

立体的な構造物の3次元点群モデルを構築するための 撮影手法に関する基礎的検討

The Photographing Method for Constructing 3D Point Cloud Models of Three-Dimensional Structures

北見工業大学 工学部
北見工業大学 工学部
北見工業大学 工学部

○学生会員 吉田 明輝(Meiyo Yoshida)
正会員 宮森 保紀(Yasunori Miyamori)
正会員 齊藤 剛彦(Takehiko Saito)

1. はじめに

近年, SfM(Structure from Motion)技術を用いた3次元モデルの自動生成技術等により, 3次元モデルの土木構造物の維持管理への適用可能性が高まっている¹⁾。例えば, 対象構造物を UAV から静止画で撮影した例としては, 工藤ら²⁾はコンクリート製擁壁の面外方向の変状について, 大石ら³⁾は海岸堤防の劣化状態について検討している。これらの研究では, 撮影時に画像の重なりであるラップ率が考慮されている。

ラップ率は空中写真測量では撮影コース内の写真の重複部分と定義されている⁴⁾。しかしながら, 構造物単体を撮影する場合, その撮影範囲は空中写真測量と比べて極小であり, 背景などモデル化対象外のものが撮影されることもある。現状では, 土木構造物の3次元点群モデル作成を目的とした撮影で, 画像における構造物自体の重なりや, 撮影方向, 対物距離などに関する知見の蓄積は不足している。

そこで, 本研究では, 実験室内の撮影実験で供試体の撮影方法を変化させ, 立体的な構造物の点群モデル構築に適した撮影手法を検討したので, その結果を報告する。

2. 発泡スチロール実験供試体の撮影実験と3次元点群モデル構築

2.1 実験供試体と撮影方法

本研究では, 図-1の1辺300mmの発泡スチロール立方体を撮影対象供試体とした。特徴点を増やすために表面に水彩絵具でランダムに模様を付けた。3次元座標を与えるため, 供試体の下面を除き, 各面で対角線上に直径50mmの模様が異なる円形マーカ3枚ずつ, 合計15枚を貼り付けた。

図-2に実験スペースを示す。高さ2550mm, 間口2200mm, 奥行き2600mmであり, 背景を写り込ませないためブルーシートで遮蔽した。照明用ランプ4灯を実験スペース上部のフレームに水平に取付け, ケント紙で直接照射される光を遮った。供試体は高さ630mmの台上に設置した。

表-1に撮影の設定を示す。ケント紙により実験スペースが暗くなったため, 撮影モードはシャッタースピード優先として1/4sに設定し, 絞り値をオートに設定した。また, 画像のノイズを低減するためISO感度を100に設定した。ピントを合わせやすくするために焦点距離は最も広角側の18mmに設定した。

本研究では, 対象物を囲むように撮影する収斂撮影を行う。航空写真測量では写真の重複部分であるラップ率を60%になるように撮影することを推奨している⁴⁾。本研究でも, 背景も含む写真の重複をラップ率として, 鉛直ラップ率を固定し, 水平ラップ率は後述するように, 撮影する供試体の面の数も考慮して変化させた。

撮影時のカメラ位置を図-3に示す。4パターンで3次元点群モデルに適した撮影方法を検討する。全撮影パターンの鉛直ラップ率を90%に統一し, 高さY=15mmを起点として, Y軸方向に30mmずつ変化させながら, 10回撮影する。水平ラップ率は撮影ケースによって変化させた。

予備実験では供試体の1面のみ写る画像(以下1面画像と称する)だけを使用すると, 立体的なモデルが構築できなかった。そのため, 立体的な構造を持つ供試体の点群モ



図-1 実験供試体

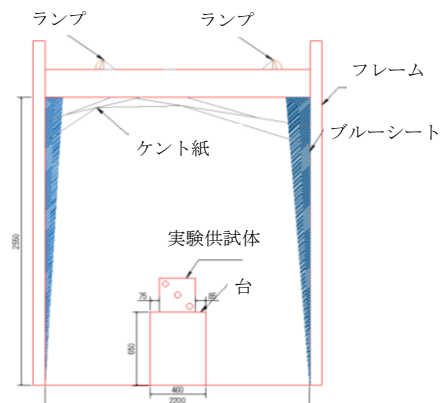


図-2 実験スペース

表-1 撮影の設定

カメラ	SONY α6500
画像サイズ(pixel)	4240×2832(Mサイズ)
モード	シャッタースピード優先
シャッタースピード(s)	1/4
絞り値	オート(3.5程度)
ISO感度	100
焦点距離(mm)	18

デルを構築するには, 供試体の2面が写る画像(以下2面画像と称する)が重要と考えた。従って, パターン1(図-3(a))は撮影された画像すべてが2面画像となるように, 破線に沿って水平ラップ率を0%, 20%, 60%, 70%, 90%の5段階とした。撮影した画像枚数はそれぞれ40枚, 80枚, 120枚, 160枚, 400枚である。具体的な水平ラップ率ごとの撮影位置の組合せは3.1.2項で後述する。

パターン2(図-3(b))は使用ソフトMetashapeのマニュアルが推奨している撮影方法である⁵⁾。具体的には供試体から300mm離れた破線で示す曲線上で撮影した。曲線を24等分し, 撮影位置を決定し, 合計240枚撮影した。

パターン3(図-3(c))は2面画像を多く撮影するため, 供試体に正対するのではなく, 対物距離を一定にし, 撮影方

向と立方体の面に角度を持たせた撮影方法である。具体的には破線に沿って水平ラップ率 60%に設定し、24 箇所撮影した。カメラを供試体に正対させず、距離 300mm、角度 45°、合計 240 枚の画像を撮影した。

実構造物を撮影する際に、すべてを 2 面画像として撮影するのは困難なため、パターン 4(図-3(d))は 2 面画像を減らし、1 面画像を多く取り入れた撮影方法である。具体的には、破線に沿って水平ラップ率 10%とした 8 点の撮影位置と、対物距離を短縮した 4 点で正面、左右 27°の 3 方向で合計 200 枚の画像を撮影した。

上述の基本的な撮影パターンをケース e として、画像枚数や写真構成を変化させた場合の影響を検討するため、パターン 2, 3, 4 では水平方向の撮影位置を減らしたケース(a~d)も設定した。各ケースの撮影位置は 3.1.2 項で後述する。

2.2 3次元点群モデルの構築と評価方法

表-2 のモデル構築手順により、上述の方法で撮影した画像を用いて点群モデルを構築した。使用したソフトウェアは Agisoft 社の Metashape(ver.1.6.5.11249)である。手順 3 と手順 8 では解析時の精度を「高」とした。また、モデルの精度は供試体に貼り付けたマーカーの座標で評価する。具体的な計算は式(1)の RMS(平均 2 乗平方根)誤差を用いる。

RMS 誤差=

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{(x_{pci} - x_{mi})^2 + (y_{pci} - y_{mi})^2 + (z_{pci} - z_{mi})^2\}} \quad (1) \\ (i=1, 2, \dots, n)$$

ここで、 x_{pc} , y_{pc} , z_{pc} は点群モデルにおけるマーカーの座標、 x_m , y_m , z_m は供試体におけるマーカー座標の実測値、 i はマーカーの番号、 n はマーカーの枚数である。

なお、本研究では、奥行きがある場合のモデル化について検討するため、供試体の上面には特に注目しないこととし、側面の 12 枚のマーカーについて評価する。モデル構築の安定性を確認するため実験を 3 回行い、RMS 誤差の最小値で評価する。

3. 3次元点群モデルに適した画像と撮影方法の検討

3.1 構築した 3次元点群モデルの精度

3.1.1 供試体の 3次元点群モデル

図-4 は各撮影パターンで画像枚数が最多のケース e の点群モデルを示す。実物の供試体と比較すると、点群モデルの面のズレや模様の欠損はなく、3次元点群モデルは適切に作成できた。しかし、撮影パターンによらずモデルの上辺にブルーシートや反射された光と思われる青や白のノイズが発生している。ノイズについては 3.3 節で述べる。

3.1.2 点群モデルの RMS 誤差

SfM では、精度の良いモデル生成において必要十分な画像を選択するのは難しい研究領域のひとつと考えられる。そこで、2.1 節で述べた 4 つの撮影パターンについて、撮影位置の組合せを変え、1 つの撮影パターンにつき 5 つの撮影ケースを設定し、モデル構築に必要な総画像、2 面画像および 1 面画像の枚数を検討する。撮影位置の詳細とモデル構築結果を表-3 で示す。なお、モデル構築結果については 3 回の撮影で 3 回ともモデルが構築できたものを○、3 回ともできなかったものを×、3 回中 2 回モデル構築ができたものを△とした。

表-3 で示したように撮影パターンごとに 5 ケース、合

表-2 3次元点群モデル構築手順

手順	作業内容	設定
1	画像追加	-
2	カメラキャリブレーション	-
3	画像のアライメント	精度：高
4	マーカー検出	-
5	不要なマーカーを削除	-
6	マーカーの座標値入力	-
7	モデル化する領域を指定	-
8	高密度ポイントクラウド	品質：高

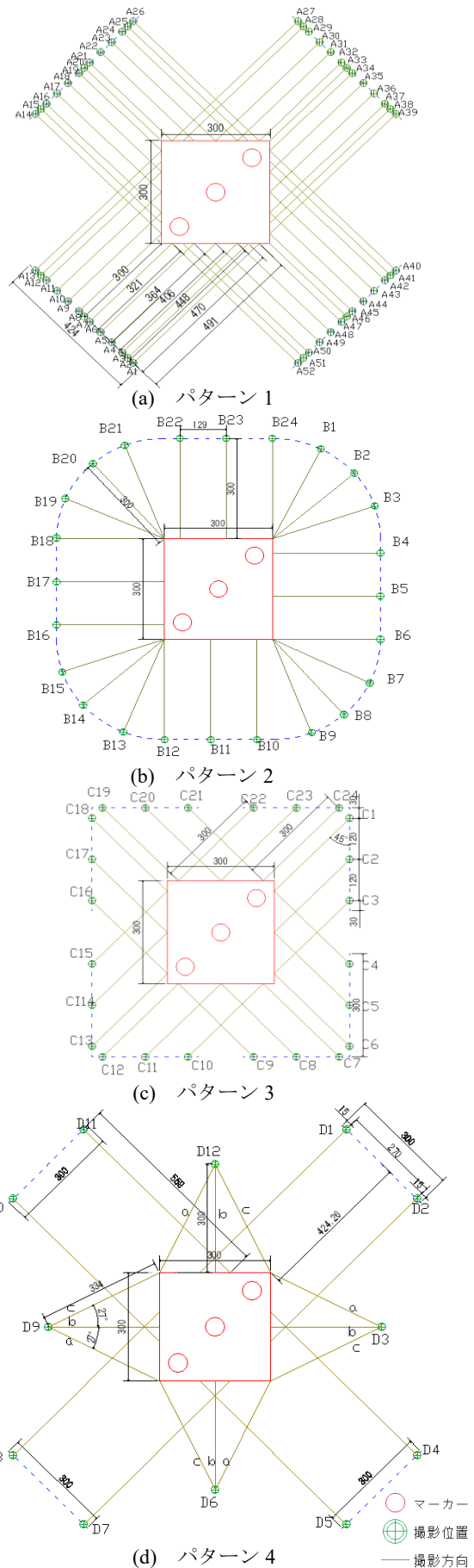


図-3 4つの撮影面に対する平面上的撮影位置

計 20 ケースの撮影位置の組合せを設定した。

パターン 1(図-3(a))では、水平ラップ率 0%, 20%のケース 1a, 1b では安定してモデルを構築できなかった。原因としては画像枚数が不十分であったと考えられ、枚数が多いケース 1b でも撮影する位置やカメラの向き、傾きのわずかなばらつきにより結果が安定しなかった。水平ラップ率を 60%, 70%, 90%にしたケース 1c, 1d, 1e では RMS 誤差が 1.10mm 未満のモデルが構築できた。

パターン 2(図-3(b))では、基本となるケース 2e に対して、ケース 2a~2d は総画像枚数を半分の 120 枚とした。ケース 2a は 1 面画像のみとなる撮影位置とした。ケース 2b, 2c は 1 面画像と 2 面画像が両方含まれるように撮影位置を組み合わせた。また、ケース 2d はすべて 2 面画像となるようにした。ケース 2a~2c ではモデルが構築できなかった。原因は 2 面画像が少なかつたと考えられる。2 面画像を増やしたケース 2d では RMS 誤差が 1.07mm モデルを構築できた。また、すべての画像を使用したケース 2e では RMS 誤差が 1.10mm のモデルが構築できた。

パターン 3(図-3(c))では、全ての撮影位置が含まれる基本となるケース e に対して、ケース 3a~3d は 2 面画像の枚数を半分の 80 枚とした。ケース 3a は 2 面画像のみとなる撮影位置である。ケース 3b と 3c はそれぞれ供試体に対し左右となる撮影位置である。ケース 3d は 1 面画像と 2 面画像の枚数が同等なるように組み合わせた。ケース a は 2 面画像のみでモデル構築ができたが、RMS 誤差が 2.15mm で大きかった。一方、1 面画像を増やしたケース 3d では撮影したすべての画像を使用したケース 3e と同程度のモデルが構築できた。ケース 3b と 3c については、撮影位置は供試体の左右両面の片面に集中的に撮影するようにしたため、モデルを構築できなかったと考えられる。

パターン 4(図-3(d))では、基本となるケース 4e に対して、ケース 4a はすべて 1 面画像からなる撮影位置とした。ケース 4b~4d は 2 面画像を一定にし、1 面画像が 40 枚ずつ増加するように撮影位置を組み合わせた。ケース 4a では 2 面画像がなかったため、モデル構築ができなかったと考えられる。ケース 4b~4e ではモデルが構築できた。

20 ケース全体について検討すると、モデルが構築できたケースでは RMS 誤差が 1mm ないし 2mm 程度であった。RMS 誤差が最も良いモデルはケース 4b の 1.02mm だった。パターン 3 およびパターン 4 のモデル構築結果から奥行きがある物体の 3 次元点群モデル構築では、2 面画像のみではなく、正面からの画像との組合せによってもモデ

ルが構築できることが分かった。さらに、ケース 1b~1c ではラップ率に差があったが、モデルが構築できた。ケース 3b, 3c, 3e ではラップ率が同様であったが、モデルが構築できないケースがあり、2 面画像の枚数によってモデル構築結果が変わった。故に、立体的なモデルの構築においては、ラップ率だけではなく、画像中の構造物の面の数も影響があると考えられる。

3.2 2 面画像の枚数と 3 次元点群モデル精度の関係

3.1.2 項で示した表-3 では 2 面画像の枚数が同じにもかかわらず、ケースによってモデル構築の成否が分かれた。そこで、2 面画像の増減の影響について検討した。図-5 は表-3 に基づく 2 面画像枚数と RMS 誤差の関係である。

図-5 では撮影パターンによらず 2 面画像が 80 枚より少ない場合、モデルが構築できなかった。2 面画像を 120 枚以上使用したケースでは、RMS 誤差 1.1mm 程度のモデルが構築できた。しかし、2 面画像の増加はそれ以上の精度の向上に繋がらなかった。

2 面画像を 80 枚使用した場合では、モデルが構築できるケースとできないケースがあった。2 面画像で撮影された左右の面は、必ずしも同じ面積比ではなく、2 面のうち片面が大きく撮影された画像もある。ケースによってそのような画像が含まれる割合が異なり、モデル構築に影響を

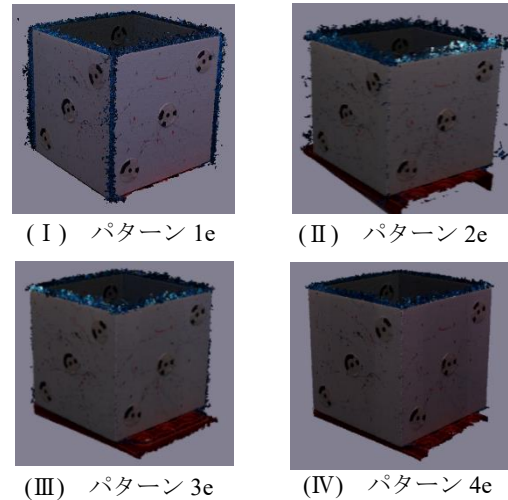


図-4 構築した 3 次元点群モデル

表-3 撮影位置の組合せとモデル構築結果

撮影方法	ケース	撮影位置の組合せ	ラップ率(%)	1 面画像(枚)	2 面画像(枚)	総画像(枚)	構築結果	RMS 誤差の最小値(mm)
パターン 1	a	A2, A5, A8, A11	0	0	40	40	×	×
	b	A1, A3, A4, A6, A7, A9, A10, A12	20	0	80	80	△	2.31
	c	A2, A7, A12, A15, A20, A25, A28, A33, A38, A41, A46, A52	60	0	120	120	○	1.06
	d	A1, A5, A9, A13, A14, A18, A22, A26, A27, A31, A35, A39, A40, A44, A48, A52	70	0	160	160	○	1.08
	e	A2, A7, A12, A15, A20, A25, A28, A33, A38, A41, A46, A52 を除く全て	90	0	400	400	○	1.07
パターン 2	a	B4~B6, B10~B12, B16~B18, B22~B24	-	120	0	120	×	×
	b	B2, B4, B6, B8, B10, B12, B14, B16, B18, B20, B22, B24	-	80	40	120	×	×
	c	B1, B3, B5, B7, B9, B11, B13, B15, B17, B19, B21, B23	-	40	80	120	×	×
	d	B1~B3, B7~B9, B13~B15, B19~B21	-	0	120	120	○	1.07
	e	B1~B24	-	120	120	240	○	1.10
パターン 3	a	C2, C5, C8, C11, C14, C17, C20, C23	0	0	80	80	○	2.15
	b	C4~C6, C10~C12, C16~C18, C22~C24	60	40	80	120	×	×
	c	C1~C3, C7~C9, C13~C15, C19~C21	60	40	80	120	×	×
	d	C1, C3, C4, C6, C7, C9, C10, C12, C13, C15, C16, C18, C19, C21, C22, C24	20	80	80	160	○	1.07
	e	C1~C24	60	80	160	240	○	1.07
パターン 4	a	D3, D6, D9, D12(abc すべて)	-	120	0	120	×	×
	b	D1, D2, D4, D5, D7, D8, D10, D11	10	0	80	80	○	1.02
	c	D1, D2, D4, D5, D7, D8, D10, D11, D3b, D6b, D9b, D12b	-	40	80	120	○	1.07
	d	D1~D12, (D3b, D6b, D9b, D12b を除く)	-	80	80	160	○	1.08
	e	D1~D12 (D3, D6, D9, D12 は abc すべて)	-	120	80	200	○	1.11

与えたと考えられる。また、モデル構築ができたケース 1b, 3a, 4b について、ケース 1b と 3a では RMS 誤差が 2mm 程度と大きかった。一方、ケース 4b では全ケース中 RMS 誤差が最もモデルを構築できた。RMS 誤差に大きなばらつきが生じた原因としては、カメラの被写界深度と関係して以下のように考察できる。

被写界深度はカメラのピント面の前後の人間の目にボケとして写らない範囲であり、対物距離が遠いほど被写界深度の範囲を広くすることができる⁹⁾。すなわち、対物距離が遠いほど、鮮明な画像が撮影されやすくなる。上述の 3 ケースでは、ケース 4d の対物距離が最も遠い 558mm、ケース 1b と 3a ではそれぞれ 470mm と 300mm であった。そのため、画像に鮮明に映る範囲が異なり RMS 誤差にばらつきが生じたと考えられる。一方、対物距離が遠すぎると解像度が下がり精度が低下する。このため、ある撮影対象について、適切な対物距離があると考えられる。本研究では、ケース 4b の対物距離が適切であったと考えられる。

以上より、3 次元形状を持つ供試体の点群モデルを構築するには 2 面画像の多少はモデル精度および構築結果に影響がある。また、2 面画像において、撮影する面の割合が重要であると考えられる。さらに、一定の画像枚数になると、画像の枚数を増加させてもモデル精度がほぼ変わらないことが分かった。

3.3 対物距離の多様化とノイズへの影響

3.1.1 項で述べたように図-4 の点群モデルにはノイズが付着していた。この節ではノイズについて検討する。

写真測量では、十分に 3 次元的な広がりを持つ対象域に対して、複数枚の収斂写真を異なった κ 回転で撮影することにより、3 次元的な既知点を設置することなくセルフキャリブレーションで、外部定位、内部定位および付加パラメータが修復可能とされている⁷⁾。つまり、カメラを回転させていることは対物距離が変化していると考えられる。そこで、多様なカメラの対物距離を持つ撮影パターンではノイズが少ないと考え、表-3 の結果に基づき検討した。

図-6 はモデルが構築できた撮影ケースについて、対物距離ごとの写真枚数とノイズ量を示す。棒線は撮影ケースの対物距離ごとの画像枚数を表し、折れ線はノイズ量である。ノイズ量はブルーシート等モデル以外の点の数である。算出方法は、点群モデルのうち、実験供試体の XYZ 座標に関する領域を指定し、領域に属する点群を供試体の点群として、総点群数から供試体点群数を引いたものをノイズ量とした。XYZ 座標の領域は式(2)のように定義した。

$$0 < X < 300 \text{ mm} \cap 0 < Y < 300 \text{ mm} \cap -300 < Z < 0 \quad (2)$$

図-6 で示したように、複数の対物距離からなるケース 1c~1e, 4c~4e, ではノイズ量が少なく、対物距離を一定にしたケース 3a, 3d, 3e ではノイズ量が多かった。また、対物距離が一定のケース 1b, 2d, 2e, 4b でもノイズ量は少なく、ケース 4b は全ケースで最少だった。このうちケース 1b のノイズ量は少ないが、モデルの RMS 誤差は大きく、点群モデルの形状自体が不正確でノイズ量が適切に計算できていない可能性がある。ケース 2d と 2e は、撮影位置が曲線上だったため、撮影時のカメラの向きなどで対物距離に若干のばらつきがあったと考えられる。ケース 4b は、3.2 節で述べたように対物距離が適切だったため、モデル化に適した画像が撮影されたと考えられる。

以上より、カメラの対物距離を多様化させることでノイズを減少させられることが分かった。一方、対物距離が一定であっても、ノイズ量が少ないモデルを構築できることもある。しかし、この場合は適切な対物距離をあらかじめ知る必要がある。確実にノイズ量が少ないモデルを構築するには多様な対物距離を含む撮影方法を用いた方がよいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ラップ率だけではなく、構造物が写ってい

る面の数もパラメータの 1 つとし、長さ 300mm の発泡スチロール立方体を実験供試体として、点群モデルに適した画像および撮影手法を検討した。本研究で得られた結果を以下に述べる。

- 1) 3 次元形状を持つ供試体の 3 次元点群モデルを構築する際には、ラップ率だけでなく、供試体の 2 面画像も考慮すべきと考えられる。
- 2) 2 面画像の多少はモデル精度および構築結果に影響あると考えられる。しかし、一定の画像枚数になるとモデル精度がほぼ変わらないことが分かった。
- 3) 多様な対物距離で撮影する画像を用いることで、ノイズ量が減少することが分かった。

今後の課題としては、本研究は簡単な供試体を用いて検討したが、今後は 3 面を対象とした場合や、より複雑な条件での撮影方法について検討し、実構造物への適用について検討する。

謝辞：本研究は、科学研究費 基盤(C)課題番号 21K04230 の助成を受けて実施しました。川田テクノロジー株式会社の林篤史様、岡本勇也様、大日本コンサルタント株式会社の小林大様には、研究に関する有益な助言をいただきました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 新名ら：多視点画像三次元モデルの土木構造物維持管理への適応に向けた提案と試行結果，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，Vol. 74, No. 2, I_19-I_30, 2018.
- 2) 工藤ら：ドローンで撮影した画像を用いたコンクリート製補強土壁の 3 次元点群モデル構築実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 77 号，F-06, 2021.
- 3) 大石ら：UAV を使った低空画像解析による海岸堤防の劣化状態の検出，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 71, No. 2, pp. I_1717-I_1722, 2015.
- 4) 日本写真測量学会編：三次元画像計測の基礎バンドル調整の理論と実践，東京電機大学出版局，2016.
- 5) Agisoft : Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.5, https://www.agisoft.com/pdf/metashapepro_1_5_en.pdf, 2019.
- 6) 安藤幸司：カメラとレンズのしくみがわかる光学入門，株式会社インプレス，2019.
- 7) 日本写真測量学会・解析写真測量委員会：解析写真測量改訂版，社団法人日本写真測量学会，1983.

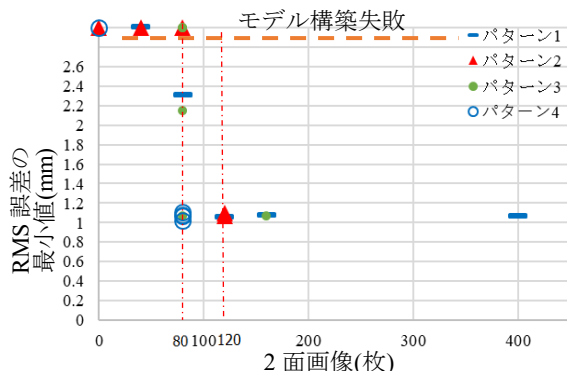


図-5 2 面画像の枚数と点群モデル精度の関係

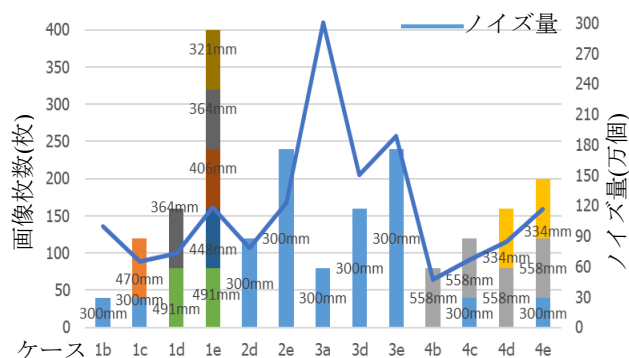


図-6 画像の対物距離とノイズ量
(棒線の数値と色は対物距離の違いを示す)