

## (19) SfM, TLSとTSによる 三次元建物モデルの精度の検証と向上

久保寺 貴彦<sup>1</sup>・政春 尋志<sup>2</sup>・里見 裕己<sup>3</sup>・川井 純也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東洋大学助教 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: kubodera@toyo.jp

<sup>2</sup>正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: masaharu@toyo.jp

<sup>3</sup>学生非会員 東洋大学 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

SfMとTLSによる三次元モデルの精度の検証のため、それぞれ三次元建物モデルを作成し、建物の長辺8カ所、短辺8カ所、高さ12カ所を計測して平均値と標準偏差を算出した。精度検証のため、TSによる実測値に着目して、個々の較差とRMSE、相対誤差と標準偏差を求めた。また、SfMで作成した三次元モデルの高さにTSによる実測値を指定して縮尺補正することで、三次元モデルの精度向上を図った。この結果、TLS、補正SfM、SfMの順で、精度が高いこと、SfMは、TSの実測値をモデルに与えて縮尺補正すれば、相対誤差を5%前後から1%前後まで下げられ、TLSの相対誤差に1.5%差に準ずる精度まで高められることなどがわかった。

**Key Words :** SfM, TLS, TS, 3D model

### 1. はじめに

国土交通省は現在、Information and Communication Technology (ICT)の全面的な活用等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取組であるi-Constructionを進めている。i-Constructionによって、三次元データの活用も進んでいる。例えば、災害調査<sup>1)</sup>、土工事<sup>2)</sup>、橋脚など<sup>3,4)</sup>の構造物の分野では、重複した写真から三次元モデルを作成できるStructure from Motion (以下、SfM)やRGB値付き三次元点群数万点を観測できる地上レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner; 以下、TLS)などの研究に注目されている。なお、TLSは、公共測量にも利用<sup>5)</sup>されており、土木構造物のみならず建物など広域の地物も観測対象である。ただ、SfMとTLSは、三次元モデル作成という点で共通であるが、全く異なるアルゴリズムであるため、精度の比較検証が望まれている<sup>1,3)</sup>。

本研究は、SfMとTLSによる三次元モデルの精度の検証のため、それぞれ三次元建物モデルを作成し、建物の長辺8カ所、短辺8カ所、高さ12カ所を計測して平均値と標準偏差を算出した。精度検証のため、トータルステーション(以下、TS)により実測して、個々の較差とRMSE、

相対誤差と標準偏差を求めた。また、SfMで作成した三次元モデルの高さにTSによる実測値を指定して縮尺補正することで、三次元モデルの精度向上を図った。

### 2. SfMとTLSによる三次元建物モデル作成の概要

研究対象とした建物は、図-1に示す東洋大学川越キャンパス コミュニティーセンターである。図-2にSfMによる三次元建物モデルを示す。図-2 (a)は、建物の真上から見たカメラ撮影位置であり、建物全周を囲うように



図-1 東洋大学川越キャンパス コミュニティーセンター



(a) 真上から見たカメラ撮影位置



(b) 作成した三次元建物モデル

図-2 SfMによる三次元建物モデル



図-3 TLS



図-4 TLSにより観測したRGB値付き三次元点群

十分に重複しつつ撮影した。用いたカメラは、デジタル一眼レフカメラNikon D750単焦点レンズ24 mmである。図-2 (b)は、SfMソフトウェアPhotoScan Professional 1.2.6を用いて作成した三次元建物モデルである。図-3は、用いたTLS TIアサヒS-3180Vであり、建物全周を囲うように8カ所から観測した。図-4は、TLSにより観測したRGB値付き三次元点群であり、ArcScene10.4.1で表示した。図-5は、それぞれ作成した三次元建物モデルの精度検証のため、TSのノンプリズムモード対辺測定による建物の実測である。用いたTSは、SOKKIA SET650RXSである。TSは斜距離、鉛直角と水平角を同時に観測しているので、対辺測定では2点間の水平距離と高低差が正確に求まる。

### 3. TSによる実測値を真値と仮定した三次元建物モデルの精度の検証と向上

SfMとTLSによる三次元モデルの精度の検証のため、それぞれ三次元建物モデルを作成して、図-6に示す建物の長辺8カ所、短辺8カ所、高さ12カ所について、それぞれ計測した。また、同箇所について、TSによる実測を



図-5 TSの対辺測定による実測

行った。この三次元建物モデルの計測値とTSの実測値を表-1に示す。補正SfMは、SfMの番号H1の高さにTSの高さを指定してSfMを縮尺補正したモデルである。対象が建物であるので、単位は、mmとした。

建物の長辺、短辺、高さについて、較差のRMSEをそれぞれ求めた。較差は、TSによる実測値を真値と仮定したときのそれぞれの較差である。また、計測値の平均値とその標準偏差(S.D.)<sup>9</sup>を式(1)から算出して、TSの平均値を真値と仮定したときのSfM、補正SfM、TLSの相対

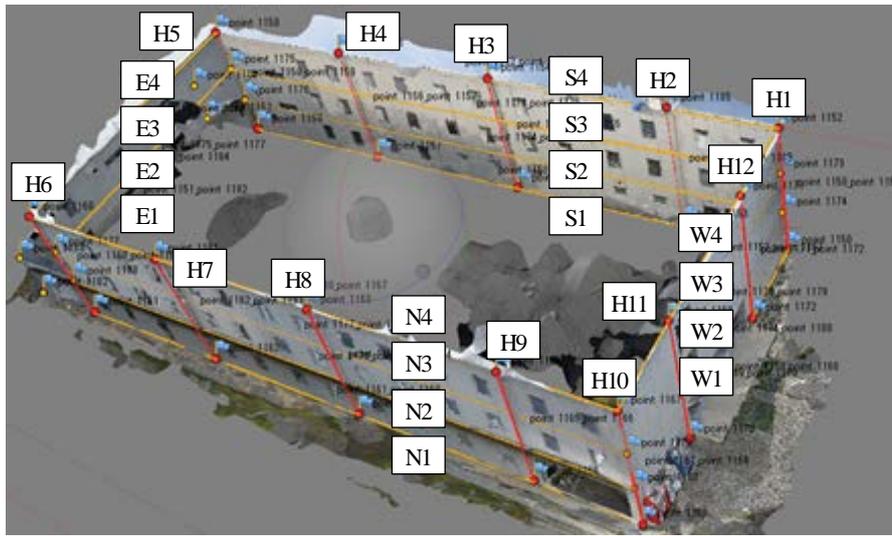


図-6 計測値の番号

表-1 三次元建物モデルの計測値と TS の実測値

(a) 建物の長辺						(b) 建物の短辺									
番号	計測値[mm]				TS との較差[mm]			番号	計測値[mm]				TS との較差[mm]		
	SfM	補正SfM	TLS	TS(実測)	SfM	補正SfM	TLS		SfM	補正SfM	TLS	TS(実測)	SfM	補正SfM	TLS
S1	44,907	43,129	42,412	42,135	2,772	994	277	W1	21,337	20,492	20,174	20,187	1,150	305	-13
N1	44,717	42,947	42,369	41,954	2,763	993	415	E1	21,404	20,557	20,173	20,187	1,217	370	-14
S2	44,724	42,953	42,427	42,390	2,334	563	37	W2	21,235	20,394	20,185	20,161	1,074	233	24
N2	44,641	42,873	42,406	42,407	2,234	466	-1	E2	21,305	20,461	20,174	20,187	1,118	274	-13
S3	44,682	42,913	42,399	42,382	2,300	531	17	W3	21,203	20,363	20,183	20,154	1,049	209	29
N3	44,619	42,852	42,362	42,389	2,230	463	-27	E3	21,295	20,452	20,171	20,210	1,085	242	-39
S4	44,674	42,905	42,437	42,411	2,263	494	26	W4	21,197	20,357	20,172	20,168	1,029	189	4
N4	44,665	42,896	42,444	42,414	2,251	482	30	E4	21,441	20,592	20,183	20,189	1,252	403	-6
平均値	44,704	42,934	42,407	42,310	RMSE[mm]			平均値	21,302	20,459	20,177	20,180	RMSE[mm]		
同S.D.	32	30	11	61	2,403	660	178	同S.D.	32	31	2	6	1,124	287	21
相対誤差 [%]	5.658	1.475	0.229	0.000				相対誤差 [%]	5.560	1.383	-0.015	0.000			
同S.D.	0.169	0.162	0.146	—				同S.D.	0.161	0.155	0.033	—			

(c) 建物の高さ							
番号	計測値[mm]				TS との較差[mm]		
	SfM	補正SfM	TLS	TS(実測)	SfM	補正SfM	TLS
H1	10,294	9,886	9,869	9,886	408	0	-17
H2	10,174	9,771	9,836	9,798	376	-27	38
H3	10,251	9,845	9,802	9,788	463	57	14
H4	10,226	9,821	9,813	9,769	457	52	44
H5	10,142	9,741	9,821	9,804	338	-63	17
H6	10,359	9,949	9,837	9,851	508	98	-14
H7	10,330	9,921	9,844	9,868	462	53	-24
H8	10,357	9,947	9,867	9,860	497	87	7
H9	10,351	9,941	9,868	9,863	488	78	5
H10	10,383	9,972	9,884	9,879	504	93	5
H11	10,477	10,062	9,886	9,927	550	135	-41
H12	10,362	9,952	9,880	9,921	441	31	-41
平均値	10,309	9,901	9,851	9,851	RMSE[mm]		
同S.D.	28	26	8	15	461	73	26
相対誤差 [%]	4.649	0.508	0.000	0.000			
同S.D.	0.321	0.308	0.173	—			

誤差と標準偏差<sup>9)</sup>を式(2)と式(3)からそれぞれ算出した。なお、コミュニティセンターは、細かな凹凸を除けばほぼ直方体形状の建物であると仮定した。また、測量では100mに対してmm単位の精度が要求されることから、相対誤差は、小数第3位まで算出した。

$$M = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

ここで、 $M$  : 平均値の標準偏差  
 $v_i$  : 残差

$$f = \frac{x_2 - x_1}{x_1} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $f$  : 相対誤差 [%]  
 $x_1$  : TSの実測値の平均値 [mm]  
 $x_2$  : SfM, 補正SfM, TLSの計測値の平均値 [mm]

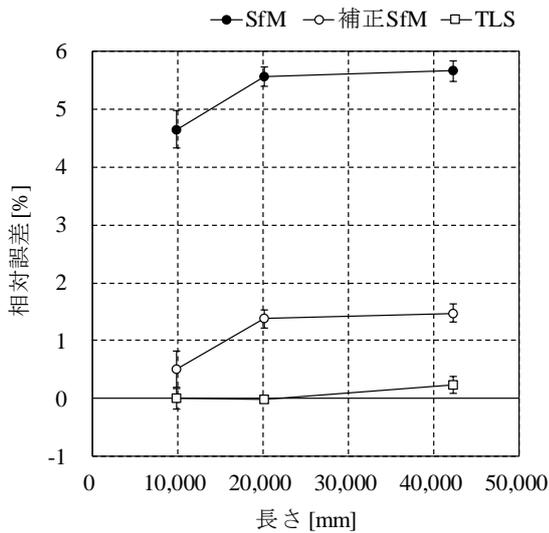


図-7 長さとの関係

$$M = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_2^2} \quad (3)$$

ここで、 $M$  : 相対誤差の標準偏差(S.D.)

$m_1$  : TSの実測値の平均値のS.D.

$m_2$  : SfM, 補正SfM, TLSの計測値の平均値のS.D.

建物の長辺、短辺、高さそれぞれのRMSEに着目すると、いずれも TLS, 補正SfM, SfMの順で、精度が高いことがわかった。図-2 (b)と図-6の建物の角に着目すると、鉛直方向に外向きの傾きがあるかのように見られるが、表-1(a)のS1, N1, S4, N4, 表-1(b)のW1, E1, W4, E4におけるSfMのそれぞれの計測値を比較すると、建物上の方が若干短くなっていることから、図-2 (b)と図-6の鉛直方向について斜めに俯瞰した中心投影の影響であると考えられる。また、図-6の建物のEの短辺はWの短辺に対して短く見られるが、表-1(a)のEのSfMの計測値はWのそれに対して若干長いことから、図-6の奥行方向についても斜めに俯瞰した中心投影の影響であると考えられる。

表-1のSfM, 補正SfM, TLSの相対誤差とその標準偏差をもとにして、長さとの関係を図-7に示す。TLSの相対誤差は、0%前後であって極めて精度が高く、長辺であっても0.2%程度の高精度であった。建物の高さのSfMと補正SfMの相対誤差は、長辺と短辺のそれらに比べて小さいこと、すなわち精度が高いことがわかった。このことは、空中写真測量では苦手とされている鉛直方向の測量に対して、側面からのSfMは優位であるといえる。長さ20,000mm以降では、SfMと補正SfMの相対誤差は安定傾向にあることがわかった。SfMは、TSの実測値をモデルに与えて縮尺補正すれば、相対誤差を5%前後から1%前後まで下げられることがわかった。今回の精度向上は、高価なTLSに対して、安価なSfMは、TSの実測値をモデルに与えて縮尺補正すれば、TLSの相対誤差

に1.5%差に準ずる精度まで高められることがわかった。

#### 4. おわりに

SfMとTLSによる三次元モデルの精度の検証のため、それぞれ三次元建物モデルを作成し、建物の長辺8カ所、短辺8カ所、高さ12カ所を計測して平均値と標準偏差を算出した。精度検証のため、TSによる実測値に着目して、個々の較差とRMSE, 相対誤差と標準偏差を求めた。また、SfMで作成した三次元モデルの高さにTSによる実測値を指定して縮尺補正することで、三次元モデルの精度向上を図った。その結果、次の事柄が得られた。

- 1) 建物の長辺、短辺、高さそれぞれのRMSEに着目すると、いずれも TLS, 補正SfM, SfMの順で、精度が高いことがわかった。
- 2) TLSの相対誤差は、0%前後であって極めて精度が高く、長辺であっても0.2%程度の高精度であった。
- 3) 建物の高さのSfMと補正SfMの相対誤差は、長辺と短辺のそれらに比べて小さいこと、すなわち精度が高いことがわかった。このことは、空中写真測量では苦手とされている鉛直方向の測量に対して、側面からのSfMは優位であるといえる。
- 4) SfMは、TSの実測値をモデルに与えて縮尺補正すれば、相対誤差を5%前後から1%前後まで下げられることがわかった。
- 5) 高価なTLSに対して、安価なSfMは、TSの実測値をモデルに与えて縮尺補正すれば、TLSの相対誤差に1.5%差に準ずる精度まで高められることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子: SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 第81号, pp.37-60, 2014.
- 2) 岩崎孝夫, 清水裕雄, 平井晶: 土工事の土量管理測量について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第71回, 第VI部門, pp.1843-1844, 2016.
- 3) 谷口真奈花, 平野秀臣, 山本義幸, 中村栄治: 3DレーザスキャナとSfMからの点群データを活用した橋梁の復元図作成の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第71回, 第VI部門, pp.1857-1858, 2016.
- 4) 北田祐平, 安室喜弘, 檀寛成, 松下亮介, 西形達明: SfMとMVSに基づいた現場のモデル化によるレーザスキャン計画の最適化とその運用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 71, No. 2, pp.169-175, 2015.
- 5) 国土交通省国土地理院: 地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案), pp.1-57, 2017.
- 6) 田島稔, 小牧和雄: 最小二乗法と測量網平均の基礎, pp.40-46, pp.97-98, 2003.