glueing を選択すると以下のような画面になる．

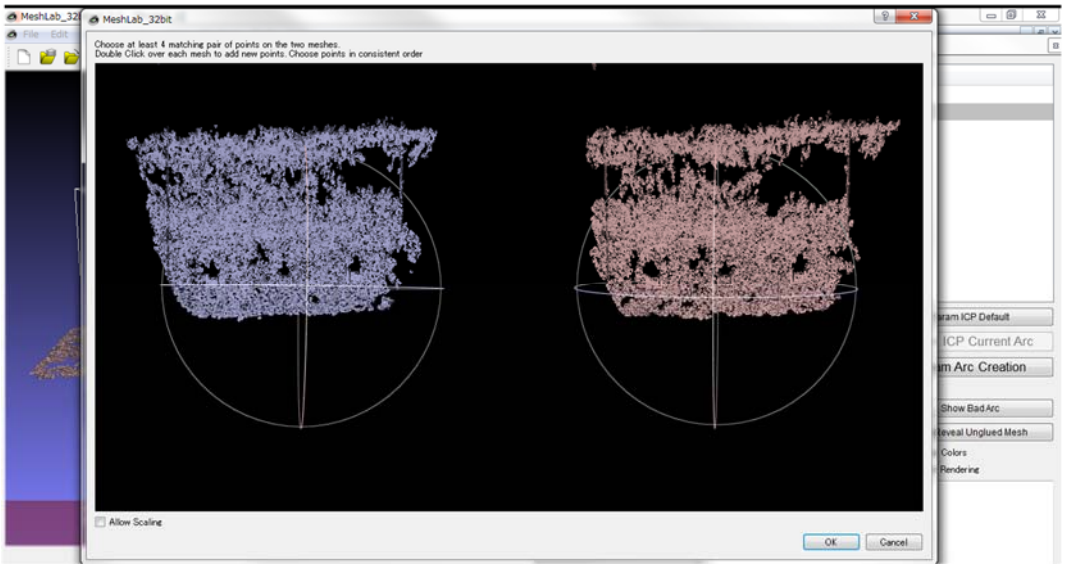


図16

3. 重ね合わせたい部分をダブルクリックし, Allow scaling にチェックを入れ, OK を選択. この時，なるべく多くの点をとることが望ましい.

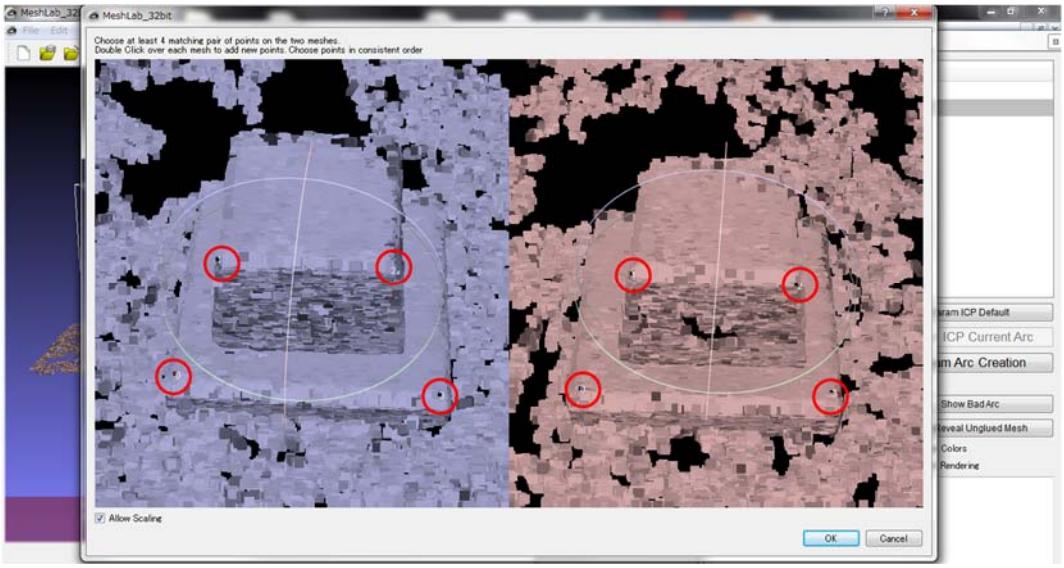


図17

4. レジストレーション完了．中央のアンカーが浮いているのが確認できる.

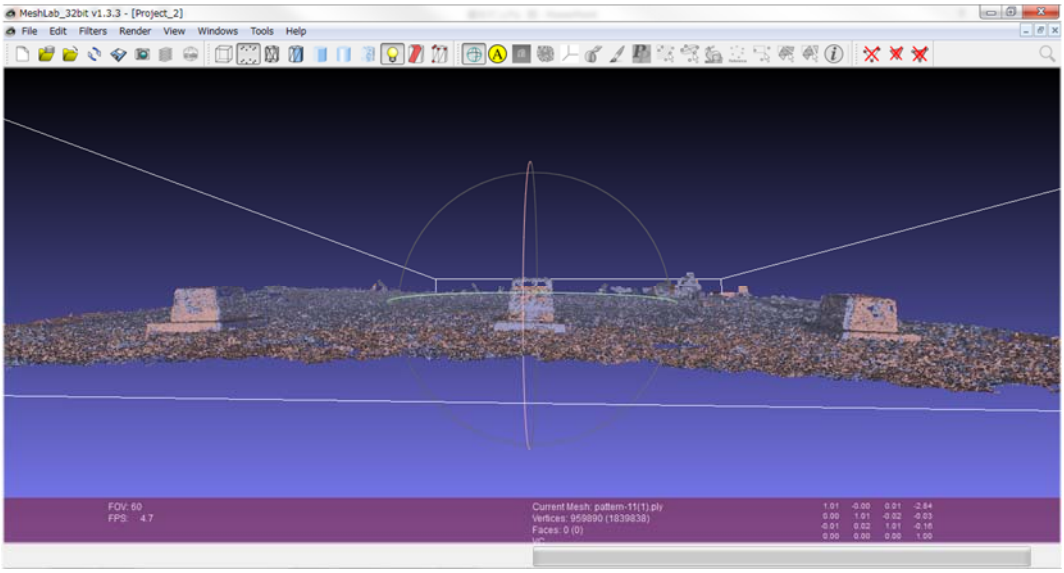


図18

付録B　３次元形状復元のための構造物撮影マニュアル（案）

本資料の目的

3次元形状復元では，撮影した時点での対象物の形状を定量的に把握することができる．そのため，経年劣化等による対象物の変状を把握し，作られた当初の形状と比較することで，維持管理に役立てることができる．本撮影マニュアルは，誰でも3次元形状復元ができる画像を取得するための撮影方法等を載せている．また，3次元形状復元を行うことで，以下の項目を実施できる．

(1) 品質管理の確認

施工完了時点で対象とする建築物等を 3 次元形状で復元し，どの程度の精度でできあがったか，設計図と比較して，品質管理を行うとともに以後の資料とすることができる．

(2) 維持保全の検討

建築物等は完成すると，その時点から劣化，損傷が始まる．それらの補修には，設計図が取り出され，どの程度の変化等があるか確認し，最適な補修方法が検討されるが，その際に対象物の形状が定量的に把握されていれば，容易に変状の把握ができる．

撮影計画

3次元形状復元を行う目的が，経年劣化等を確認することならば，変化していく状態を常に把握することは非常に難しいので，どの程度の時間間隔で撮影し，復元を行うのかを計画しておかなければならない．

この撮影計画は，建物の種類や規模等を十分に考慮して，あらかじめ撮影する時期を決めておき，急遽撮影するといったことがないようにする必要がある．

撮影器具

3次元形状復元用の撮影カメラはデジタルカメラを用いる．また，撮影画像を保存するSDカード等の記録媒体も必要である．場合によっては，三脚・テープなどその他の必要な器具を揃え，撮影に支障のないようにしなければならない．

復元に必要とされる画質レベル等から**表-1**に示す仕様等を満足するのが望ましい．

表-1　最低限必要なカメラの仕様

仕様項目	内容
総画素数	100万画素以上
記録画素数	1024×768 [pix] 以上
ファイル形式	JPEG
レンズ	標準レンズ※1 （超広角レンズや魚眼レンズは禁止）

※1 標準レンズではない場合は，取得した画像のゆがみを補正しなければならない．

撮影方法・注意等

撮影は，対象となるものの大きさや目的によって変化させる必要がある．表-2に撮影対象のサイズによって違う撮影基準を示す．

また，撮影対象が光っていたり，光が反射していたり，真っ白なもの，常に動いたりするようなもの（草むら等）は復元できないことに注意する必要がある．さらに，復元対象に撮影者の影が入ったりすると復元できないことがある．

撮影は誰でも簡単にできるが，不用意な操作による撮影ミスもあるので注意を要する．撮影ミスを防ぐために以下の項目に注意する．

・両脇を軽く締め，シャッターは指の腹で静かに押す
・指が画像内に入らないようにするために，レンズ周りに指を添えない

3次元形状復元は，**図-1**に示すようにそれぞれの画像で対象物が重なっている部分がないと復元できないことに注意する．また，**図-2**のようにカメラと撮影対象を結んだ各直線同士が30°以内にならないといけない．3次元形状復元は最低3枚あれば復元できるが高精度な復元はできないので，できるだけ多くの枚数を用いる．

表-2　撮影基準

対象の形状	対象のサイズ	撮影方法	摘要
立体	小さいもの (高さが1m以下)	**図-3**	対象全体が画像の中に入るように撮影する．また，撮影対象を中心として，距離を一定に保ったまま撮影するのが望ましい．
	大きいもの (高さが1m以上3m以下)	**図-4**	対象全体が入っている画像を用いても精度の高い復元はできない．よって，撮影方向を変化させずに，対象物から2～3m程度の距離を保持したまま撮影していき，小範囲を撮影した画像を多く用いることによって全体を復元するようにする．高いところの撮影が難しい場合は，撮影方向を上方向にずらして撮影する．
平面	小さいもの	**図-5**	対象全体が画像の中に入るように撮影する．
	大きいもの	**図-6**	対象全体が入っている画像を用いても精度の高い復元はできない．よって，撮影方向を変化させずに，対象物から2～3m程度の距離を保持したまま撮影していき，小範囲を撮影した画像を多く用いることによって全体を復元するようにする．高いところの撮影が難しい場合は，撮影方向を上方向にずらして撮影する．

※高さが3m以上のものを復元させるには，高い場所から撮影できるような特殊な器具を用いなければ精度の高い復元は難しい．

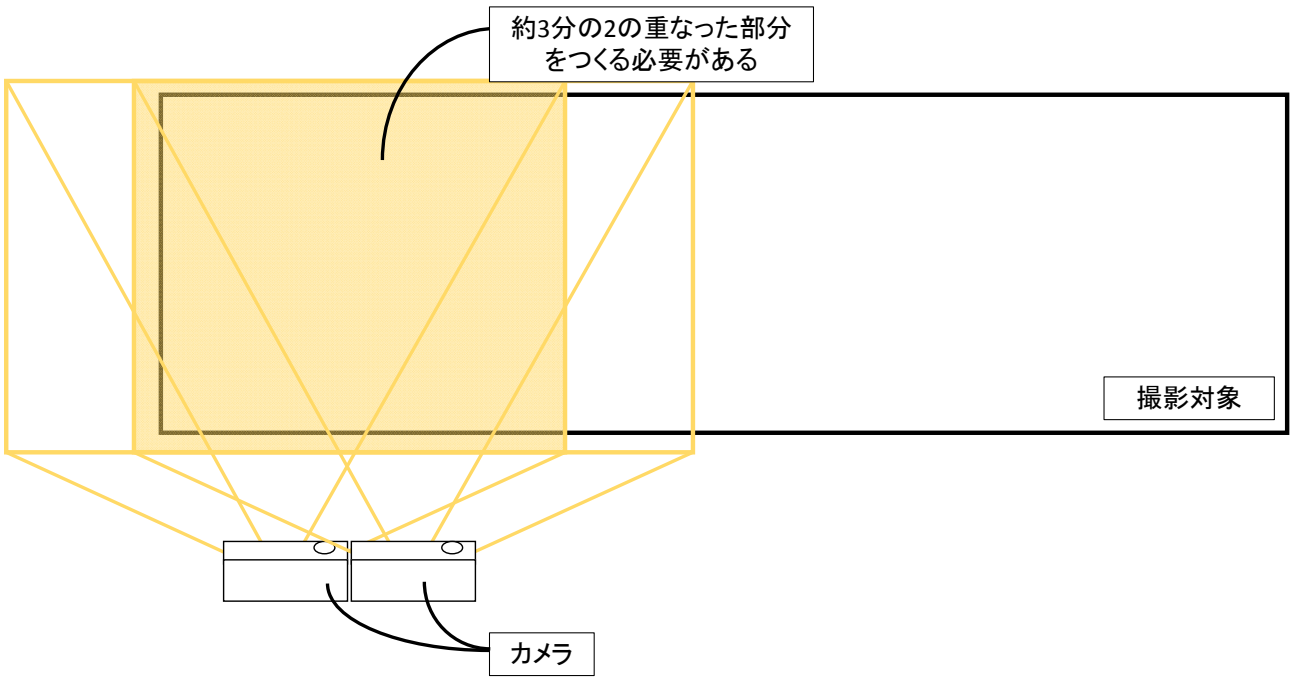


図-1　注意事項1（画像を重ねる）

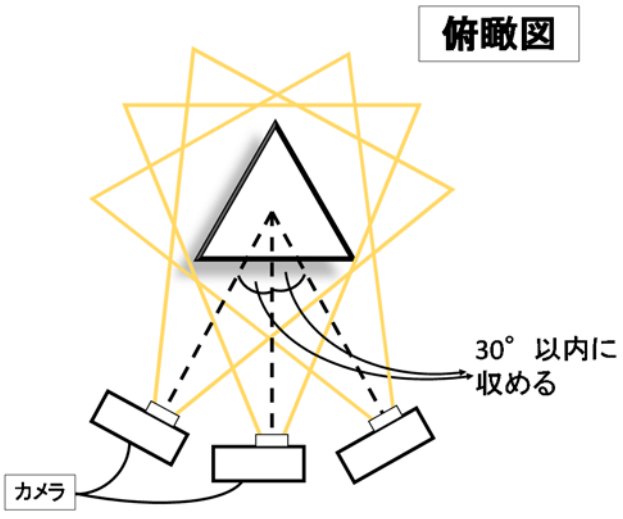
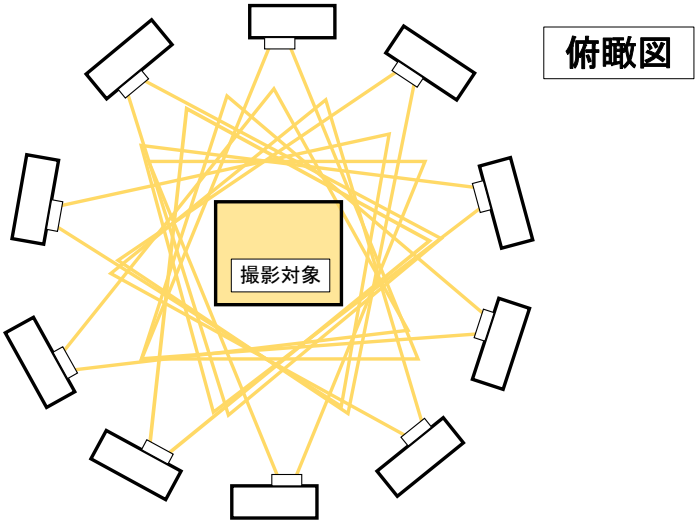
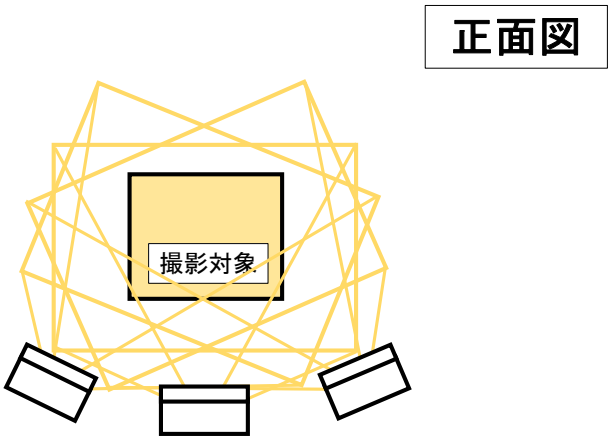


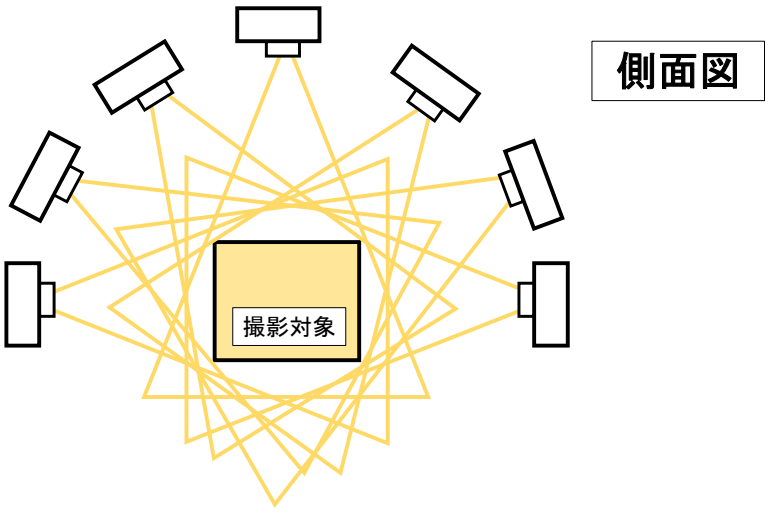
図-2　注意事項2（撮影角度）



(a) 俯瞰図

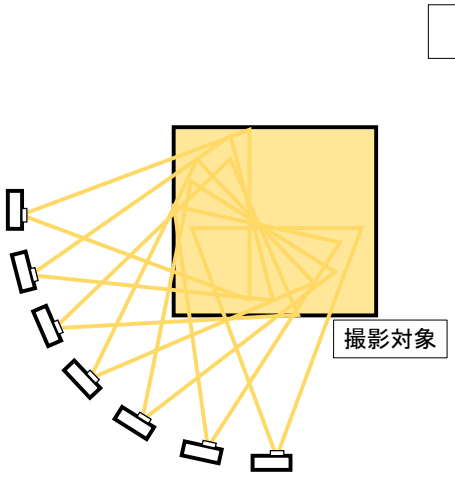


(b) 正面図

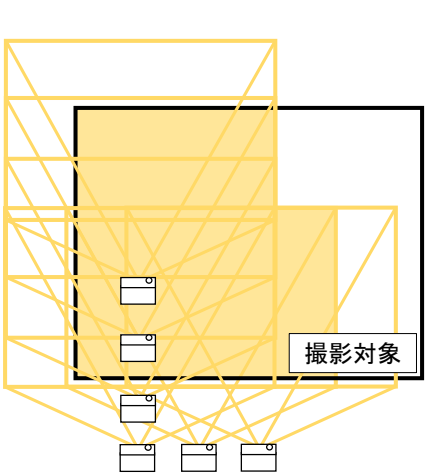


(c) 側面図

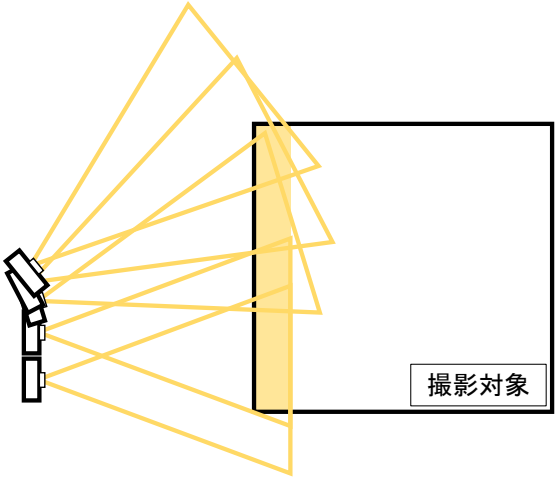
図-3　撮影対象（立体）が小さい場合の撮影



(a) 俯瞰図

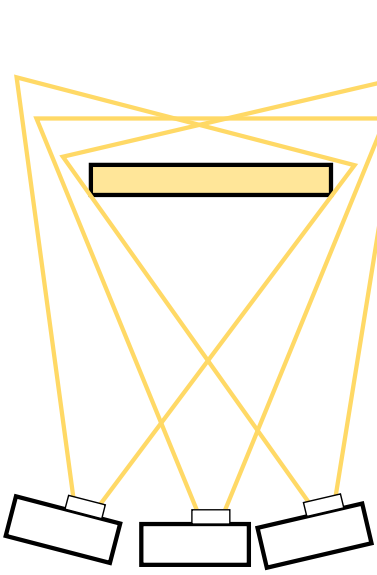


(b) 正面図

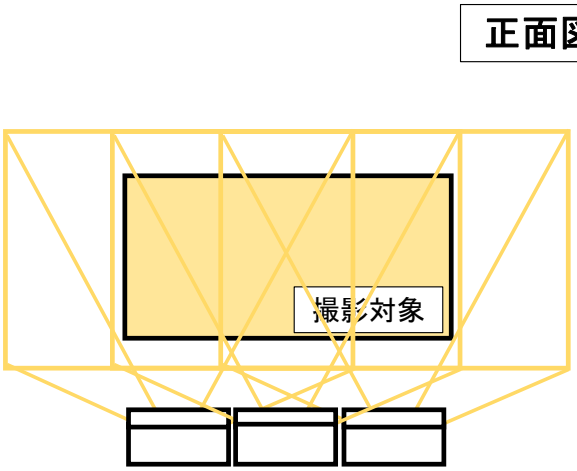


(c) 側面図

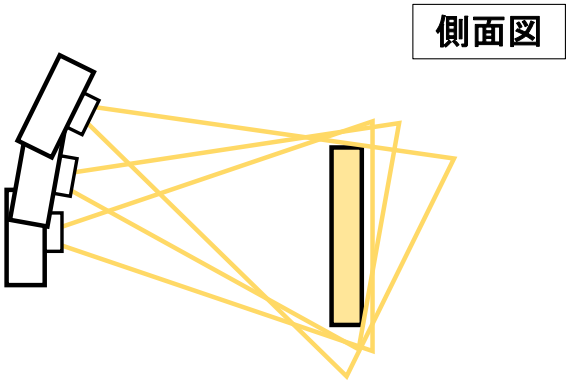
図-4　撮影対象（立体）が大きい場合の撮影



(a) 俯瞰図

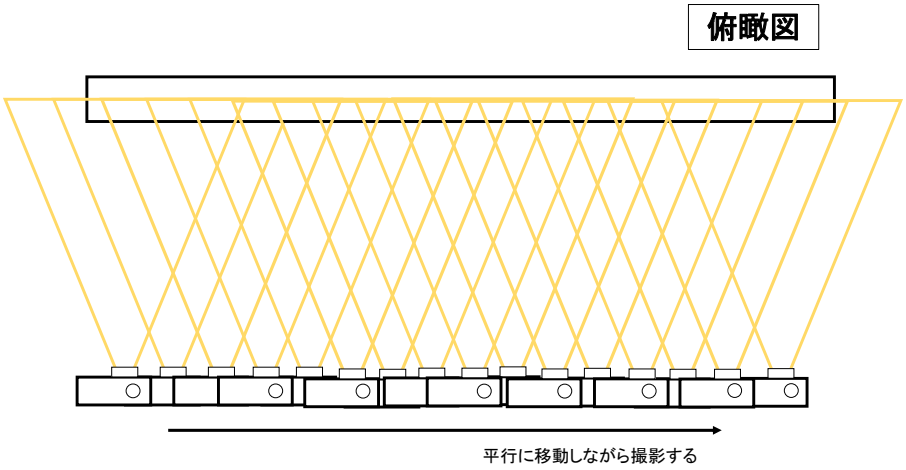


(b) 正面図

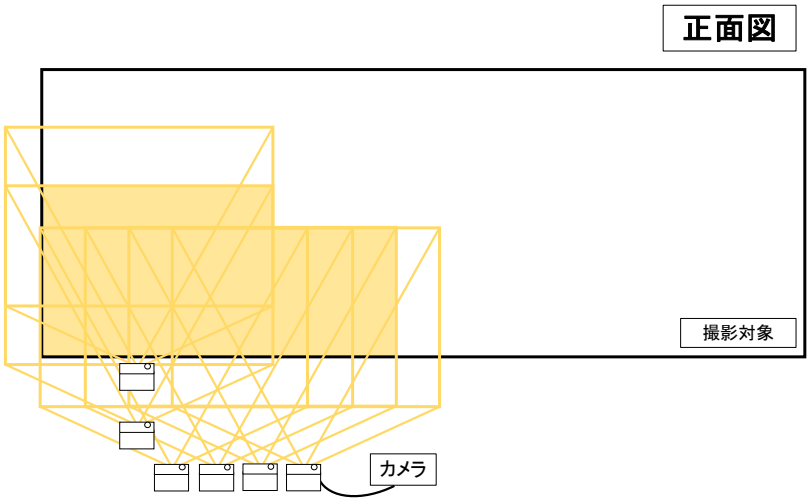


(c) 側面図

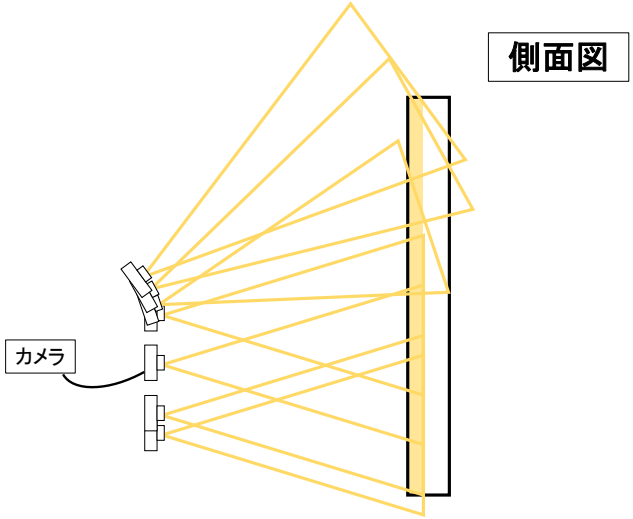
図-5　撮影対象（平面）が小さい場合の撮影



(a) 俯瞰図



(b) 正面図



(c) 側面図

図-6　撮影対象（平面）が大きい場合の撮影

DETECTION OF THE DEFORMATION AND CONDITION CHANGES OF STRUCTURES BY 3D POINTS CLOUDS OBTAINED BY PHOTOGRAPHS

Koji ICHII[1)], Toru TAMAKI[1)], Takashi FUJII[1)]

[1)]Graduate School of Engineering, Hiroshima University

In this study, the method to measure the deformation for various types of structures with 3D shape reconstruction by image analysis is examined. In the image analysis, SIFT (Scale Invariant Feature Transform) is used to detect the corresponding points in several photographs, and the location of camera were back-calculated in the process of 3-D shape reconstruction. Based on the field test and model test, most appropriate conditions to take photographs from the viewpoint to obtain the information in periodic maintenance are summarized as the proposal. The accuracy of the measurement by the reconstructed shape is also examined. These practical summaries can be used as the fundamental knowledge in the application of image analysis for maintenance purpose.

.

KEYWORDS*: *3-D Points clouds, shape reconstruction, photographs, registration, SIFT.

様式－３－３

DETECTION OF THE DEFORMATION AND CONDITION CHANGES OF STRUCTURES BY 3D POINTS CLOUDS OBTAINED BY PHOTOGRAPHS

Koji ICHII[1)], Toru TAMAKI[1)], Takashi FUJII[1)]

[1]Graduate School of Engineering, Hiroshima University

In this study, the method to measure the deformation for various types of structures with 3D shape reconstruction by image analysis is examined. In the image analysis, SIFT (Scale Invariant Feature Transform) is used to detect the corresponding points in several photographs, and the location of camera were back-calculated in the process of 3-D shape reconstruction. Based on the field test and model test, most appropriate conditions to take photographs from the viewpoint to obtain the information in periodic maintenance are summarized as the proposal. The accuracy of the measurement by the reconstructed shape is also examined. These practical summaries can be used as the fundamental knowledge in the application of image analysis for maintenance purpose of civil-engineering structures.

.

KEYWORDS**:** *3-D Points clouds, shape reconstruction, photographs, registration, SIFT.*

様式－３－２

研　究　成　果　の　要　約

助成番号	助　成　研　究　名	研　究　者・所　属
第2014-01号	写真画像から形状復元した3次元点群データによる構造物の変状把握	一井康二（広島大学） 玉木徹（広島大学） 藤井堅（広島大学）

＜研究目的＞

現場写真の画像解析により，3次元点群データとして構造物の形状把握を行うことが近年では可能となってきた。これは，一般のデジタルカメラ撮影を用いて，撮影位置を特定しないスナップ写真でも実施可能である。

しかし，構造物によって変状の着目点が異なるため，適切な画像の撮影条件（撮影枚数や撮影角度）は異なる。

そこで，本研究では，各種の構造物に対し，適切な撮影条件を検討し，維持管理のための変状把握手法の体系化を行う。

＜研究手順＞

本研究では，以下の構造物を対象とした。

・水平面に近い構造物：道路路面
・鉛直壁面に近い構造物：
　盛土や切土等の法面，岸壁，石積み擁壁
・腐食劣化する構造物：橋梁躯体，欄干

撮影方法の検討として，条件が異なる画像を用いて，形状復元を試みた．そして，成功例を形状把握精度の指標とともに例示し，形状復元のための撮影マニュアルを作成した。

精度の検討においては，模型実験によって直接測定した変形量と解析で得られた変形量の比較を行った。さらに，形状把握結果を用いた強度解析等の可能性も検討し，成功例を例示した。

＜研究成果＞

例として，コンクリート擁壁の形状復元結果を図１に示す。植物に覆われた上部を除き，形状復元に成功しており，側面図からわかるように凹凸等の変状把握が可能である．変状把握精度は撮影条件によるが，ラジコンヘリからの動画撮影画像を用いたアンカー壁面の例で，アンカー間距離の誤差は2.2%である．

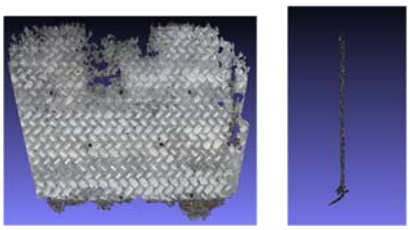


図１　コンクリート擁壁の形状復元事例
（正面および側面）

種々の構造物を対象に同様の検討を行い，成功例をもとに，撮影方法の提案を行った。提案内容の抜粋を図２に記す。

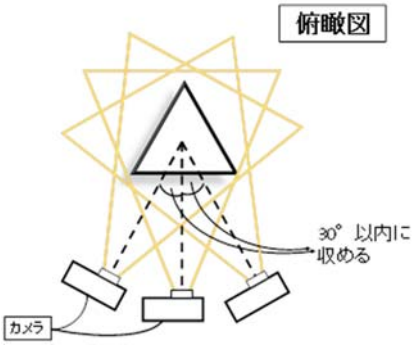


図２　撮影方法の提案内容の例

また，腐食状況を把握する目的での極小範囲の形状復元にも成功し，腐食による肉厚減少の状況をもとに，残存強度の数値解析を行えることも確認した．

＜今回の研究の新規性・成果の活用＞

本研究では，３次元形状復元のプログラム自体を新規開発したものではないが，種々の適用事例を，期待できる復元精度とともに提示した点に新規性がある．本研究の報告書は，今後の実務における画像解析技術の普及への寄与が期待される。