



PLATEAU
by MLIT

PLATEAU Technical Report
3D都市モデル活用のための技術資料



多方向カメラによる効率的なLOD3モデル整備手法の
調査 技術検証レポート

Technical Report on 3D City Model Development Method for LOD3 Building Models Using
Oblique Cameras

series No. **117**

目次

1. 調査の概要	- 1 -
1-1. 現状と課題.....	- 1 -
1-2. 課題解決のアプローチ	- 4 -
2. 空中写真の撮影条件にもとづく建築物モデル LOD2 テクスチャ品質の調査.....	- 6 -
2-1. 調査目的	- 6 -
2-2. 調査内容	- 6 -
2-3. 調査方法	- 6 -
2-4. 調査結果	- 7 -
2-4-1. 壁面テクスチャの鉛直解像度に影響するカメラパラメータの特定	- 7 -
2-4-2. 各撮影重複度において妥当な鉛直解像度を得るのに適したカメラの把握	- 9 -
2-4-3. 垂直カメラと多方向カメラによる壁面テクスチャ画像の品質比較	- 13 -
3. 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の調査.....	- 19 -
3-1. 調査目的	- 19 -
3-2. 調査内容	- 19 -
3-3. 調査方法	- 19 -
3-4. 調査結果	- 21 -
3-4-1. LOD3 モデルの試作	- 21 -
3-4-2. LOD3 モデリング成果の位置正確度の検証	- 28 -
3-4-3. LOD3 モデリングによる形状再現度の検証	- 35 -
3-4-4. 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の評価	- 50 -
4. 多方向カメラ画像によって整備した 3D 都市モデルを公共測量成果とするための要件整理	- 52 -
4-1. 調査目的	- 52 -
4-2. 調査結果	- 52 -
5. 成果と課題	- 54 -
5-1. 本調査・検討で得られた成果	- 54 -
5-2. 今後の課題と展望	- 55 -

1. 調査の概要

1-1. 現状と課題

3D 都市モデル整備では、都市全域を網羅的に測量することが可能である空中写真撮影成果を用いることが一般的である。国土交通省都市局では、最初に地方公共団体が整備する 3D 都市モデルとして基本セット 1 を推奨しているが、これに含まれる建築物モデル LOD2 は屋根形状を再現したテクスチャ付きのモデルとなっており、リアリティを持たせるため空中写真測量成果をもとに作成されることがほとんどである。また、3D 都市モデルのユースケース開発の多様化が進み、建築物モデル LOD2 よりもさらに詳細度の高い建築物モデル LOD3 の整備機会も増えてきている。

2023 年度に調査した「多方向カメラを用いた空中写真測量による 3D 都市モデル整備手法に関する調査」では、3D 都市モデルの壁面テクスチャの鮮明といえる妥当な解像度を明らかにし、撮影条件と鉛直方向の解像度の関係を整理して主たる航空カメラごとの推奨撮影条件を報告した。また、垂直カメラと多方向カメラによるテクスチャ品質及びコストを比較し、多方向カメラの優位性を報告した。

多方向カメラ撮影成果の位置正確度と形状再現度も検証し、建築物モデル LOD3 の作成が可能であることを確認した。さらに垂直撮影と車載レーザ写真測量（以降：MMS）による従来手法と多方向カメラによる整備手法の特徴を整理し、それぞれの手法の優位性について事例を踏まえて報告した。

一方で 2023 年度は、主たるカメラごとの奨励撮影条件を報告したが、検証事例が少なく普及のための汎用的な事例の蓄積が課題であった。また、新潟県上越市を対象に垂直カメラと多方向カメラによるテクスチャ品質の比較を行い多方向カメラのテクスチャ品質の優位性を確認したが、異なる地域特性を有する都市の適応についても確認する必要がある。

多方向カメラによる 3D 都市モデル作成においても建築物モデル LOD3 以外の地物の作成について調査できていない。また、多方向カメラによる空中写真撮影は公共測量として認められていないため、多方向撮影成果を原典として作成された 3D 都市モデルも公共測量成果としていくことが求められる。

1) 3D 都市モデル作成に適したカメラの選択

3D 都市モデルのテクスチャ品質はカメラやその撮影方法に依存する。カメラや撮影方法の特徴を把握することで目的とする 3D 都市モデルの要件に応じた新規撮影や既存の撮影成果の選択が可能となる。2023 年度の報告では、テクスチャ品質を満たす最低限の空中写真の重複度を主たるカメラごとに報告したが、必ずしも汎用的に使用される重複度ではなく実現性に課題があった。(図 1-1) また、テクスチャ品質の確保には焦点距離が短いカメラが有効であることを報告したが通り一部のカメラで例外があった。(図 1-2) カメラの内部パラメータをさらに分析することで 3D 都市モデル作成に適したカメラの選択に役立つことが期待される。垂直撮影成果で得られるテクスチャより高品質なテクスチャが求められる場合は、多方向カメラが有効である。2023 年度は新潟県上越市を検証サイトとして多方向カメラと垂直カメラのテクスチャ比較を実施したが、密集した高層建築物がさほどなく一般的に写真測量で障害となるオクルージョンが少なく好条件下であった。そのため異なる地域特性でも品質を確保できるか確認が求められる。(図 1-3 図 1-4)

区分	カメラ名	焦点距離(mm)	ピクセルサイズ(μm)	画像サイズ		テクスチャ不鮮明(m) (写真主点からの距離)	鉛直方向の最小解像度 (cm/px)	X軸(OL)方向ラップ範囲 (%)	Y軸(SL)方向ラップ範囲 (%)
				X軸(OL)方向	Y軸(SL)方向				
垂直	DMC	120.0	12.00	7,680	13,824	96.0	0.31	60.4	55.8
垂直	DMC II 140	92.0	7.20	11,200	12,096	122.6	0.27	59.1	58.4
垂直	DMC II 230	92.0	5.60	14,144	15,552	157.7	0.28	59.3	58.5
垂直	DMC II 250	112.0	5.60	14,016	16,768	192.0	0.33	61.4	59.5
垂直	DMCIII	92.0	3.90	14,592	25,728	226.4	0.39	62.9	57.3
垂直	UltraCam Falcon Mark 2	70.0	6.00	11,310	17,310	112.0	0.25	58.3	55.4
垂直	UltraCam Falcon Mark 2	101.7	6.00	11,310	17,310	162.7	0.36	62.0	57.8
多方向	UltraCamOs prey4.1	79.6	3.76	14,016	20,544	203.2	0.36	62.1	58.2
多方向	CityMapper-2	71.0	3.76	10,640	14,192	181.2	0.43	64.2	60.6
多方向	CityMapper-2	112.0	3.76	10,640	14,192	285.9	0.68	72.4	66.8
多方向	CityMapper-2	146.0	3.76	10,640	14,192	372.7	0.89	79.2	71.9
レーザ	Terrain Mapper-2	71.0	3.76	10,640	14,192	181.2	0.43	64.2	60.6
レーザ	RCD30	53.0	6.00	7,752	10,320	84.8	0.28	59.1	56.8

OL 方向は、作業規程の準則を参考に 60%（場合によっては 80%）で設定することが多い

図 1-1 テクスチャ品質を満たす最低限の撮影重複度の事例

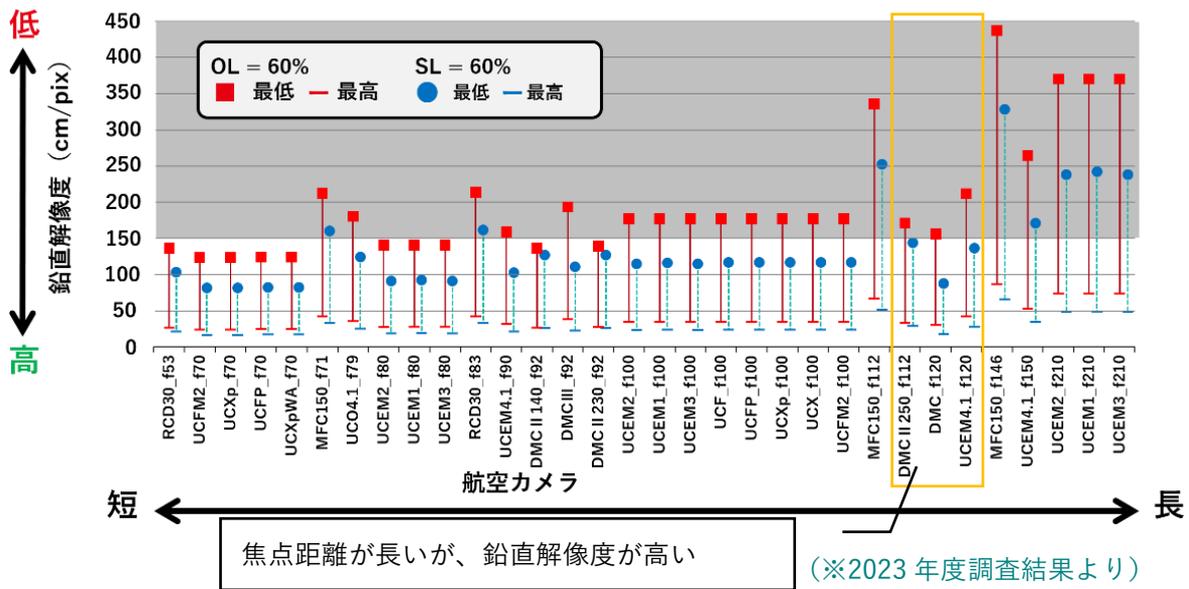


図 1-2 地上解像度 12cm における OL/SL = 60%/60%での鉛直解像度の最高値と最低値



図 1-3 新潟県上越市の垂直カメラと多方向カメラのテクスチャ比較事例

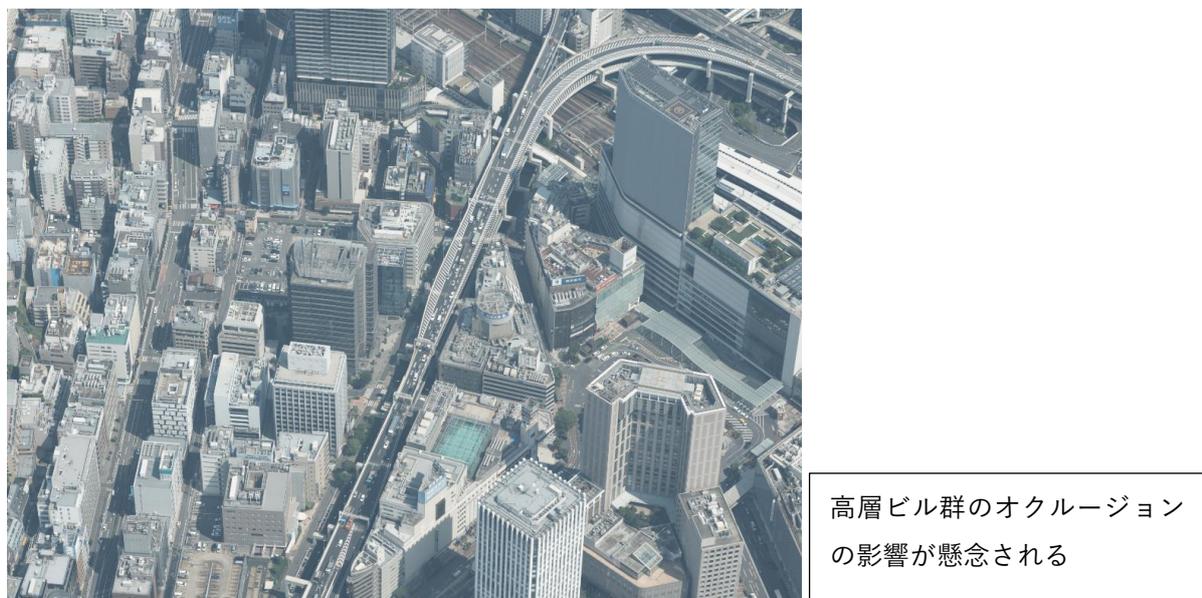


図 1-4 異なる地域特性（神奈川県横浜市 高層ビル群）の多方向カメラの撮影画像

2) 公共測量を前提とした多方向カメラ撮影成果による多様な高詳細度地物モデルの作成

多方向カメラ撮影成果は、都市を網羅的に撮影することが可能であり効率的に対象地物の形状を観測することができる。また、MMS等の近接測量とは異なり土地への立入りが不要であることが利点である。

2023年度の報告では多方向カメラ撮影成果を用いて建築物モデル LOD3 が作成可能であることを確認したが、その付加価値を更に向上するために建築物以外の地物の整備手法の調査が求められる。(図 1-5)

多方向カメラによる空中写真撮影は、測量法第 34 条で定める作業規程の準則で規定されていないため、多方向カメラ撮影成果をもとに作成した 3D 都市モデルも公共測量成果とはならない。公共測量成果とするための要件の確認が求められる。

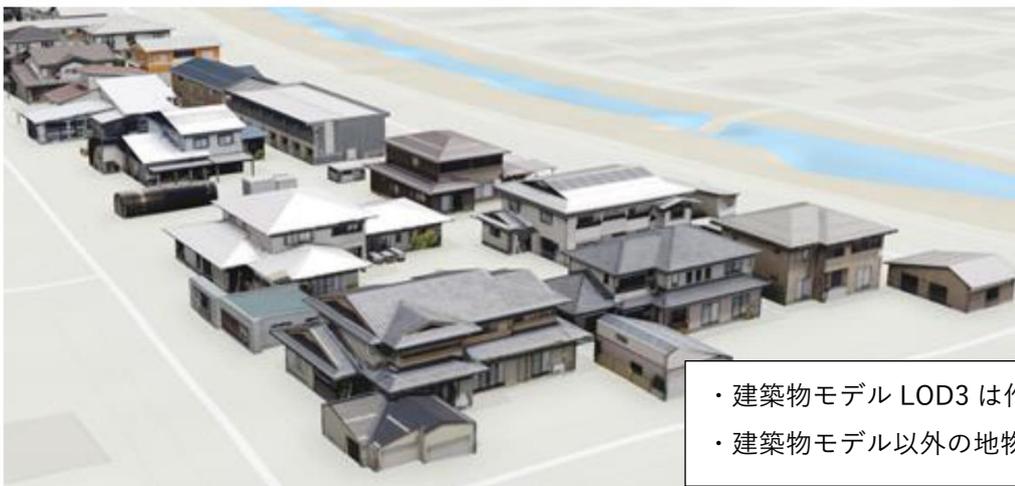


図 1-5 多方向カメラ撮影成果による建築物 LOD3 作成事例

1-2. 課題解決のアプローチ

2023年度の報告を受け、空中写真測量より作成する 3D 都市モデルを汎用的で付加価値が高いものとするためには、状況に応じて最適なカメラ及び撮影手法の選択ができるようになること、ならびに公共測量成果として多様な高詳細度地物モデルの作成が可能となることが求められる。これらの課題解決に向けて次の調査を実施する。

1) 3D 都市モデル作成に適したカメラの選択

- 鉛直解像度に影響する垂直カメラの内部パラメータを明らかにする
- テクスチャ品質を確保することができる汎用的な撮影重複度をカメラごとに整理する
- 密集した高層ビル群の環境下で多方向カメラによるテクスチャ品質を確認する

2) 公共測量を前提とした多方向カメラ撮影成果による多様な高詳細度地物モデルの作成

- 建築物モデルの他、交通（道路）、都市設備モデルなどの高詳細度モデルの作成可能性を検証する。また、作成に要するコストを確認する
- 公共測量適合のための要件を整理し必要なドキュメントの整理及び検証を行う

なお、本調査で使用する多方向カメラは、2023 年度の調査と同じ Leica Geosystems 社の CityMapper-2 とした。

表 1-1 本調査で使用する多方向カメラ

機材（センサ名）	ライカジオシステムズ社 CityMapper-2 (MFC150)	
斜めカメラの角度	約 45 度	
焦点距離	直下視 146mm 斜め視 189mm	
素子寸法	直下視 3.7 μm 斜め視 3.7 μm	
画素数	14,192 × 10,640pix	

2. 空中写真の撮影条件に基づく建築物モデル LOD2 テクスチャ品質の調査

2-1. 調査目的

- 建築物 LOD2 モデルの壁面テクスチャ品質に影響を与える要因を明らかにする
- 壁面テクスチャを生成する上で妥当な撮影重複度とカメラの組合せを提示する
- 壁面テクスチャの生成における多方向カメラの有用性を検証する

2-2. 調査内容

表 2-1 建築物 LOD2 モデルに適したテクスチャ画像の取得条件に関する調査内容

課題	調査内容	
建築物 LOD2 モデルにおける テクスチャ画像の品質の改善	①	壁面テクスチャの鉛直解像度に影響するカメラパラメータの特定
	②	妥当な鉛直解像度を得るのに適した撮影条件の把握
	③	垂直カメラと多方向カメラによる壁面テクスチャ画像の品質比較

2-3. 調査方法

1) 壁面テクスチャの鉛直解像度に影響するカメラパラメータの特定

建築物モデルの壁面テクスチャの品質は、鉛直方向の1画素分の長さである鉛直解像度で評価できる。2023年度の報告では、テクスチャ画像の鉛直解像度は隣接する写真の重複度とカメラの焦点距離に依存すると結論づけたが、一部のカメラで例外が確認された。そこで、本調査では鉛直解像度と各撮影条件の関係を整理し、鉛直解像度に影響する要因を特定する。

2) 各撮影重複度において妥当な鉛直解像度を得るために適したカメラの把握

テクスチャ画像を生成する上で妥当な鉛直解像度を「建築物の階層の判読性」および「建築物の階層内の構造の判読性」の2つの観点から提示する。その上で、32種類のカメラを対象に代表的な重複度である OL/SL = 60%/60%・80%/60%・80%/80% の3パターンについて、それぞれ得られる鉛直解像度の値の範囲を算出する。そして、各重複度に対して妥当な鉛直解像度を得られるカメラを特定し、建築物モデルのテクスチャ画像を生成するのに適した重複度とカメラの組合せを把握する。

3) 垂直カメラと多方向カメラによる壁面テクスチャ画像の品質比較

多方向カメラの撮影は、斜め視カメラにより壁面を正対に近い角度から撮影することができるため、鉛直解像度は向上が期待できる。本調査では、垂直カメラと多方向カメラにより撮影された壁面テクスチャ画像を

比較し、その品質を定性的に評価する。また、多方向カメラを用いた場合の鉛直解像度のとり得る値の範囲を、垂直カメラを用いた場合と比較し、建築物モデルのテクスチャ生成における多方向カメラの有用性を検証する。

2-4. 調査結果

2-4-1. 壁面テクスチャの鉛直解像度に影響するカメラパラメータの特定

表 2-2 に示す主たる垂直カメラと焦点距離の組合せ 32 種類を対象に、地上画素寸法 12 cm、OL/SL = 60%/60% の条件でとり得る鉛直解像度の範囲を図 2-1 に示す。

表 2-2 対象としたカメラとカメラパラメータの一覧

カメラ名	焦点距離 [mm]	ピクセルサイズ [μm]	画像サイズ [pix]		センササイズ [mm]	
			OL 方向	SL 方向	OL 方向	SL 方向
MFC150	71.0, 112.0, 146.0	3.76	10640	14192	40.01	53.36
RCD30	53.0, 83.0	6.0	7752	10320	46.51	61.92
UltraCamOsprey4.1 (UCO 4.1)	80.0	3.76	14016	20544	52.70	77.25
DMC	120.0	12.0	7680	13824	92.16	165.89
DMC II 140	92.0	7.2	11200	12096	80.64	87.09
DMC II 230	92.0	5.6	14144	15552	79.21	87.09
DMC II 250	112.0	5.6	14016	16768	78.49	93.90
DMCIII	92.0	3.9	14592	25728	56.91	100.34
UltraCam X (UCX)	100.5	7.2	9420	14430	67.82	103.90
UltraCam Xp (UCXp)	70.5, 100.5	6.0	11310	17310	67.86	103.86
UltraCam Xp Wide Angle (UCXpWA)	70.5	6.0	11310	17310	67.86	103.86
UltraCam Falcon (UCF)	100.5	6.0	11310	17310	67.86	103.86
UltraCam Falcon M2 (UCF M2)	70.5, 100.5	6.0	11310	17310	67.86	103.86
UltraCam Falcon Prime (UCFP)	70.5, 100.5	6.0	11310	17310	67.86	103.86
UltraCam Eagle M1 (UCE M1)	80.0, 100.5, 210.0	5.2	13080	20010	68.02	104.05
UltraCam Eagle M2 (UCE M2)	80.0, 100.5, 210.0	4.6	14790	23010	68.03	105.85
UltraCam Eagle M3 (UCE M3)	80.0, 100.5, 210.0	4.0	17004	26460	68.02	105.84
UltraCam Eagle 4.1 (UCE 4.1)	90.0, 120.0, 150.0	3.76	18060	28110	67.91	105.69

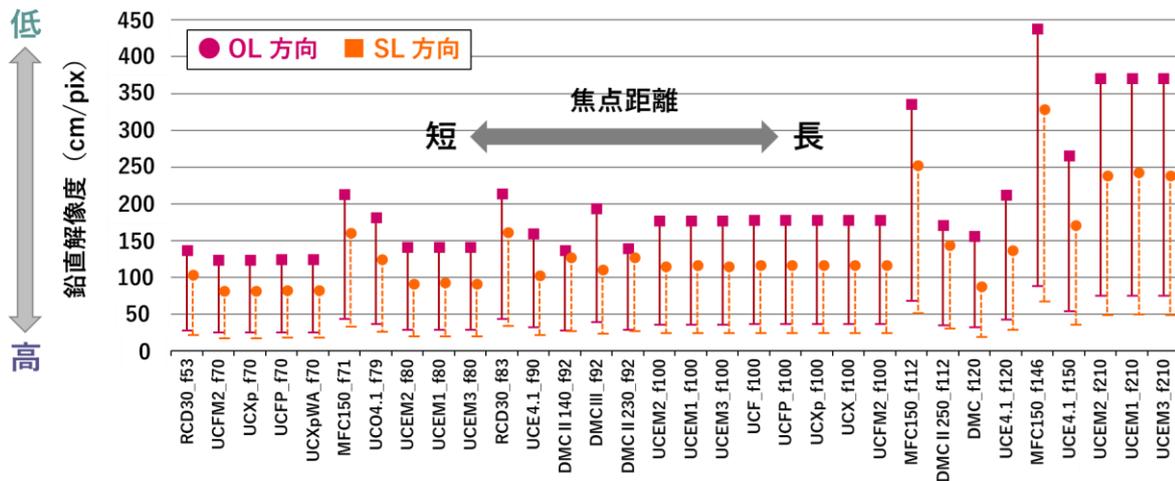


図 2-1 主たる航空カメラの鉛直解像度の値の範囲

最高鉛直解像度 $R_{v,high}$ および最低鉛直解像度 $R_{v,low}$ の値は、焦点距離 f 、画像 1 辺のピクセル数 n (OL 方向と SL 方向で異なる)、ピクセルサイズ l 、重複度 λ 、地上画素寸法 R_g を用いた以下の式より求めることができる。

<鉛直解像度の算定式>

$$R_{v,high} = \frac{2f}{nl} R_g, \quad R_{v,low} = \frac{f}{(\lambda - 0.5)nl} R_g$$

図 2-1 において、カメラは左から焦点距離が短い順で列挙している。焦点距離が短いほど、最低鉛直解像度の値は改善する傾向にある一方で、その傾向と乖離したカメラも存在することが分かる。これは、鉛直解像度の算定式からも分かるように、鉛直解像度が焦点距離 f だけでなく、センササイズ (画像 1 辺のピクセル数 × ピクセルサイズ) nl からも影響を受けているからと考えられる。例えば、焦点距離と比較して鉛直解像度が低い MFC150 のセンササイズは、表 2-2 によれば、OL 方向と SL 方向でともに小さいことが分かる。一方、その焦点距離と比較して鉛直解像度が高い DMC のセンササイズは、他のカメラより大きいことが確認できる。すなわち、鉛直解像度は焦点距離とセンササイズの比に依存する。(図 2-2)

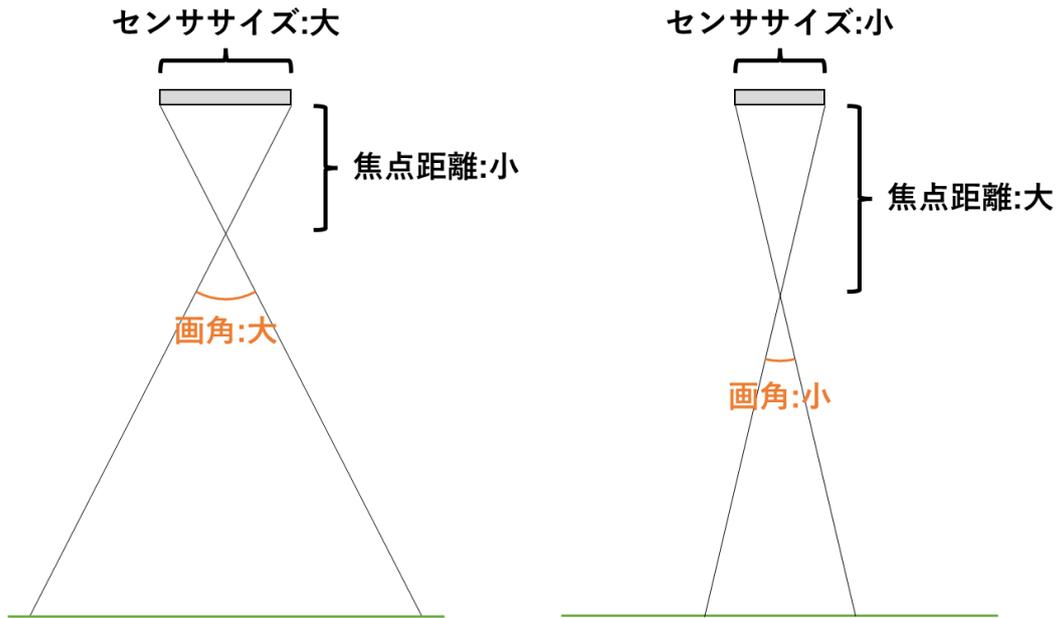


図 2-2 焦点距離とセンササイズの比の大小

図 2-2 からは、焦点距離とセンササイズの比はカメラの焦点と地表の撮影範囲がなす角度、すなわち画角と対応関係にあること。実際、鉛直解像度の算定式は、画角 α を用いて以下のように置き換えることができる。

<画角 α を用いた鉛直解像度の算定式>

$$R_{v,high} = \frac{R_g}{\tan \frac{\alpha}{2}}, \quad R_{v,low} = \frac{R_g}{2(\lambda - 0.5) \tan \frac{\alpha}{2}}$$

以上より、鉛直解像度に影響を与えるカメラパラメータは画角であることを確認した。

2-4-2. 各撮影重複度において妥当な鉛直解像度を得るのに適したカメラの把握

建築物モデルの壁面テクスチャを生成する上で妥当と考えられる鉛直解像度を把握するため、単写真から抽出した建築物壁面の4種類の解像度へのリサンプリング画像（表 2-3）を次の2種類の観点で評価した。

- ・ 建築物の階層の判読性
- ・ 建築物の階層内の構造の判読性

これらの観点を導入することには、各撮影条件・テクスチャの鉛直解像度・テクスチャ品質の相互関係を明確にし、要求テクスチャ品質に見合った撮影条件の選択を容易にする意図がある。

表 2-3 建築物壁面画像

50 cm/pix	100 cm/pix	150 cm/pix	200 cm/pix
			

表 2-3 に示すリサンプリング画像からは、解像度が 150 cm/pix を超えると、画像から建築物の階層の判読が難しくなることがわかる。一方で、150 cm/pix よりも高解像度な場合でも、凹凸の存在や部屋の境界など、階層内の構造の判読が難しい解像度の範囲が存在する。このような階層内の構造の判読が可能になるのは解像度がおおよそ 50 cm/pix より細かいときと考えられる。この結果にもとづいて、以降の検討では、150 cm/pix と 50 cm/pix の 2 種類の鉛直解像度を、壁面テクスチャ画像の品質を判断する際の基準とする。

一般的な空中写真撮影で採用されることが多い地上画素寸法 12 cm における各カメラの画角と鉛直解像度の関係を図 2-3 に示す。

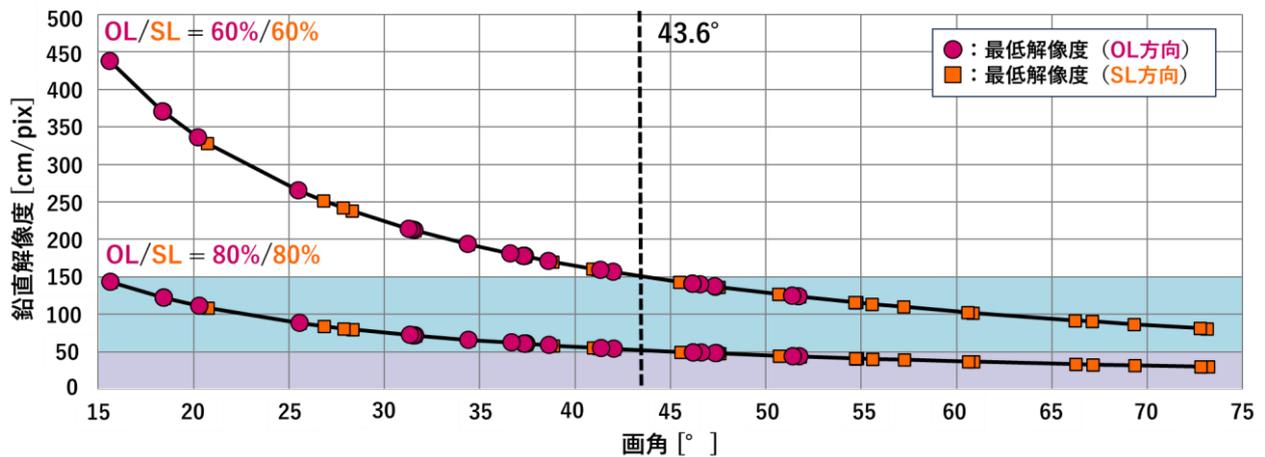


図 2-3 画角と鉛直解像度の関係

画角に対する鉛直解像度の値は、<鉛直解像度の算定式>に従って曲線状に配置している。OL/SL = 60%/60% において最低鉛直解像度 150 cm/pix を満たすために必要なカメラの画角、および OL/SL = 80%/80% において最低鉛直解像度 50 cm/pix を満たすために必要なカメラの画角は、共に $\alpha = 43.6^\circ$ 程度である。

各カメラの OL 方向の画角と SL 方向の画角をプロットした散布図が図 2-4 である。最低鉛直解像度 150 cm/pix を満たすのは、OL/SL = 60%/60% で A~D に示すカメラを用いた場合、OL/SL = 80%/60% で E~K に示すカメラを用いた場合、あるいは OL/SL = 80%/80% でそれ以外のカメラを用いた場合である。ま

た、最低鉛直解像度 50 cm/pix を満たすのは、OL/SL = 80%/80% で A~D に示すカメラを用いた場合のみで、それ以外の場合では求める品質を撮影範囲全体で達成することはできない。

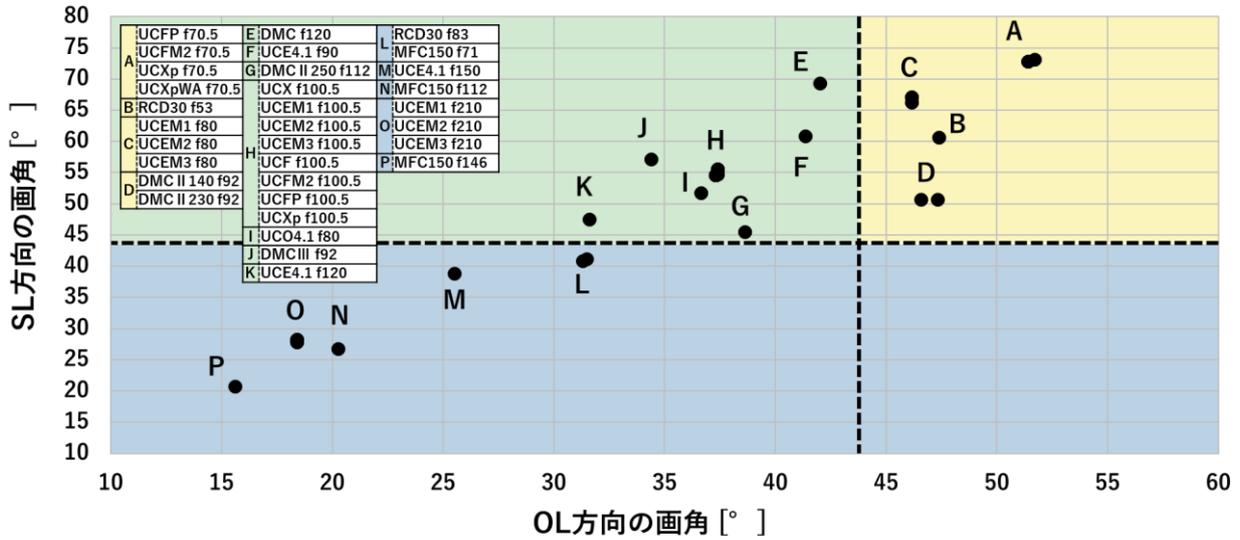


図 2-4 画角にもとづくカメラの分類

今回対象とした 32 種類のカメラと焦点距離の組合せについて、画角と最低鉛直解像度を整理した一覧を表 2-4 に示す。撮影計画を立てる際には、カメラと焦点距離の組合せに対応した画角を参考にしながら、妥当と考えられる撮影重複度とカメラを選定し、要求される鉛直解像度を全範囲で満たす撮影を行うことが望ましい。

表 2-4 各撮影条件に対する最低鉛直解像度の一覧

カメラ名	画角		最低鉛直解像度 [cm/pix]		
	OL 方向	SL 方向	80%/80%	80%/60%	60%/60%
MFC150	31.5°	41.2°	71.0	159.7	212.9
	20.3°	26.8°	112.0	251.9	335.9
	15.6°	20.7°	146.0	328.3	437.9
RCD30	47.4°	60.6°	45.6	102.7	136.7
	31.3°	40.9°	71.4	160.9	214.1
UltraCamOsprey4.1 (UCO 4.1)	36.5°	51.5°	60.7	124.3	182.2
DMC	42.0°	69.3°	52.1	86.8	156.3
DMC II 140	47.3°	50.7°	45.6	126.8	136.9
DMC II 230	46.6°	50.7°	46.5	126.8	139.4
DMC II 250	38.6°	45.5°	57.1	143.1	171.2
DMCIII	34.4°	57.2°	64.7	110.0	194.0
UltraCam X (UCX)	37.3°	54.7°	59.3	116.1	177.8
UltraCam Xp (UCXp)	51.4°	72.8°	41.6	81.5	124.7
	37.3°	54.7°	59.2	116.1	177.7
UltraCam Xp Wide Angle (UCXpWA)	51.4°	72.8°	41.6	81.5	124.7
UltraCam Falcon (UCF)	37.3°	54.7°	59.2	116.1	177.7
UltraCam Falcon M2 (UCF M2)	51.4°	72.8°	41.6	81.5	124.7
	37.3°	54.7°	59.2	116.1	177.7
UltraCam Falcon Prime (UCFP)	51.4°	72.8°	41.6	81.5	124.7
	37.3°	54.7°	59.2	116.1	177.7
UltraCam Eagle M1 (UCEM1)	46.1°	66.1°	47.0	92.3	141.1
	37.4°	54.7°	59.1	115.9	177.3
	18.4°	27.8°	123.5	242.2	370.5
UltraCam Eagle M2 (UCEM2)	46.1°	67.0°	47.0	90.7	141.1
	37.4°	55.5°	59.1	113.9	177.3
	18.4°	28.3°	123.5	238.1	370.4
UltraCam Eagle M3 (UCEM3)	46.1°	67.0°	47.0	90.7	141.1
	37.4°	55.5°	59.1	113.9	177.3
	18.4°	28.3°	123.5	238.1	370.5
UltraCam Eagle 4.1 (UCE4.1)	41.3°	60.8°	53.0	102.2	159.0
	31.6°	47.5°	70.7	136.2	212.0
	25.5°	38.8°	88.4	170.3	265.1

□ … 画角 > 43.6° □ … 最低鉛直解像度 50 cm/pix を満たす □ … 最低鉛直解像度 150 cm/pix を満たす

2-4-3. 垂直カメラと多方向カメラによる壁面テクスチャ画像の品質比較

垂直カメラである UCEM3 と、多方向カメラである MFC150 による撮影成果を用いて生成された壁面テクスチャ画像を比較し、それらの品質の違いを評価した。対象とする建築物は、横浜市みなとみらい周辺の高層建築物とした。

この検証では、UCEM3 による撮影成果の地上画素寸法は 10 cm/pix、MFC150 による撮影成果の地上画素寸法は 7 cm/pix・5 cm/pix・3 cm/pix の 3 種類とした。なお、UCEM3 による撮影成果の重複度は、OL/SL = 80%/80%である。

各撮影成果の使用カメラのカメラパラメータおよび撮影条件を表 2-5 に示す。

表 2-5 各撮影成果の諸元

カメラ	焦点距離	センササイズ	画角	撮影条件
UCEM3	100.5 mm	68.016 mm (OL 方向)	37.4° (OL 方向)	地上画素寸法： 10 cm 撮影重複度： OL/SL = 80%/80%
		105.840 mm (SL 方向)	55.5° (SL 方向)	
MFC150	189 mm (斜め視)	40.006 mm (OL 方向) 53.362 mm (SL 方向)	—	地上画素寸法： 7 cm, 5 cm, 3 cm

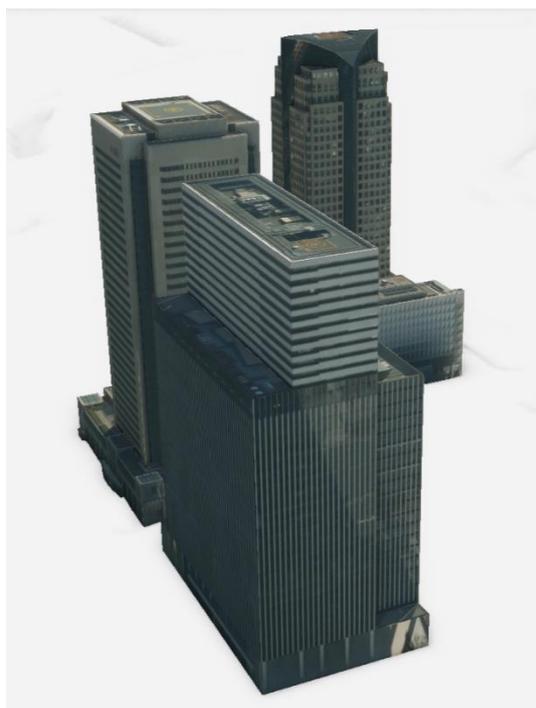
それぞれの撮影成果によって生成されたテクスチャ画像を図 2-5、図 2-6、図 2-7 に示す。UCEM3 による壁面テクスチャでは、窓の輪郭がややぼやけており、壁面上の文字も判読しにくいのに対し、多方向カメラである MFC150 による壁面テクスチャでは、窓の輪郭が明瞭で、壁面上の文字も、地上画素寸法が 3 cm・5 cm の場合については十分判読可能である。また、地上画素寸法が 3 cm の場合については、建築物壁面上の格子状の模様も確認できる。このように、垂直カメラを用いた高い撮影重複度での撮影成果と比較しても、多方向カメラによる撮影成果は高品質なテクスチャ画像を生成することができており、建築物の壁面テクスチャ画像を生成する上での多方向カメラの優位性が示唆される。なお、2023 年度の報告では、密集した高層建築物がさほどない地域を検証サイトとしており、高層ビルが立ち並ぶ都市部でもオクルージョンが生じにくいテクスチャを生成できるか確認することが課題となっていた。本検証で対象とした建築物モデルでは、オクルージョンの発生は確認できず、高層ビル群などの遮蔽物が多い環境下においても、多方向カメラ撮影成果を用いたテクスチャ生成が有効であることが示唆される。

本検証の撮影条件下における壁面テクスチャの品質を定量的にも比較するために、各撮影成果によって得られる壁面テクスチャの鉛直解像度の値の範囲を求めた。斜め視カメラが直下視方向から 45° の角度で取り付けられているため、カメラ直下を原点とし、斜め視カメラの視線方向に沿うように地面と水平に L 軸をとった場合の、地点 L における斜め視カメラによる鉛直解像度 $R_{v,o}(L)$ は、直下視カメラによる地上画素寸法 $R_{g,N}$ 、直下視カメラと斜め視カメラの焦点距離 f_N, f_o 、および直下視カメラと斜め視カメラのピクセルサイズ l_N, l_o を用いて以下の式で表せる。

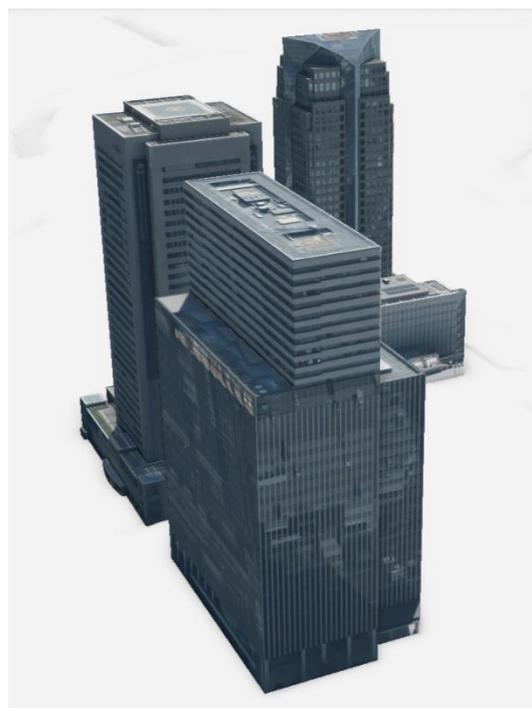
<多方向カメラの鉛直解像度の算定式>

$$R_{v,o}(L) = \frac{l_o}{f_o} \cdot \frac{(L + R_{g,N}f_N/l_N)^2}{2L}$$

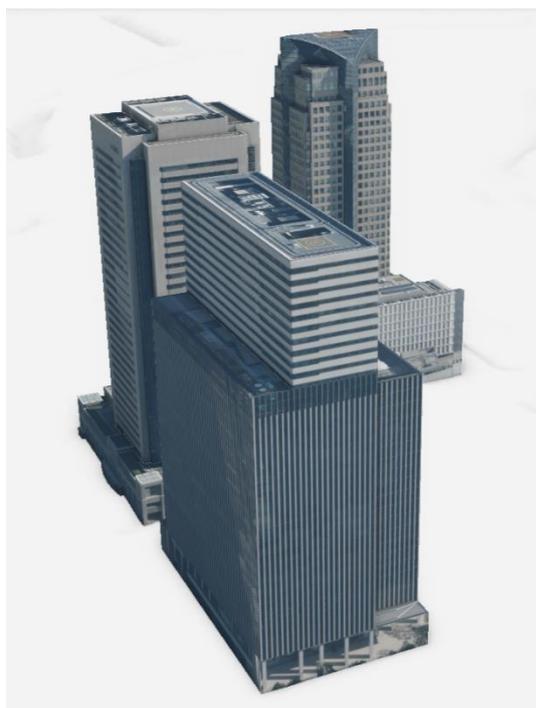
この式を用いて、表 2-5 に示す撮影諸元を所与としたときの、とり得る鉛直解像度の値の範囲を求めた結果を表 2-6 に示す。ここでは、参考として、OL や SL が 60% の場合も併せて示す。多方向カメラによる撮影については、直下視カメラによる写真の重複率を、OL/SL としている。



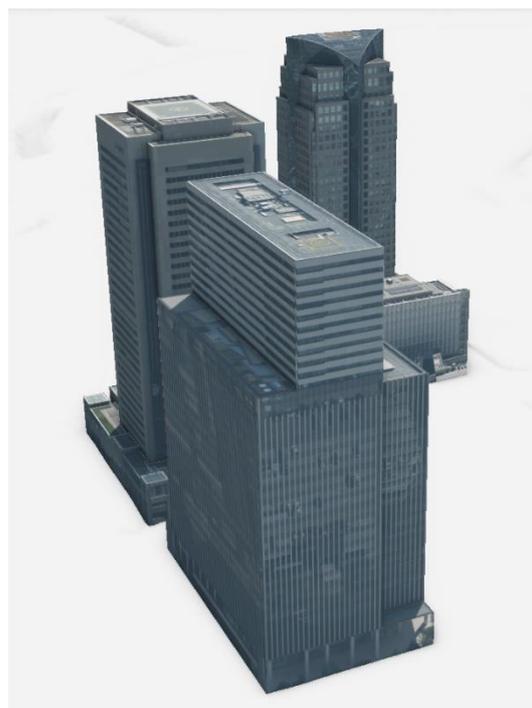
UCEM3



MFC150 (GSD: 7cm)



MFC150 (GSD: 5cm)



MFC150 (GSD: 3cm)

※ GSD は地上画素寸法の略

図 2-5 4 種類の撮影条件による壁面テクスチャ (全体)



UCEM3



MFC150 (GSD: 7cm)



MFC150 (GSD: 5cm)



MFC150 (GSD: 3cm)

※ GSD は地上画素寸法の略

図 2-6 4 種類の撮影条件による壁面テクスチャ (細部)



UCEM3



MFC150 (GSD: 7cm)



MFC150 (GSD: 5cm)



MFC150 (GSD: 3cm)

※ GSD は地上画素寸法の略

図 2-7 4 種類の撮影条件による壁面テクスチャ (細部)

表 2-6 各撮影諸元に対する鉛直解像度の値の範囲

カメラ	地上 画素寸法	鉛直解像度 (OL 方向)				鉛直解像度 (SL 方向)			
		OL = 60%		OL = 80%		SL = 60%		SL = 80%	
		最高 [cm]	最低 [cm]	最高 [cm]	最低 [cm]	最高 [cm]	最低 [cm]	最高 [cm]	最低 [cm]
UCEM3 (垂直)	10 cm/pix	29.17	147.50	29.17	49.17	19.17	95.00	19.17	31.67
MFC150 (多方向)	7 cm/pix	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.83	10.82	10.82
	5 cm/pix	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.74	7.73	7.73
	3 cm/pix	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64

表 2-6 からは、UCEM3 による今回の撮影条件での撮影成果では、壁面テクスチャの鉛直解像度の値はおよそ 19 cm/pix ~ 50 cm/pix の間に収まることが分かる。一方で、MFC150 による撮影では、撮影重複度によらず鉛直解像度の値はほぼ一定であり、3 種類のすべての地上画素寸法で、UCEM3 による鉛直解像度の最高値を上回っていることが確認できる。このことから、図 2-5、図 2-6、図 2-7 で定性的に比較したテクスチャ画像間の優劣を、定量的にも裏付けることができた。

また、表 2-6 は、図 2-5、図 2-6、図 2-7 による定性的な比較だけでは確認できなかった、多方向カメラの壁面テクスチャ生成における優位性を示唆している。第一に、多方向カメラによって得られたテクスチャの鉛直解像度は、垂直カメラの場合と異なり、最高値と最低値の差が小さい。このことは、建築物ごとのテクスチャ品質に偏りがなく、均質な建築物モデルの整備に寄与すると期待できる。第二に、多方向カメラによる撮影成果を建築物モデルのテクスチャ生成に利用する場合、撮影重複度は鉛直解像度の値の範囲にほとんど影響しない。このことは、多方向カメラを用いることで、低い撮影重複度で高品質なテクスチャ画像を生成できることを意味しており、建築物モデルの整備におけるコストの削減が期待できる。

3. 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の調査

3-1. 調査目的

- 多方向カメラ撮影成果をもとに建築物モデル、交通（道路）モデル、橋梁モデル、都市設備モデル、植生モデルを試作し、位置正確度および形状再現度を評価する
- 多方向カメラ撮影成果による建築物モデル、交通（道路）モデル、橋梁モデル、都市設備モデル、植生モデルの整備に要するコストを評価する

3-2. 調査内容

表 3-1 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の調査

課題	調査内容
建築物、交通（道路）、橋梁、都市設備、植生の LOD3 モデルの整備	① LOD3 モデリング成果の位置正確度の検証
	② LOD3 モデリング成果の形状再現度の検証
	③ 多方向カメラを用いた整備コストの評価

3-3. 調査方法

1) LOD3 モデルの試作

地上画素寸法 3cm、5cm、7cm の 3 通りの多方向カメラ撮影成果をもとに建築物モデル、交通（道路）モデル、橋梁モデル、都市設備モデル、植生モデルの試作を行う。

2) LOD3 モデリング成果の位置正確度の検証

多方向カメラを用い作成した 3D 都市モデルが地上の正しい位置であることを確認するために位置精度の高い近接測量成果（MMS 成果、LidarSLAM 測量成果）との用を検証する。なお、多方向カメラ撮影成果は地上画素寸法 3cm、5cm、7cm の 3 通りの撮影成果で検証を行う。

3) LOD3 モデリング成果の形状再現度の検証

多方向カメラ撮影成果をもとに、建築物モデル、交通（道路）モデル、橋梁モデル、都市設備モデル、植生モデルの形状再現度の検証を行う。なお、多方向カメラ撮影成果は地上画素寸法 3cm、5cm、7cm の 3 通りの撮影成果で検証を行う。

4) 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の評価

本検証で拡充した多方向カメラによる整備手法と従来手法（垂直カメラ＋近接測量）による整備コストを比較し評価する。

3-4. 調査結果

3-4-1. LOD3 モデルの試作

検証サイトは、神奈川県横浜市の関内からみなとみらい付近とした。



図 3-1 検証サイト

2024年9月に神奈川県横浜市の関内からみなとみらい付近を対象に多方向カメラ空中写真撮影を実施した。撮影標定図を以下に示す。なお、撮影重複度は進行方向に80%、コース間方向に60%とし、地上画素寸法3cm、5cm、7cmの3通りの撮影を実施した。

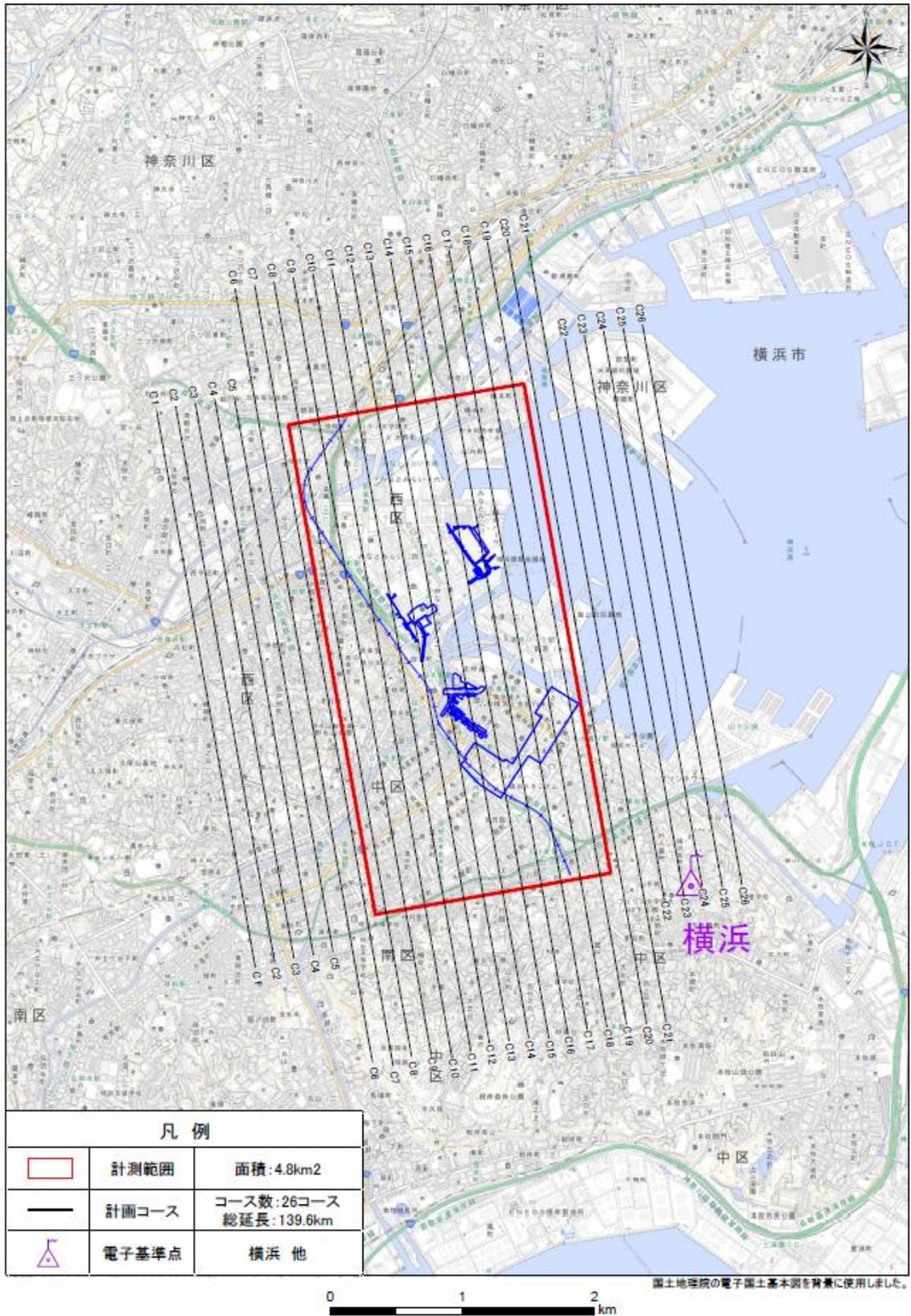


図 3-2 撮影標定図 GSD:3cm (2024/09/06 撮影)

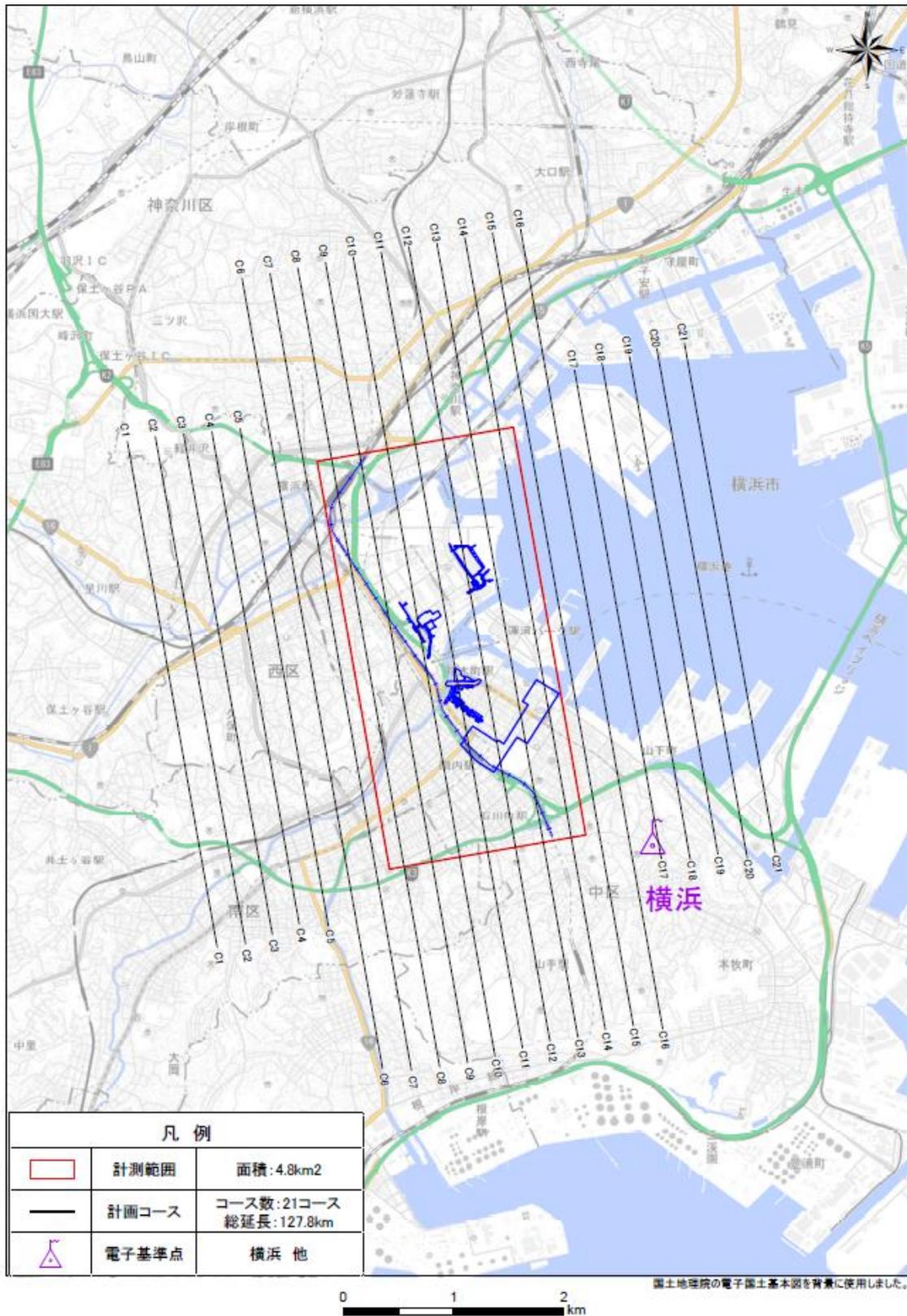


図 3-3 撮影標定図 GSD:5cm (2024/09/05 撮影)

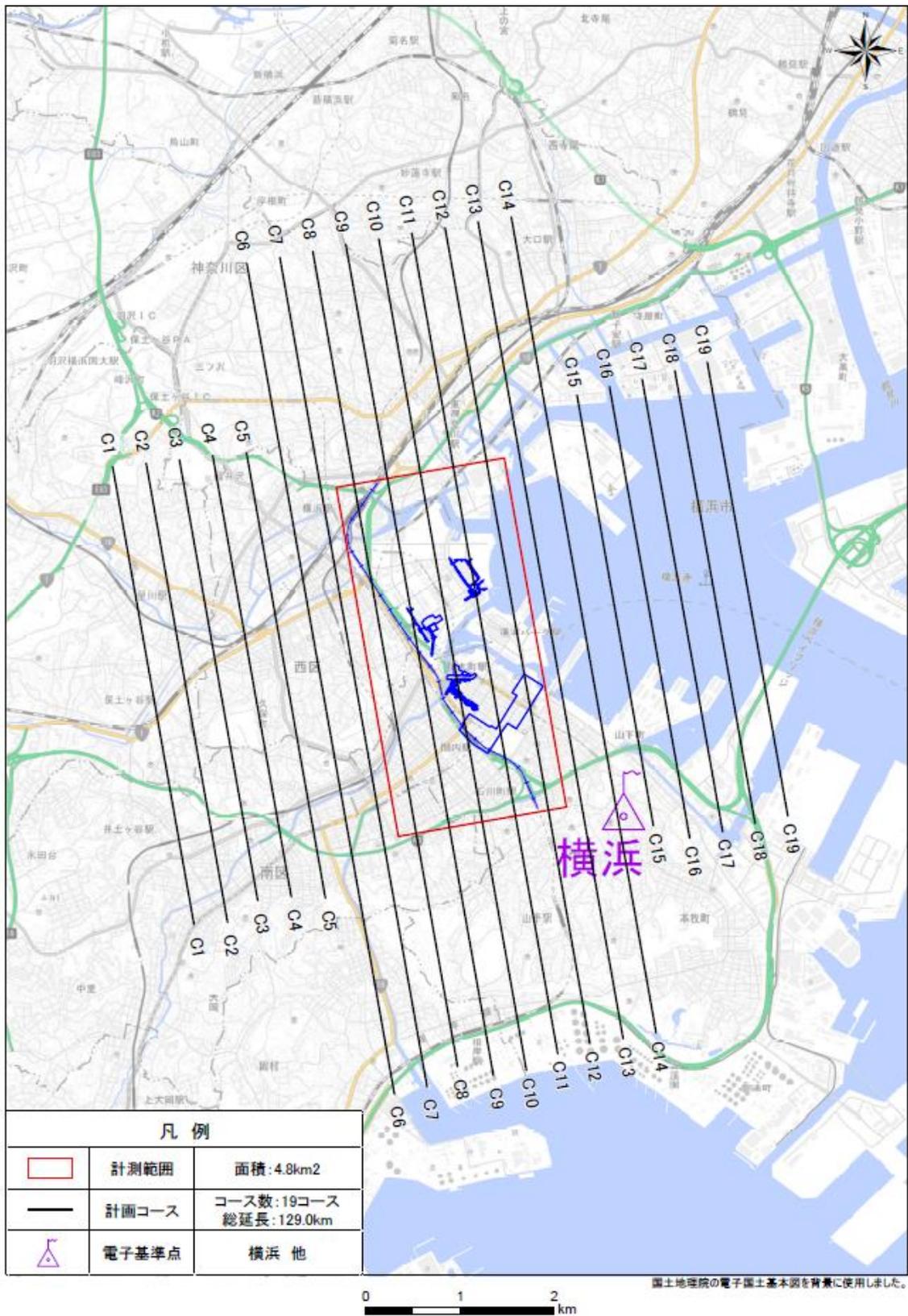


図 3-4 撮影標定図 GSD:7cm (2024/09/02 撮影)

表 3-2 多方向カメラによる撮影画像

	GSD: 3cm	GSD: 5cm	GSD: 7cm
前視			
直下視			
後視			
左視			
右視			

多方向撮影成果をもとに建築物モデル、交通（道路）モデル、橋梁モデル、都市設備モデル、植生モデルを試作した。試作結果を図 3-5、図 3-6 に示す。



図 3-5 関内地区の試作結果



図 3-6 みなとみらい地区の試作結果

3-4-2. LOD3 モデリング成果の位置正確度の検証

位置正確度の検証は、横浜市の関内地区とみなとみらい地区を対象に実施した MMS 成果および LidarSLAM 測量成果の点群データを用いて多方向カメラ撮影成果より作成した 3D 都市モデルとの較差を求めた。

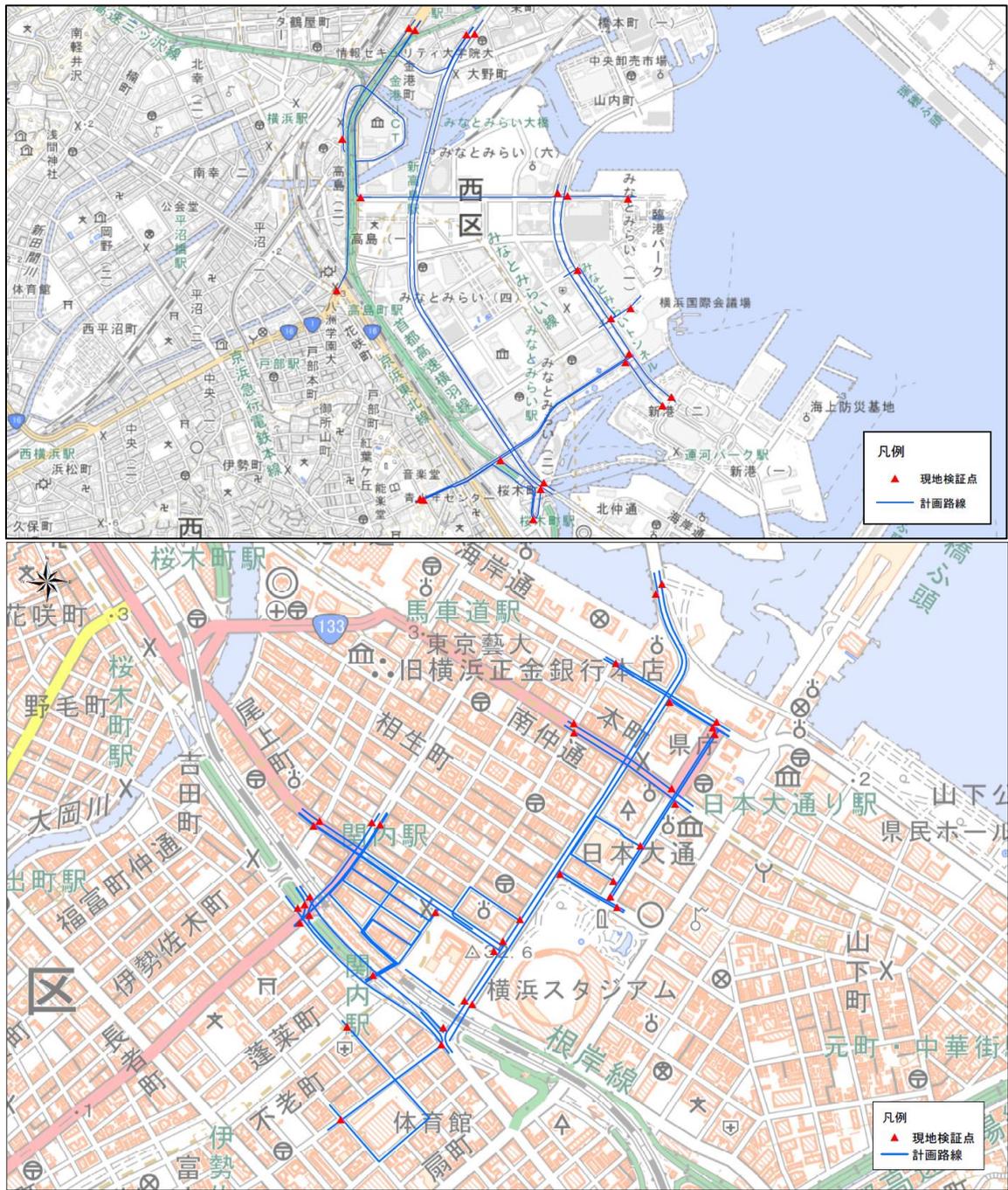


図 3-7 MMS 実施図 (上：みなとみらい地区、下：関内地区)

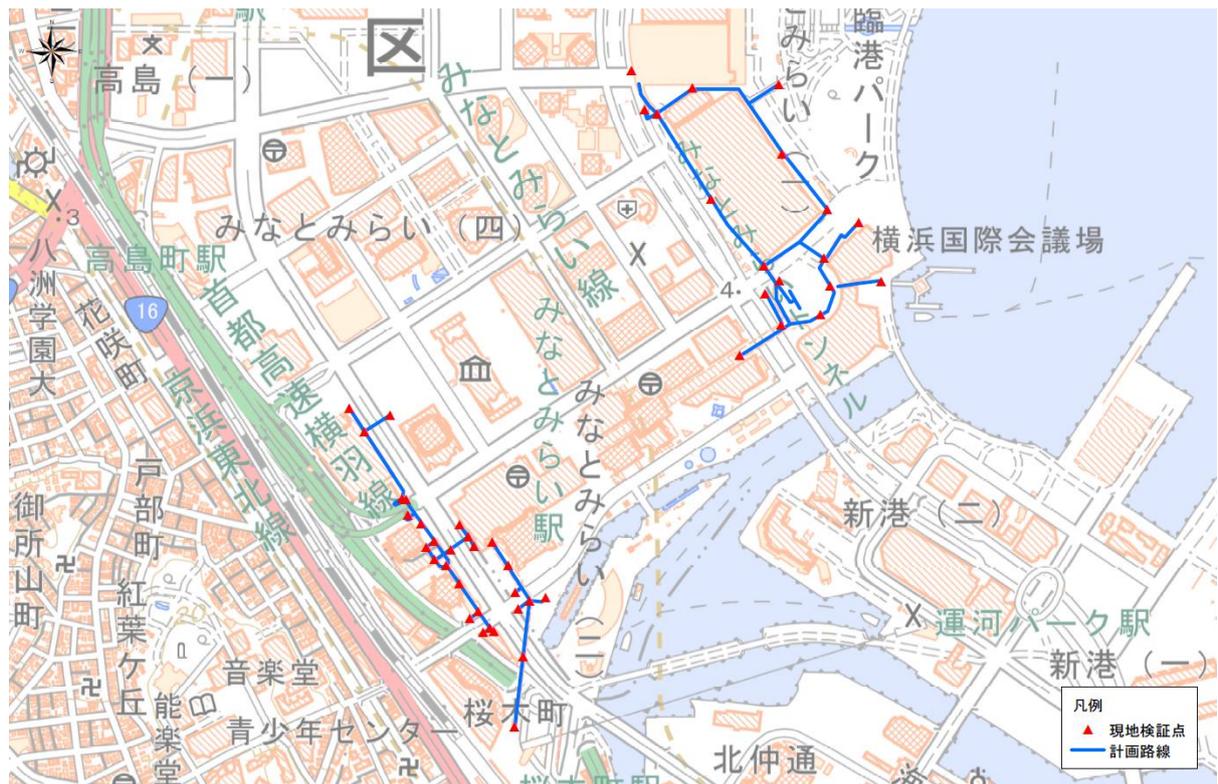


図 3-8 LidarSLAM 測量実施図 (みなとみらい)

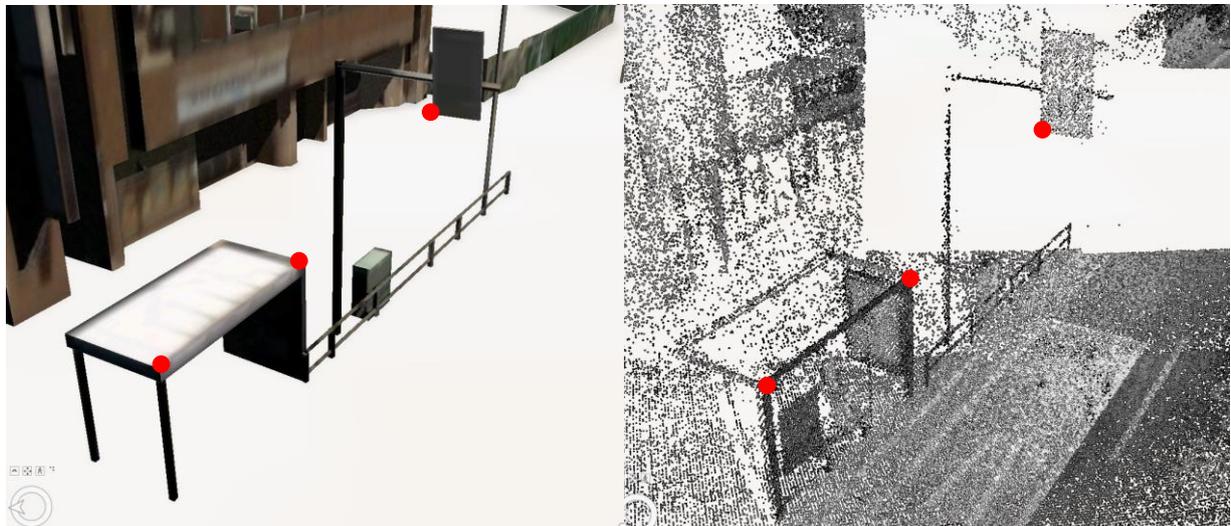


図 3-9 座標較差の検証事例

表 3-3 建築物モデルの較差（平均二乗誤差）

RMSE	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD：3cm	0.059	0.043	0.073	0.076
GSD：5cm	0.262	0.597	0.652	0.235
GSD：7cm	0.230	0.588	0.632	0.208

単位：m

表 3-4 建築物モデルの較差（最大値）

MAX	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD：3cm	0.216	0.101	0.227	0.178
GSD：5cm	0.423	1.033	1.068	0.605
GSD：7cm	0.470	0.898	0.898	0.639

単位：m

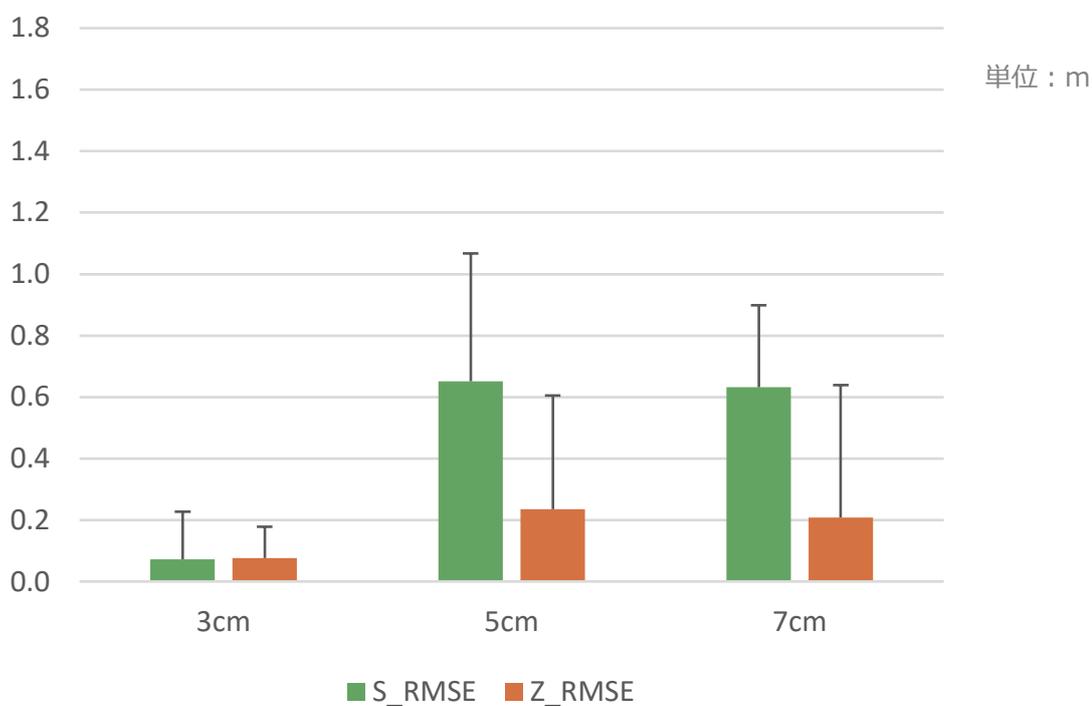


図 3-10 建築物モデルの較差

表 3-5 交通（道路）モデルの較差（平均二乗誤差）

RMSE	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD:3cm	0.253	0.245	0.352	0.308
GSD:5cm	0.251	0.274	0.371	0.347
GSD:7cm	0.261	0.260	0.369	0.344

単位：m

表 3-6 交通（道路）モデルの較差（最大値）

MAX	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD:3cm	0.874	0.460	0.988	0.829
GSD:5cm	0.863	0.526	1.011	0.653
GSD:7cm	0.836	0.538	0.994	0.578

単位：m

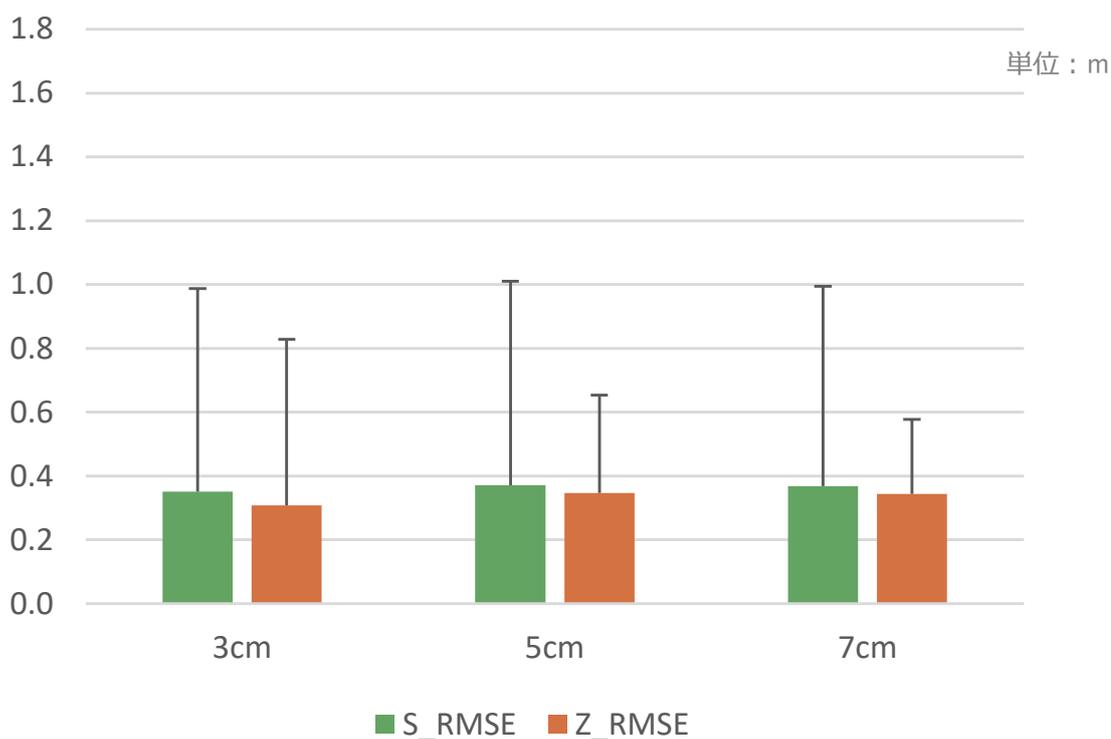


図 3-11 交通（道路）モデルの較差

表 3-7 橋梁モデルの較差（平均二乗誤差）

RMSE	X	Y	S (斜距離)	Z
GSD:3cm	0.263	0.491	0.557	0.212
GSD:5cm	0.329	0.539	0.632	0.314
GSD:7cm	0.310	0.507	0.594	0.261

単位：m

表 3-8 橋梁モデルの較差（最大値）

MAX	X	Y	S (斜距離)	Z
GSD:3cm	0.522	0.746	0.754	0.387
GSD:5cm	0.599	0.796	0.846	0.645
GSD:7cm	0.649	0.864	0.887	0.612

単位：m

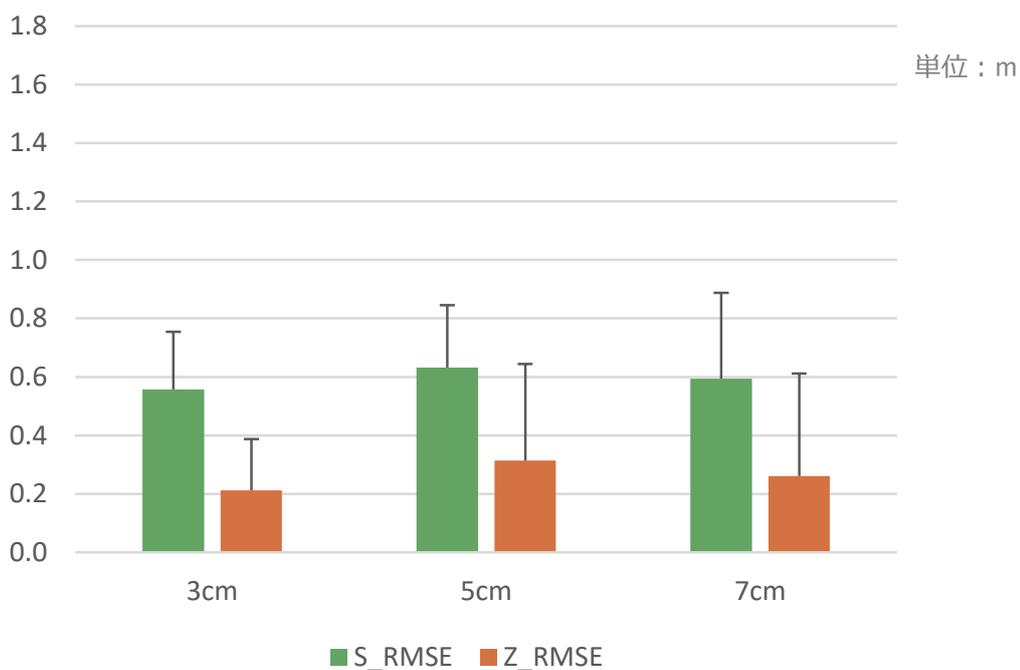


図 3-12 橋梁モデルの較差

表 3-9 都市設備モデルの較差（平均二乗誤差）

RMSE	X	Y	S (斜距離)	Z
GSD:3cm	0.079	0.083	0.114	0.092
GSD:5cm	0.068	0.089	0.113	0.087
GSD:7cm	0.169	0.223	0.280	0.119

単位：m

表 3-10 都市設備モデルの較差（最大値）

MAX	X	Y	S (斜距離)	Z
GSD:3cm	0.140	0.137	0.156	0.162
GSD:5cm	0.139	0.182	0.190	0.237
GSD:7cm	0.266	0.441	0.497	0.229

単位：m

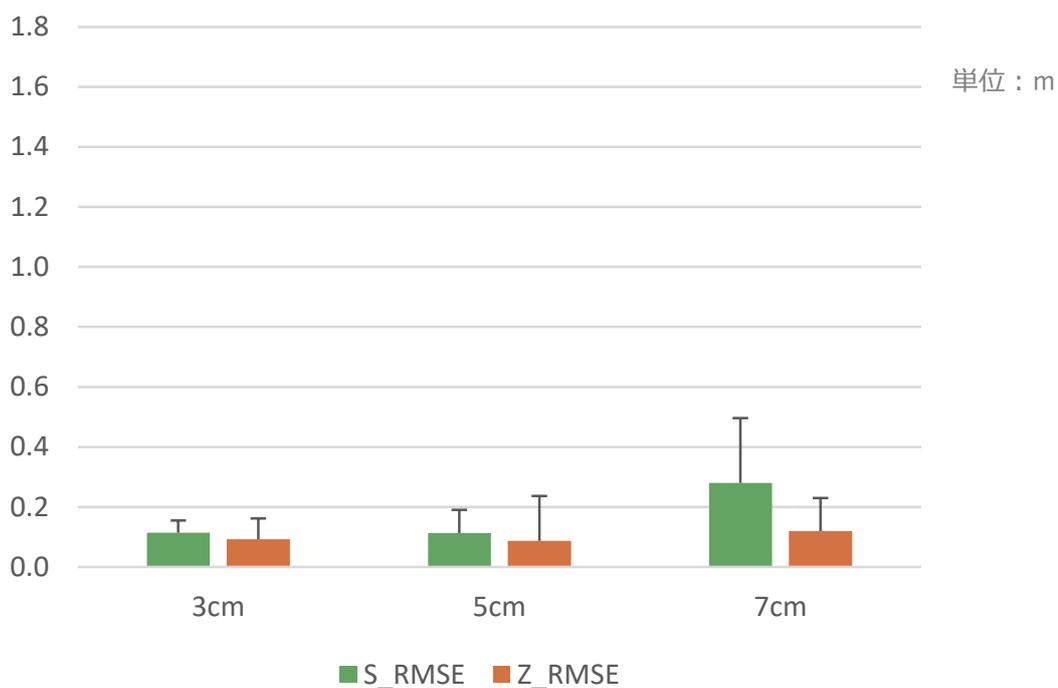


図 3-13 都市設備モデルの較差

表 3-11 植生モデルの較差（平均二乗誤差）

RMSE	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD:3cm	0.751	0.436	0.868	0.657
GSD:5cm	0.437	0.317	0.540	0.361
GSD:7cm	0.458	0.386	0.599	0.614

単位：m

表 3-12 植生モデルの較差（最大値）

MAX	X	Y	S（斜距離）	Z
GSD:3cm	1.691	1.001	1.734	1.175
GSD:5cm	0.734	0.777	0.802	0.789
GSD:7cm	0.917	0.791	1.057	1.108

単位：m

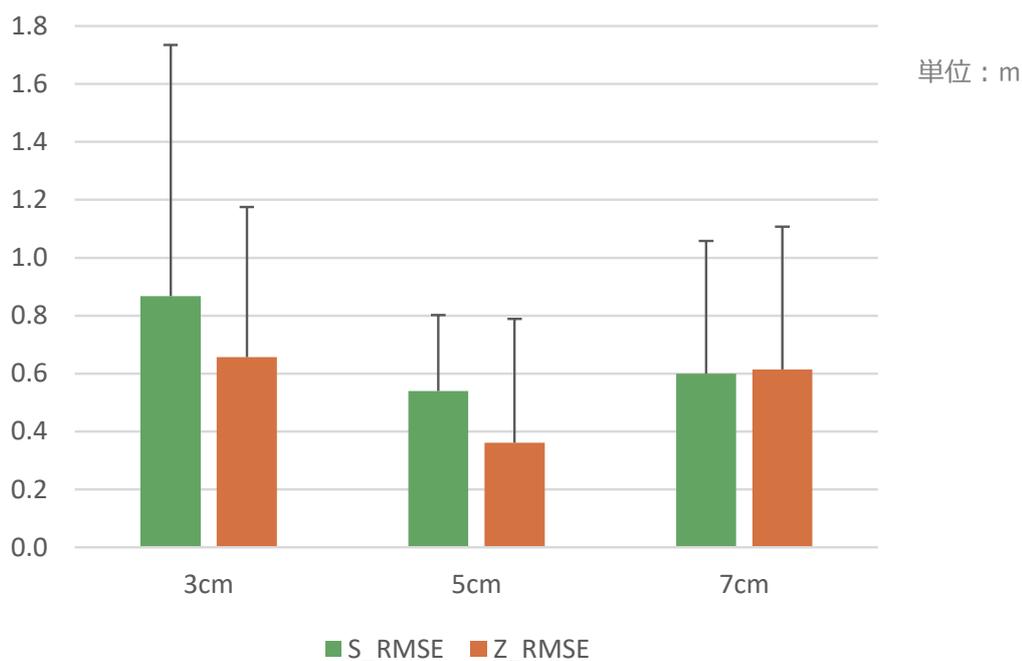


図 3-14 植生モデルの較差

いずれの地上画素寸法も地図情報レベル 1000 の精度を有することが確認できた。ただし、植生は地図情報レベル 2500 の精度であった。樹木は短期間で成長し、また、風でそよぐなど形状が変化しやすいため地図情報レベル 2500 に相当した検証結果となったと考えられる。多方向カメラ撮影成果をもとに作成した成果は、3D 都市モデルが基本とする地図情報レベル 2500 の位置正確度を満たすことを確認した。

3-4-3. LOD3 モデリングによる形状再現度の検証

本検証で対象とした地物と LOD の組合せを表 3-13 に示す。LOD が詳細になるにつれて表現する形状の寸法は細くなる。基本的には詳細度の細かい LOD が作成可能であればそれより粗い LOD も作成することは可能である。最も詳細度の細かいモデルを目標に作成し、取得基準と照合し形状再現度を評価した。なお、地上画素寸法 3cm、5cm、7cm ごとに 3D 都市モデルを作成し評価した。

表 3-13 対象とした地物と LOD の組合せ

LOD 地物	2.0	2.1	2.2	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	取得基準のポイント
建築物	調査外			✓	✓	✓	✓	定義なし	対象物大きさ (3m/ 1m)、軒裏、屋外付属物等
道路	調査外	定義なし		✓	✓	✓	✓	✓	道路内の区分、段差 (15cm/ 2cm) 等
橋梁	調査外	✓	定義なし	✓	定義なし			床板、主桁、橋脚、階段、その他の付属物等	
都市設備	調査外	定義なし		✓	✓	定義なし		都市設備を構成する主要な部分同士の接続部等	
植生	✓	定義なし		✓	定義なし			樹冠・樹幹の外形、比高 (3m/ 1m) 等	

1) 建築物モデル

建築物モデルの詳細度ごとの取得基準を整理し、地上画素寸法ごとに作成可否を確認した。

地上画素寸法 5cm、7cm は LOD3.1 まで作成可能であった。短辺が 1m を下回る窓、扉などの開口部は不明瞭に表示され取得が困難であった。

地上画素寸法 3cm は短辺 1m 未満の開口部など小さすぎると不明瞭ではあるが基本的には取得可能であった。そのため一部条件付きではあるが LOD3.3 に相当する建築物モデルを作成可能である。

表 3-14 建築物モデル LOD3 の詳細度ごとの取得基準

LOD/定義	屋根のサイズ	付属物のサイズ	開口部（窓、扉）のサイズ	軒のサイズ
LOD3.0	短辺 3m 以上の屋根表現	短辺 3m 以上の大きなもの	短辺 1m 以上	3m 以上
LOD3.1	短辺 1m 以上 面積 3m ² 以上	短辺 3m 以上の大きなもの	短辺 1m 以上	1m 以上
LOD3.2	短辺 1m 以上 面積 1m ² 以上	正射影の面積 1m ² 以上	面積 1m ² 以上	1m 以上
LOD3.3	短辺 1m 以上 面積 1m ² 以上 ※短辺の実長が 1m 未満の細かな屋根の形状	1m 未満	1m 未満	1m 未満

表 3-15 建築物モデル LOD3 の詳細度ごとの作成可否

		屋根のサイズ	付属物のサイズ	開口部（窓、扉）のサイズ	軒のサイズ
LOD3.0	GSD : 3cm	○	○	○	○
	GSD : 5cm	○	○	○	○
	GSD : 7cm	○	○	○	○
LOD3.1	GSD : 3cm	○	○	○	○
	GSD : 5cm	○	△	△	○
	GSD : 7cm	○	△	△	○
LOD3.2	GSD : 3cm	○	○	○	○
	GSD : 5cm	○	△	×	○
	GSD : 7cm	○	×	×	○
LOD3.3	GSD : 3cm	○	△	△	△
	GSD : 5cm	△	×	×	△
	GSD : 7cm	△	×	×	△

○：作成可能、△：条件付き作成可能、×：作成困難

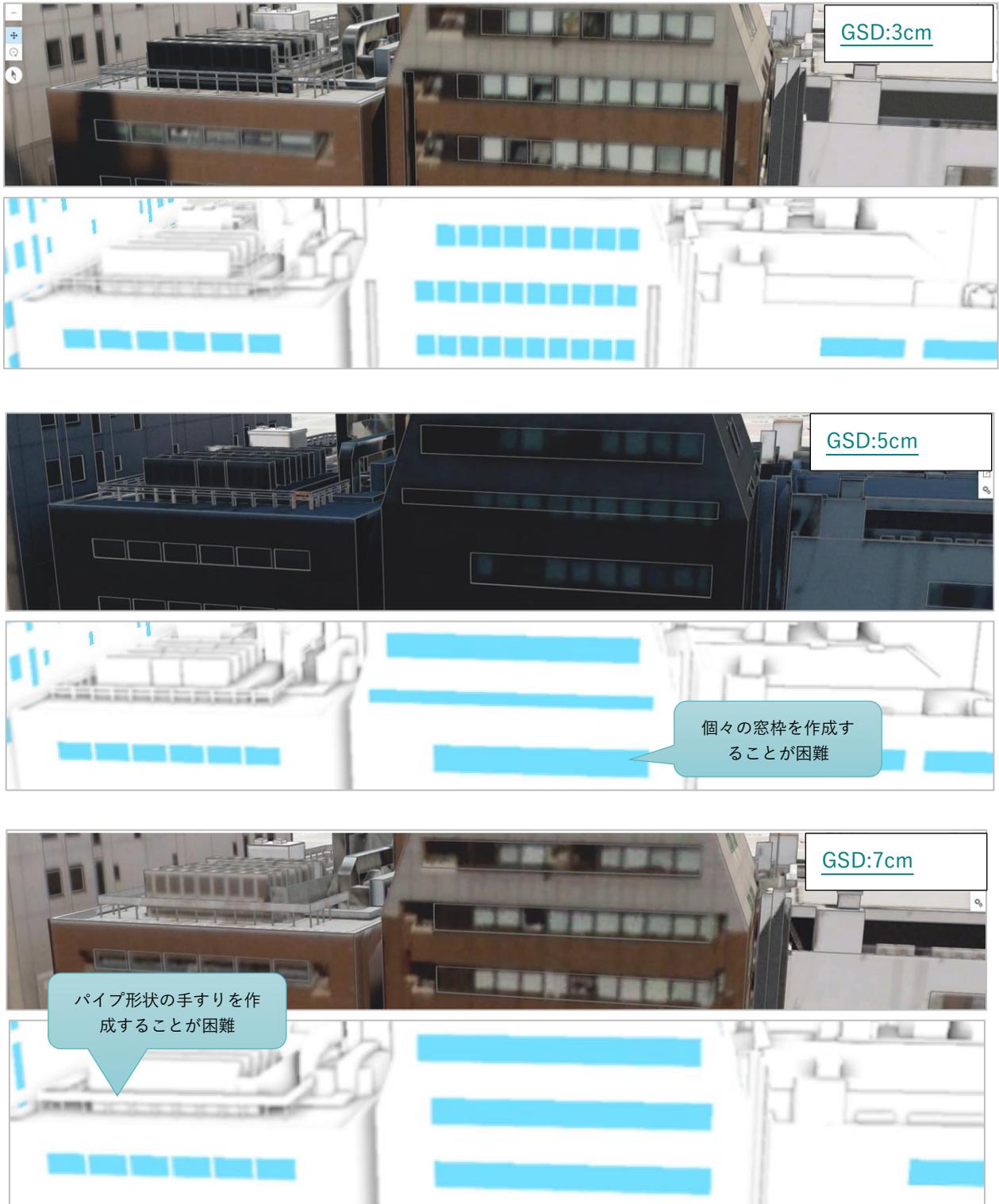


図 3-15 建築物モデル LOD3 の作成事例



図 3-16 多方向カメラ撮影画像の事例（建築物）

2) 交通（道路）モデル

交通（道路）モデルの詳細度ごとの取得基準を整理し、地上画素寸法ごとに作成可否を確認した。

いずれの地上画素寸法においても車道部、歩道部および植栽など、道路敷きの区分は識別可能であった。

地上画素寸法 5cm 及び 7cm では 15cm 程度の高さの表現は困難であった。一方で、地上画素寸法 3cm では道路横断方向の 15cm 以上の高さ表現することが可能であるが、15cm を下回る高さ表現は困難であった。

なお、15cm 程度の高さの判読は多方向撮影成果より MMS 点群のほうが明瞭であり判読しやすく、作業効率は MMS 点群のほうが効率的である。

地上画素寸法 3cm では LOD3.2、地上画素寸法 5cm 及び 7cm では LOD3.1 に相当する交通（道路）モデルが作成可能である。

表 3-16 交通（道路）モデル LOD3 の詳細度ごとの取得基準

LOD/定義	道路の横断方向の高さ	道路敷きの区分
LOD3.0	一律	車道部、車道交差部、島及び歩道部を区分
LOD3.1	一律	車道部、車道交差部、島及び歩道部を区分 車道部のうち、車線を区分
LOD3.2	15cm 以上の高さ表現 車道部、歩道部、島それぞれ高さを取得	車道部、車道交差部、島及び歩道部を区分 車道部のうち、車線を区分 歩道部のうち、植栽を区分
LOD3.3	2cm 以上の高さ表現 車道部、歩道部、島それぞれ高さを取得	車道部、車道交差部、島及び歩道部を区分 更に車道部のうち、車線を区分 歩道部のうち、植栽を区分
LOD3.4	2cm 以上の高さ表現 車道部、歩道部、島それぞれ高さを取得	車道部、車道交差部、島及び歩道部を区分 更に車道部のうち、車線を区分 歩道部のうち、植栽を区分 自転車歩行車道、植樹帯、路肩・側帯、分離帯・側帯、等 UC に応じて細分を設定

表 3-17 交通（道路）モデル LOD3 の詳細度ごとの作成可否

		道路の横断方向の高さ	道路敷きの区分
LOD3.0	GSD : 3cm	○	○
	GSD : 5cm	○	○
	GSD : 7cm	○	○
LOD3.1	GSD : 3cm	○	○
	GSD : 5cm	○	○
	GSD : 7cm	○	○
LOD3.2	GSD : 3cm	△	○
	GSD : 5cm	×	○
	GSD : 7cm	×	○
LOD3.3	GSD : 3cm	×	○
	GSD : 5cm	×	○
	GSD : 7cm	×	○
LOD3.4	GSD : 3cm	×	○
	GSD : 5cm	×	○
	GSD : 7cm	×	○

○：作成可能、△：条件付き作成可能、×：作成困難

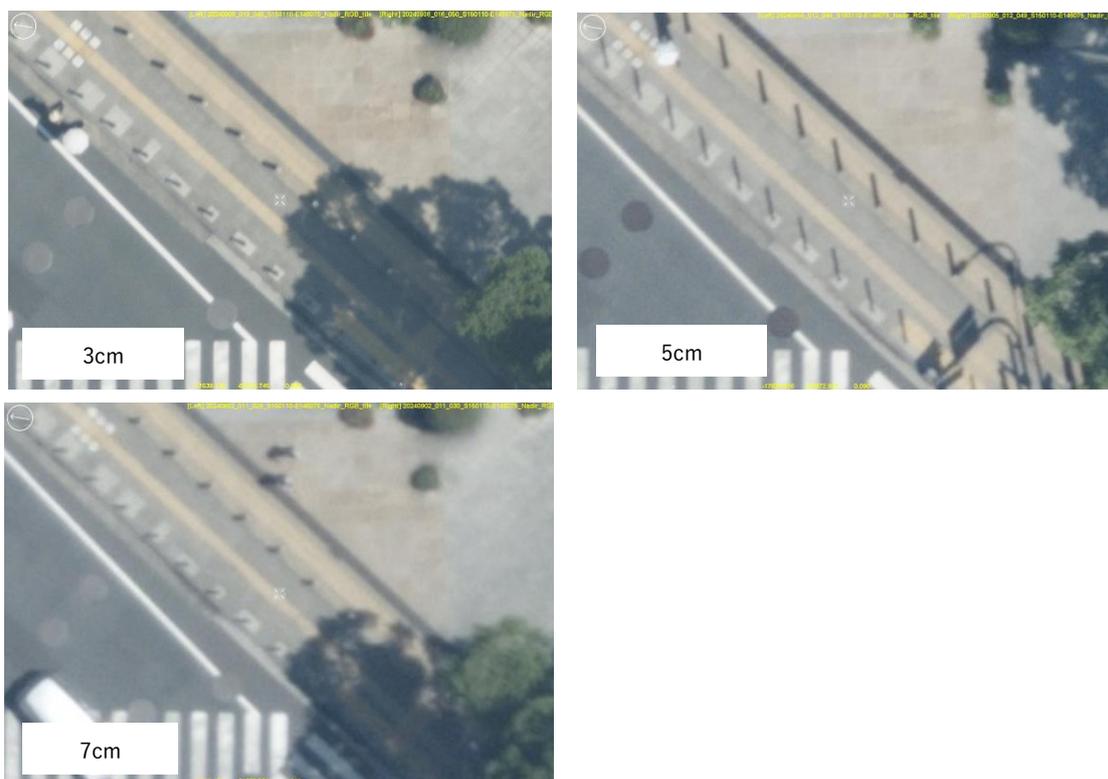
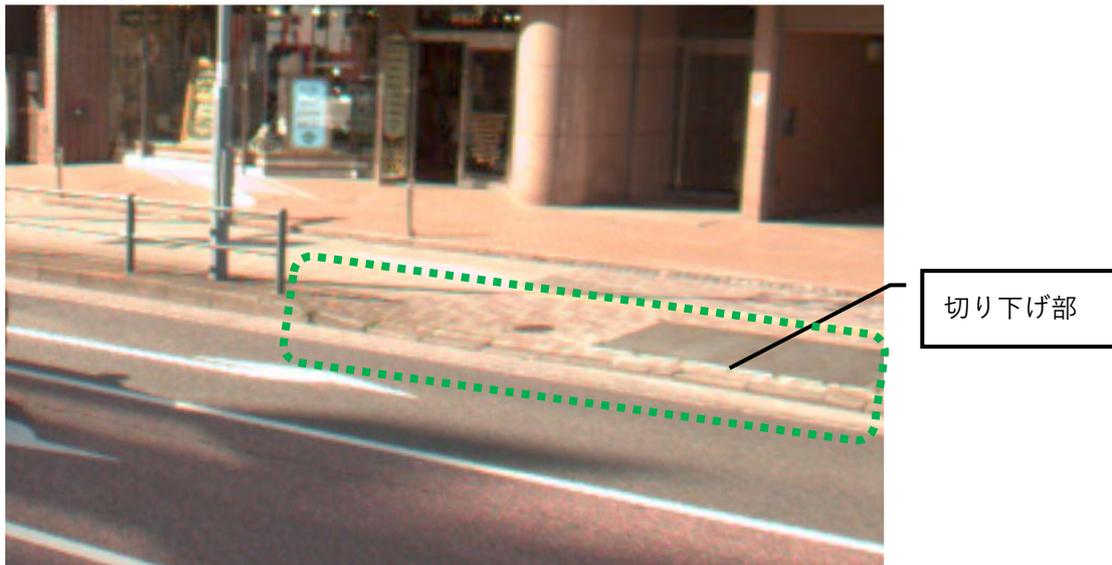


図 3-17 交通（道路）モデル LOD3 の道路敷きの判読性能



取得方法	LOD3.0	LOD3.1	LOD3.2	LOD3.3	LOD3.4
道路の横断方向の高さは一律とし、車道の高さとする。	●	●			
道路の横断方向に15cm以上の高さの差が存在した場合に、車道部、歩道部、島それぞれの高さを取得する。			●		
道路の横断方向に2cm以上の高さの差が存在した場合に、車道部、歩道部、島それぞれの高さを取得する。				●	●※

※LOD3.4における取得の下限値は、ユースケースの必要に応じて定めることができる。

図 3-18 交通（道路）モデル LOD3 の切り下げ部の高さの判読性能

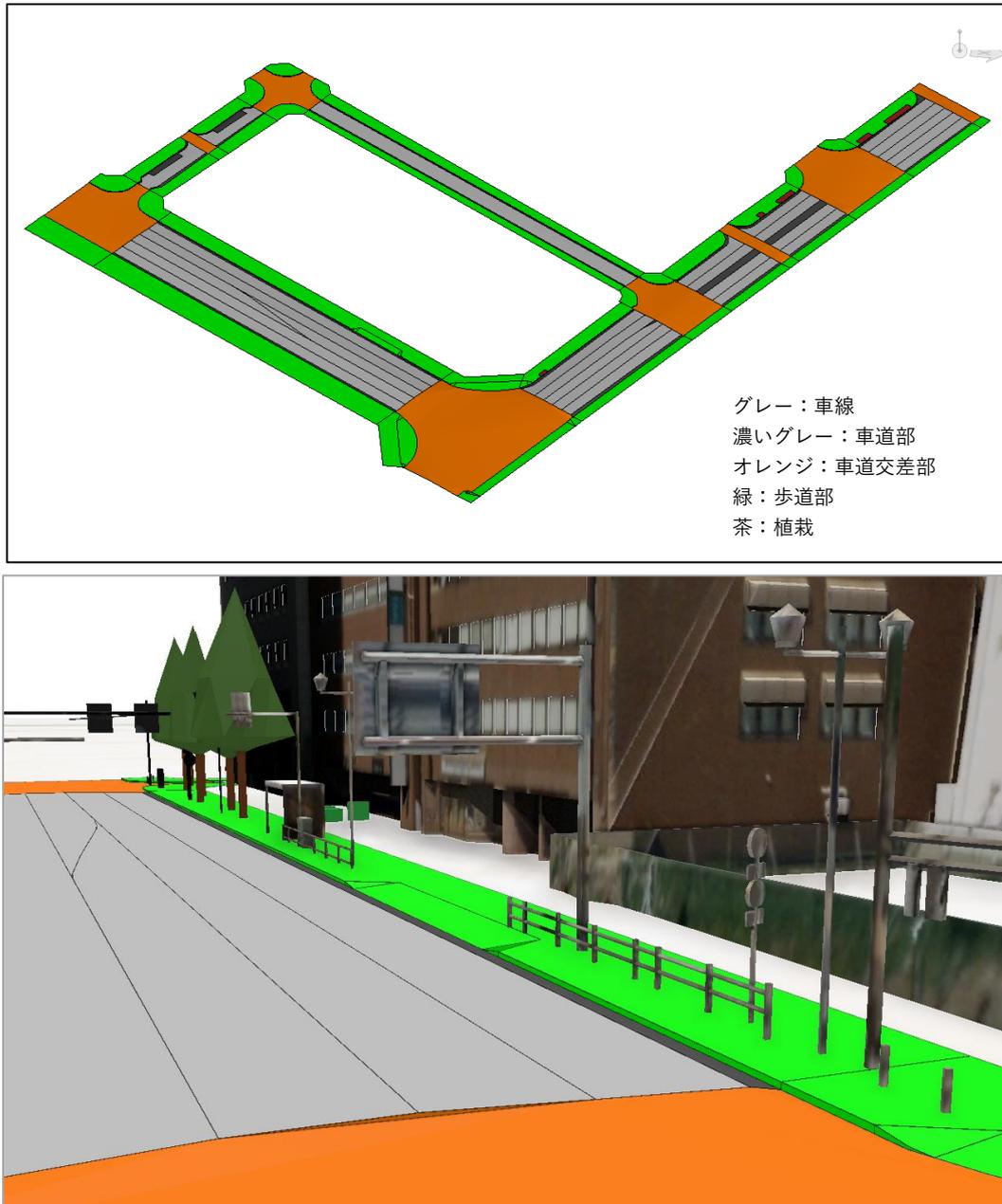


図 3-19 交通（道路）モデル LOD3 の作成事例（GSD：3cm より）

3) 橋梁モデル

橋梁モデルの詳細度ごとの取得基準を整理し、地上画素寸法ごとに作成可否を確認した。

橋脚などの構造上不可欠な部材はいずれの地上画素寸法でも作成可能であった。また、屋根も地上画素寸法 7cm を除いて作成可能である。一方で階段はいずれの地上画素寸法も個々の段を作成することが困難であった。ただし、あらかじめ階段の寸法などの現地調査情報を得ることができれば作成は可能である。また、橋梁には必ずしも階段があるとは限らないため条件付きで作成可能とした。

地上画素寸法 3cm、5cm は LOD3.0 に相当し、地上画素寸法 7cm は LOD2.1 に相当する橋梁モデルを作成可能である。

表 3-18 橋梁モデル LOD3 の詳細度ごとの取得基準

LOD/定義	橋脚などの構造上不可欠な部材	屋根	階段
LOD2.1	床版及び主桁によって、厚みと高さをもった立体	Roof,Wall 等境界面を分けてシンプルな形で取得	個々の段は取得せず、下端と上端を結んだ面
LOD3.0	床版及び主桁によって、厚みと高さをもった立体 高欄、パイロン、ケーブル、橋梁の外観を構成する部材	BridgeInstallation として詳細に取得	個々の段を取得

表 3-19 橋梁モデル LOD3 の詳細度ごとの作成可否

		橋脚などの構造上不可欠な部材	屋根	階段
LOD2.1	GSD: 3cm	○	○	○
	GSD: 5cm	○	○	○
	GSD: 7cm	○	○	○
LOD3.0	GSD: 3cm	○	○	△
	GSD: 5cm	○	○	△
	GSD: 7cm	○	×	△

○：作成可能、△：条件付き作成可能、×：作成困難



図 3-20 橋梁モデル LOD3 の作成事例

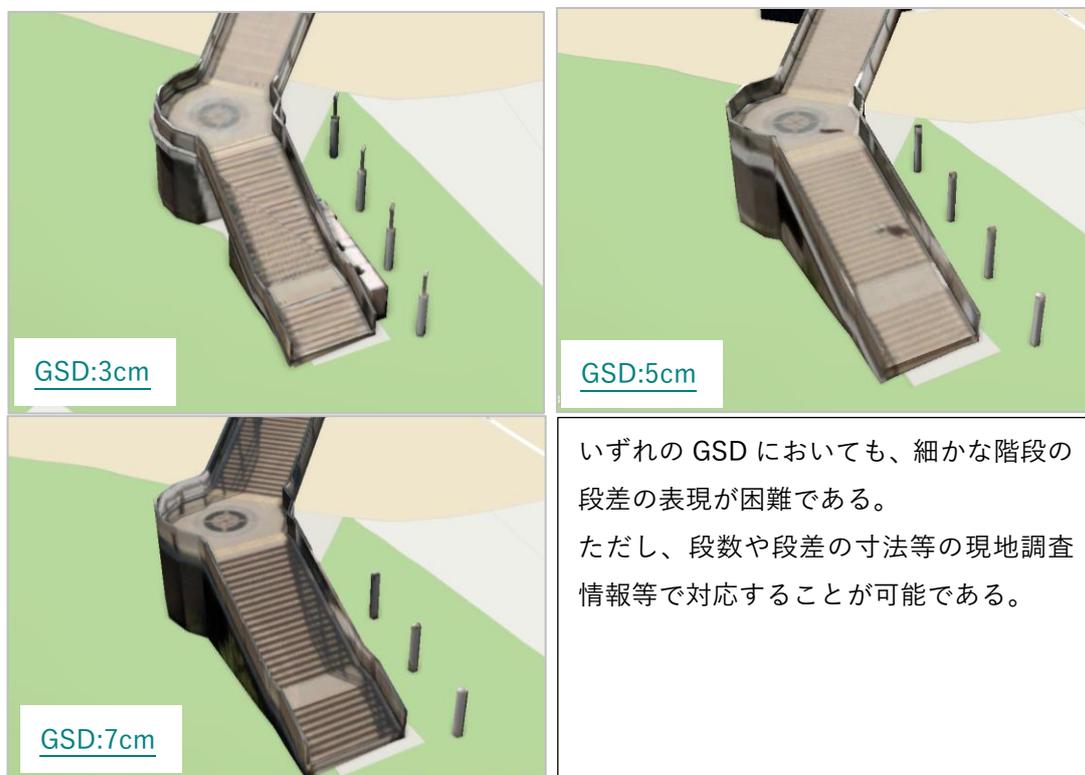


図 3-21 橋梁モデル LOD3 の作成事例

4) 都市設備モデル

都市設備モデルの詳細度ごとの取得基準を整理し、地上画素寸法ごとに作成可否を確認した。

外周形状はいずれの地上画素寸法においても作成可能である。地上画素寸法 3cm では、照明などの小さな形状やガードパイプ、その他柱状物を精緻に作成可能であった。一方で、地上画素寸法 5cm、7cm ではやや抽象度を増すことで作成可能であるが、主要な部品同士の接続部の表現は困難であった。地上画素寸法 3cm は LOD3.1、地上画素寸法 5cm、7cm は LOD3.0 に相当する都市設備モデルを作成可能である。

表 3-20 都市設備モデル LOD3 の詳細度ごとの取得基準

LOD/定義	外周形状	外形を構成する特徴点
LOD3.0	形状は LOD2 よりも詳細化 マンホール、区画線等	高さごとの断面を構成する頂点情報 主要な部分同士の接続部は表現不要
LOD3.1	-	高さごとの断面を構成する頂点情報 主要な部分同士の接続部は表現必要

表 3-21 都市設備モデル LOD3 の詳細度ごとの作成可否

		外周形状	外周を構成する特徴点
LOD3.0	GSD : 3cm	○	○
	GSD : 5cm	○	△
	GSD : 7cm	○	△
LOD3.1	GSD : 3cm	○	△
	GSD : 5cm	○	×
	GSD : 7cm	○	×

○：作成可能、△：条件付き作成可能、×：作成困難

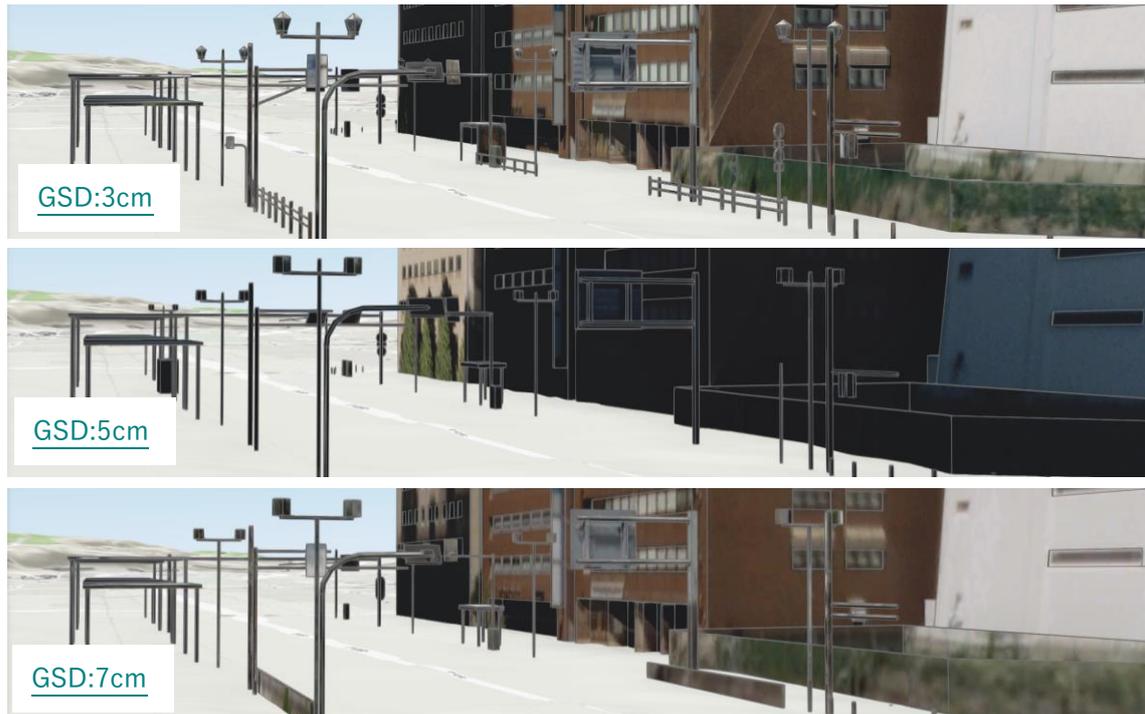


図 3-22 都市設備モデル LOD3 の作成事例



図 3-23 多方向カメラ撮影画像の事例（都市設備）

5) 植生モデル

植生モデルの詳細度ごとの取得基準を整理し、地上画素寸法ごとに作成可否を確認した。

いずれの地上画素寸法においても、一定の高さごとに樹幹を横断的に作成可能であり、比高 1m 以上の植被も作成可能であった。いずれの地上画素寸法も LOD3.1 に相当した植生モデルを作成可能である。

表 3-22 植生モデル LOD3 の詳細度ごとの取得基準

LOD/定義	樹冠と樹幹	外形を構成する特徴点
LOD2	簡略化した立体とは、楕円体、球体、円錐、角錐、角柱、円柱などの単純な立体図形	植被の表層の高さを取得し、比高 3m 以上を再現した立体
LOD3	一定高さごとに樹冠の横断面を作成し、この頂点を結び外形を構成	植被の表層の高さを取得し、比高 1m 以上を再現した立体

表 3-23 植生モデル LOD3 の詳細度ごとの作成可否

		樹冠と樹幹	外形を構成する特徴点
LOD2	GSD : 3cm	○	○
	GSD : 5cm	○	○
	GSD : 7cm	○	○
LOD3	GSD : 3cm	○	○
	GSD : 5cm	○	○
	GSD : 7cm	○	○

○ : 作成可能、△ : 条件付き作成可能、× : 作成困難

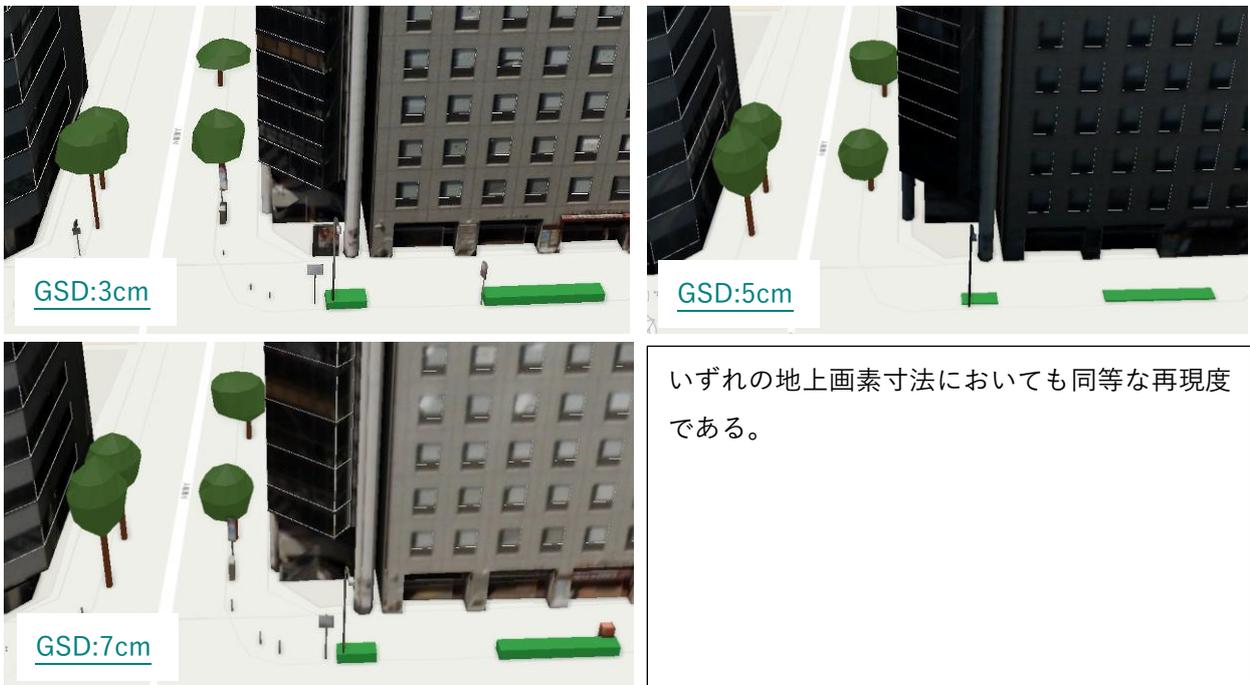


図 3-24 植生モデル LOD3 の作成事例

地上画素寸法ごとに作成した 3D 都市モデルが相当する LOD を表 3-24 に示す。

ただし、撮影条件によっては、ビル影や光量不足の影響によりって写真が暗く判読が難しい場合もある。また、橋梁モデル LOD3 の階段は現地調査結果などの補足情報を得ることで対応可能となる。このように条件が勘案されることにより作成可否が変わるものもあり、地上画素寸法に相当する LOD は目安としてとらえておくことが望ましい。

表 3-24 地上画素寸法に相当する LOD 一覧

地物 クラス	GSD	相当 する LOD	モデリング結果の特徴
建築物	3cm	3.3	・個々の窓枠を作成可能 ・建築物付属物の屋上の手すり等精緻に作成可能
	5cm	3.1	・個々の窓枠の作成が困難 ・建築物付属物の屋上の手すり等精緻に作成可能
	7cm	3.1	・個々の窓枠の作成が困難 ・建築物付属物の屋上の手すり等精緻に作成が困難
交通(道路)	3cm	3.2	・車道部、歩道部及び植栽等、道路敷きの区分は識別可能 ・15cm 以上の高さの表現は可能であるが、2cm 以上の高さの表現は困難。 (なお、現地の景況を示す写真など予情報があると対応しやすい。)
	5cm	3.1	・車道部、歩道部及び植栽等、道路敷きの区分は識別可能 ・15cm 以上の高さの表現は困難
	7cm	3.1	・車道部、歩道部及び植栽等、道路敷きの区分は識別可能 ・15cm 以上の高さの表現は困難
橋梁	3cm	3.0	・床板及び主桁は厚みを持って作成可能。高欄なども作成可能 ・Building Installation として詳細に取得可能 ・階段は個々の段を取得することが困難、ただし現地補測情報等で対応可能。または、階段のない橋梁であれば対応可能
	5cm	3.0	・床板及び主桁は厚みを持って作成可能。高欄なども作成可能 ・Building Installation として詳細に取得可能 ・階段は個々の段を取得することが困難、ただし現地補測情報等で対応可能。または、階段のない橋梁であれば対応可能
	7cm	2.1	・床板及び主桁は厚みを持って作成可能。高欄なども作成可能 ・シンプルな形状は作成可能。Building Installation 等詳細な形状は困難 ・階段は個々の段を取得することが困難
都市設備	3cm	3.1	・照明等の規模の形状 ss を精緻に作成可能 ・柱状物も精緻に作成可能 ・ガードパイプも精緻に作成可能
	5cm	3.0	・照明等の規模の形状は精緻に作成が困難。抽象化して作成可能 ・柱状物は精緻に作成が困難。抽象化して作成可能 ・ガードパイプは作成が困難 (※撮影成果の影の影響による)
	7cm	3.0	・照明等の規模の形状は精緻に作成が困難。抽象化して作成可能 ・柱状物も精緻に作成が困難。中には認知できない場合もある ・ガードパイプは作成が困難。抽象化して作成可能
植生	3cm	3	・一定高さごとに樹幹を横断的に作成可能 ・植被の高さを取得し、比高 1m 以上を作成可能
	5cm	3	・一定高さごとに樹幹を横断的に作成可能 ・植被の高さを取得し、比高 1m 以上を作成可能
	7cm	3	・一定高さごとに樹幹を横断的に作成可能 ・植被の高さを取得し、比高 1m 以上を作成可能

※赤字：条件付き作成可又は作成困難

3-4-4. 多方向カメラを用いた LOD3 整備手法の評価

多方向カメラによる整備手法と、車載写真レーザ測量+垂直カメラによる従来手法のコストを整理した。(表 3-25) また、本調査結果にもとづき、実際の 3D 都市モデル整備作業に要するコストの試算を行った。試算条件は、中核市・特例市レベル(約 30k m²)とし、従来手法(車載写真レーザ測量+垂直カメラ)と多方向カメラによる手法を試算し比較した。(表 3-26)

表 3-25 従来手法と多方向カメラを用いた LOD3 整備手法のコスト比較

工程	整備コスト (万円)		コスト試算条件等
	①従来手法 車載写真レーザ測量 +垂直カメラ	②新手法 多方向カメラ	
建築物モデル LOD3.1	1,510	710	● 建築物 300 棟
建築物モデル LOD3.3	2,460	940	● 建築物 300 棟
交通(道路)モ デル LOD3.1	120	120	● 作業区間 2km
交通(道路)モ デル LOD3.2	180	260	● 作業区間 2km
橋梁モデル LOD2.1	150	90	● 3 橋(規模の大きなものを想定)
橋梁モデル LOD3.0	600	340	● 3 橋(規模の大きなものを想定)
都市設備モデル LOD3.0	160	120	● 作業区間 2km
都市設備モデル LOD3.1	180	130	● 作業区間 2km
植生モデル LOD3	80	50	● 作業区間 2km

表 3-26 従来手法と多方向カメラによる高次詳細度モデル作成の試算

工程	整備コスト（万円）		コスト試算条件等
	①従来手法 車載写真レーザ測量 +垂直カメラ	②新手法 多方向カメラ	
空中写真撮影	530	1,200 (GSD3cm) 960 (GSD5cm) 870 (GSD7cm)	<ul style="list-style-type: none"> ● 撮影エリア 30k m² ● 垂直カメラ撮影重複度：OL80×SL60 ● 多方向カメラ直下視の撮影重複度：OL60×SL50
車載写真 レーザ測量	200	0	<ul style="list-style-type: none"> ● LOD3 整備範囲として延長 2km の計測
建築物モデル LOD1 作成	50	50	<ul style="list-style-type: none"> ● 中核市・特例市レベル（約 30k m²）を想定
建築物モデル LOD2.0 作成	120	120	<ul style="list-style-type: none"> ● LOD2 整備範囲として 1k m²
建築物モデル LOD3.1 作成	1,510	710	<ul style="list-style-type: none"> ● 建築物 300 棟
交通（道路）モ デル LOD3.1 作成	120	120	<ul style="list-style-type: none"> ● 作業区間 2km
橋 梁 モ デ ル LOD2.1 作成	150	90	<ul style="list-style-type: none"> ● 3 橋（規模の大きなものを想定）
都市設備モデ ル LOD3.1 作 成	180	130	<ul style="list-style-type: none"> ● 作業区間 2km
植 生 モ デ ル LOD3 作成	80	50	<ul style="list-style-type: none"> ● 作業区間 2km
合計	2,940	2,470 (GSD3cm) 2,230 (GSD5cm) 2,140 (GSD7cm)	<p>⇒多方向カメラを用いた整備手法では、空中写真撮影作業のコストは大きくなるが、後続工程のモデル作成作業でコストが低減する。</p> <p>⇒本試算条件では、470 万～800 万円の削減効果が期待できる。</p>

4. 多方向カメラ画像によって整備した 3D 都市モデルを公共測量成果とするための要件整理

4-1. 調査目的

- 多方向カメラ撮影成果を基に作成する 3D 都市モデルを公共測量とするための要件を確認する

4-2. 調査結果

国土交通省国土地理院に本調査内容について確認した。新しい測量技術である多方向カメラによる空中写真撮影測量は「作業マニュアル（多方向カメラ空中写真測量マニュアル）」と「精度検証報告書」の確認を得て、公共測量作業規程 第 17 条 2 項を適用し、公共測量申請を行うことができる。所定の精度が確認された多方向カメラ撮影成果は公共測量成果として認められることになる。その成果を使用し、「3D 都市モデル整備のための測量マニュアル（国土交通省 都市局）：公共測量作業規程第 17 条 2 項適用」により、多方向撮影成果による 3D 都市モデル作成が認められることになる。

なお、公共測量として認められた多方向カメラ撮影成果を使用することにより、3D 都市モデル作成以外にも例えば数値地形図作成を行うことも認められる。各作業マニュアルと公共測量作業規程の位置づけを図 4-1 に示す。

本調査では、「多方向カメラ（CityMapper-2）空中写真測量マニュアル（案）」を作成した。また、精度検証結果を報告し、国土地理院の確認を得た。巻末に「多方向カメラ（CityMapper-2）空中写真測量マニュアル（案）」を付属資料として掲載する。なお、本作業マニュアルで使用する多方向カメラは CityMapper-2（ライカジオシステムズ社）について記載しているため、他種の多方向カメラを使用する際は適宜、名称やカメラパラメータなどの更新を行う必要がある。また、同一種のカメラであっても個体ごとに精度検証報告が必要となる。

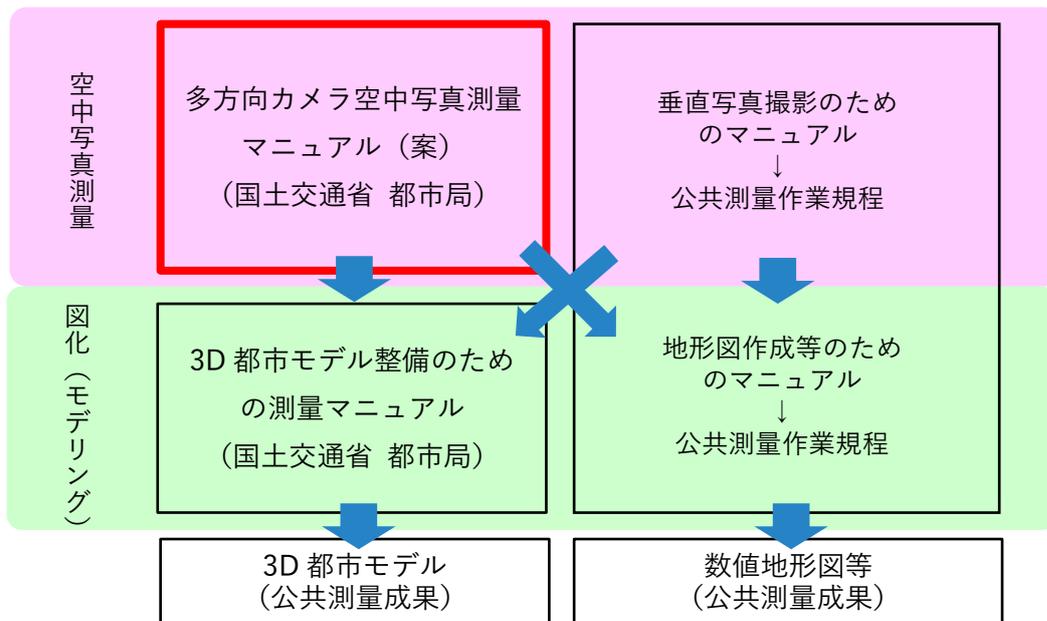


図 4-1 各作業マニュアルと公共測量作業規程の位置づけ

5. 成果と課題

5-1. 本調査・検討で得られた成果

本調査の結果にもとづき、2つの課題に対しては、以下の方法でデータ整備を進めることが効果的であると考えられる。

1) 3D 都市モデル作成に適したカメラの選択

- 鉛直解像度に影響する垂直カメラのカメラパラメータは、焦点距離とセンササイズの比によって決定される画角である。画角が大きいカメラのほうがテクスチャを取得可能である。
- 一般的に高い重複度の空中写真測量撮影では、OL/SL=60%/60%、80%/60%、80%/80%に設定することが多く、この撮影重複度ごとに主たる航空カメラの鉛直解像度を整理した
- 密集した高層ビル群においても多方向カメラは有効であり、垂直カメラと比較しても鉛直解像度が高く、均質である

2) 公共測量を前提とした多方向カメラの撮影成果による多様な高詳細度地物モデルの作成

- 多方向カメラによる撮影成果をもとに、高詳細度の建築物モデル、交通（道路）モデル、都市設備モデル、橋梁モデル、植生モデルを作成することができた
- 多方向カメラ整備手法による3D都市モデルの作成目安を地上画素寸法とLODごとに整理した(表 3-24)
- 作成した3D都市モデルは地図情報レベル2500の位置正確度を十分に満たすことを確認した
- 橋梁モデル等は現地調査情報などを併用することで高次詳細度モデルの作成が可能である
- 多方向カメラによる整備手法と垂直カメラ+MMSによる従来手法のコストを試算した結果、都市域規模の広域を整備する場合は、多方向カメラによる整備手法が有効である(表 3-26)
- 多方向カメラ空中写真測量マニュアルと精度検証報告書について国土地理院の確認を得た上で、公共測量作業規程の17条2項を適用することで、多方向カメラによる整備手法で作成した3D都市モデルは公共測量として適合できる
- 多方向カメラ撮影成果の公共測量作業規程の17条2項の適用のためのマニュアル及び精度検証結果を作成した。マニュアルは本調査レポートの付属資料として掲載した。

5-2. 今後の課題と展望

本調査の結果、3D 都市モデル整備で重要な原典資料である空中写真撮影に用いられるカメラの特性が明らかとなった。新規に撮影を行う場合は 3D 都市モデル作成を考慮した効率的な撮影を行うことができる。また、既存の撮影成果に対しては事前にテクスチャ品質の見通しを立てることができ必要に応じて是正対応が可能となる。

多方向カメラは地域特性にとらわれず高解像度で均質なテクスチャ品質を得ることができる。また、公共測量として高詳細度モデルの作成も可能となった。垂直写真撮影と比較し撮影コストはかさむが、広大な市街地である都市域規模の広範囲にわたり高詳細度モデルの整備を行う際に極めて有効な手法である。

一方で、垂直カメラと比較すると多方向カメラの全国的な普及はこれからである。本調査で作成した「多方向カメラ空中写真測量マニュアル」が活用され、多方向カメラによる 3D 都市モデル作成が広く普及されることを期待したい。

また、これから実施する空中写真撮影においても、本調査結果を参考に今後の 3D 都市モデル整備を念頭においた撮影方法を検討されることを期待したい。特に多方向カメラ撮影によって広範囲を高詳細度の 3D 都市モデル整備が飛躍的に推進することが考えられ、Society 5.0 やデジタルツイン実現に貢献することが予想される。

多方向カメラによる効率的な LOD3 モデル整備手法の調査
技術検証レポート

発行：2025年3月

委託者：国土交通省 都市局

受託者：国際航業株式会社