

国土交通省総合技術開発プロジェクト H27～29年度  
3次元地理空間情報を活用した  
安心・安全・快適な社会の実現のための技術開発

資料 2-4

## (4) 廉価に屋内3次元空間をモデル化

社会基盤としての3次元地図の整備・更新技術の開発

3次元空間モデリングシステムの構築

－廉価に3次元空間をモデル化する技術の開発

国土地理院 基本図情報部

平成30年3月

# 3ヶ年の実施概要

低コストな空間のモデリング技術を開発し、3次元地図の効率的な整備手法を検討

平成27年度

## 屋内形状取得技術の検討・調査

- ・SfM/MVSとSLAMをベースとする [技術について調査](#)
- ・採用する技術を選定するために [評価用モデリングツールを試作](#)

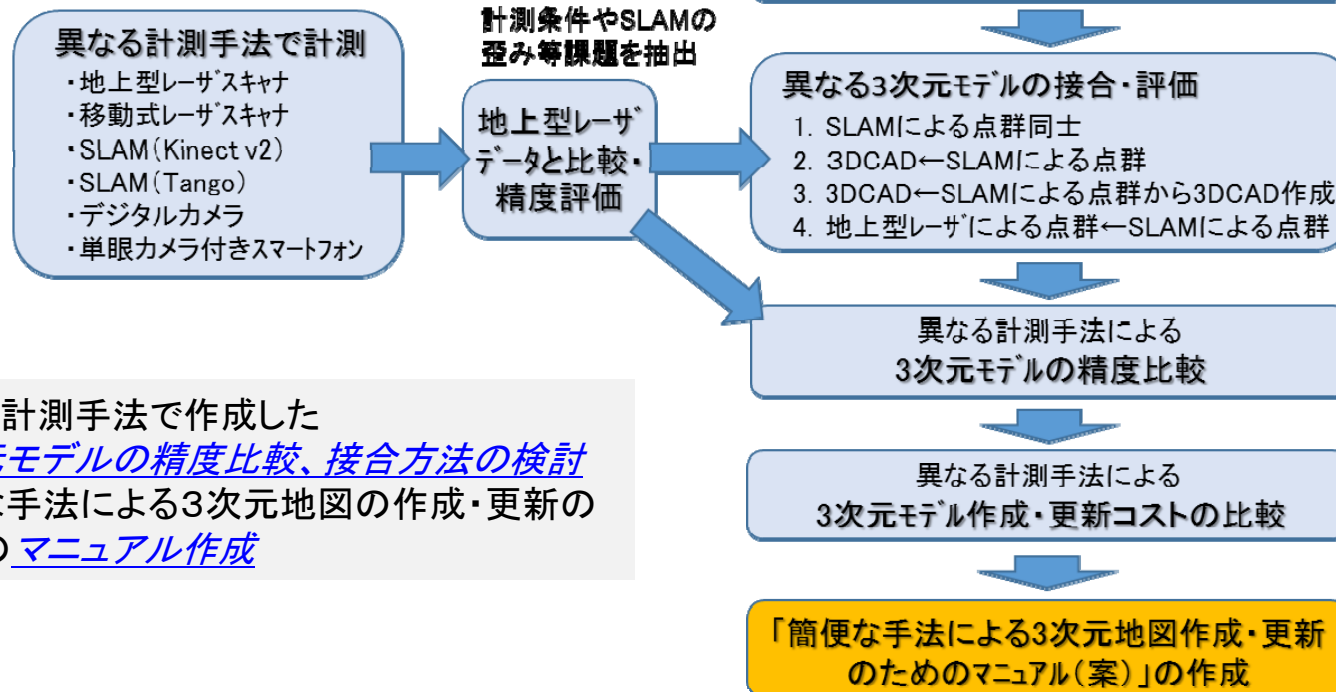
平成28年度

## 3次元モデリングシステムの開発

- ・評価用モデリングツール等で屋内空間を計測・比較 ⇒ [SLAMによる「Kinect Fusion」を採用](#)
- ・採用した技術を実装した [3次元モデリングシステムを開発](#)

## 簡便な手法による3次元地図の作成・更新方法の検討

平成29年度



- ・異なる計測手法で作成した [3次元モデルの精度比較、接合方法の検討](#)
- ・簡便な手法による3次元地図の作成・更新のための [マニュアル作成](#)

# 異なる手法を用いた3次元モデル作成

公共空間にある部屋の構造や地物の追加を想定し、屋内で類似の地物を使って計測

## 部屋の構造が変わった事例



## 新たに地物が追加された事例



本検討で計測した類似の空間と地物

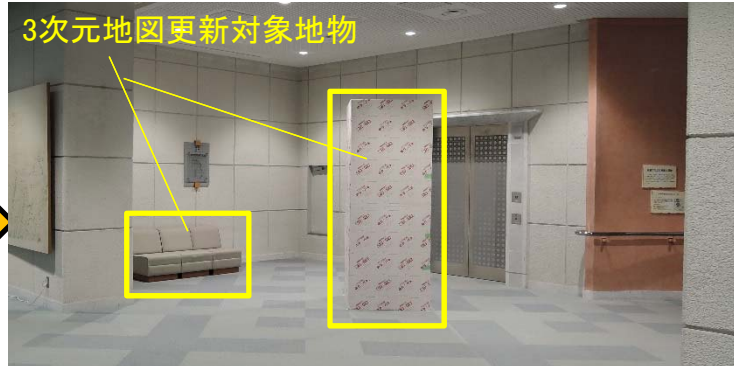


## ・部屋の構造が変わった場合



文部科学省研究交流センター会議室

## ・新たに地物が追加された場合



国土地理院 地図と測量の科学館



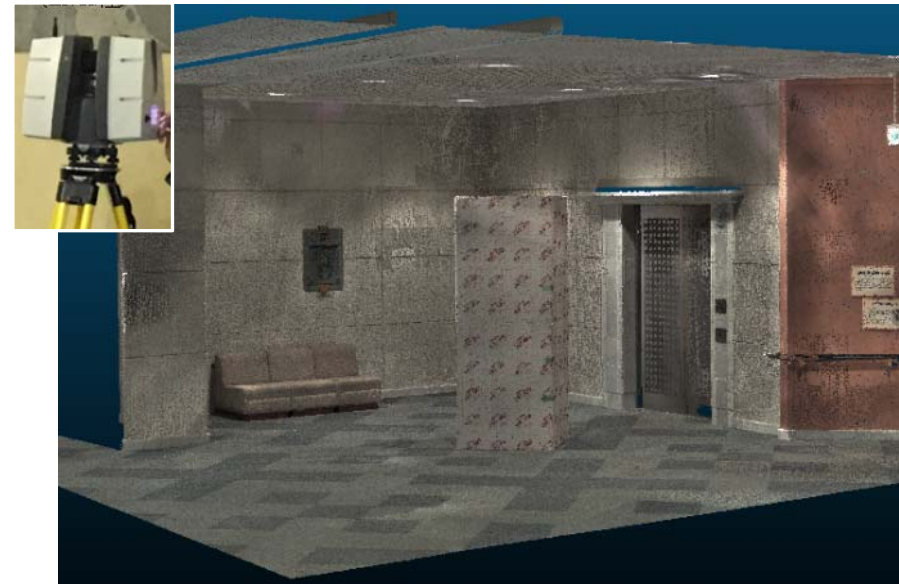
国土地理院 排水処理場

# 異なる手法を用いた3次元モデル作成

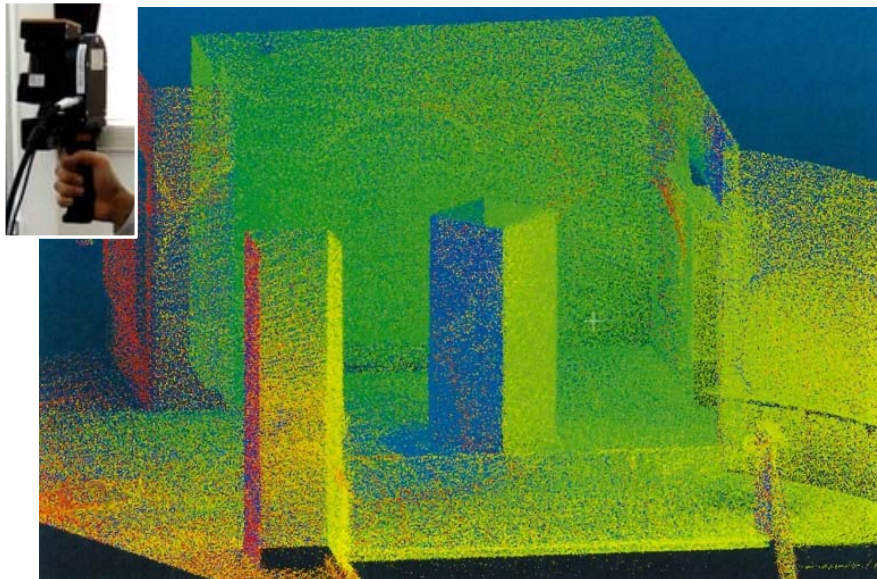
計測結果の例(地図と測量の科学館 2階)



現地状況



地上型レーザスキャナ (Leica Scan Station P40)



移動型レーザスキャナ (Geoslam Zeb-Revo) によるSLAM



距離センサ (Microsoft Kinect v2) によるSLAM (Kinect Fusion) 4

# 異なる手法を用いた3次元モデル作成

計測結果の例(地図と測量の科学館 2階)



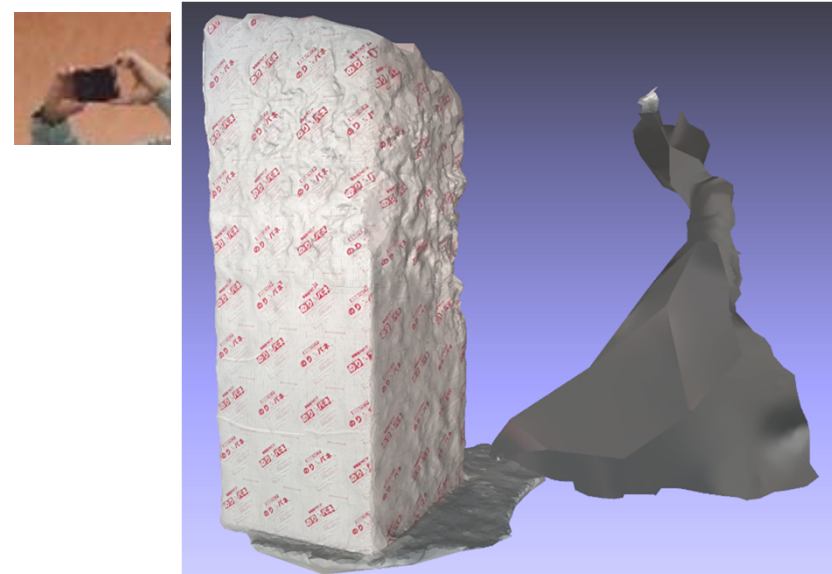
現地状況



距離センサ付きスマートフォン(ASUS Zenfone AR)によるSLAM(Google Tango)



デジタルカメラによるSfM/MVS(Photoscan使用)

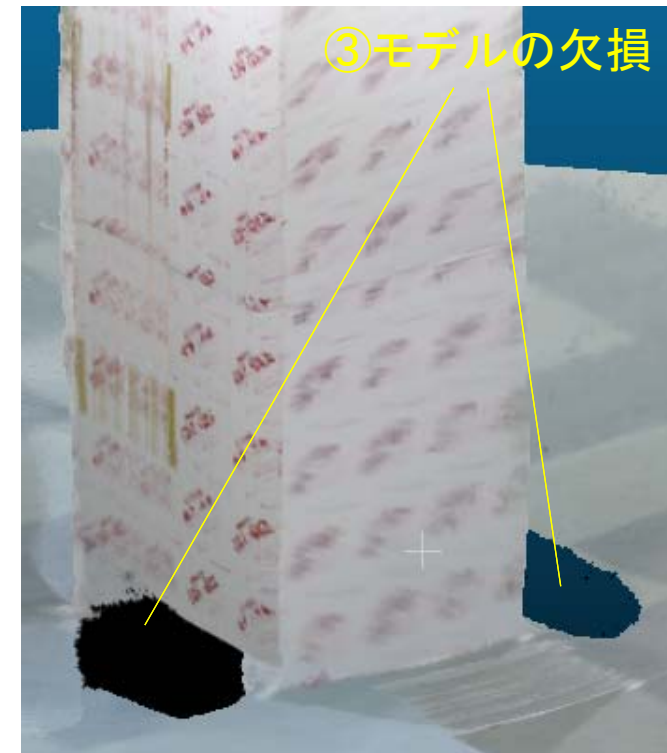
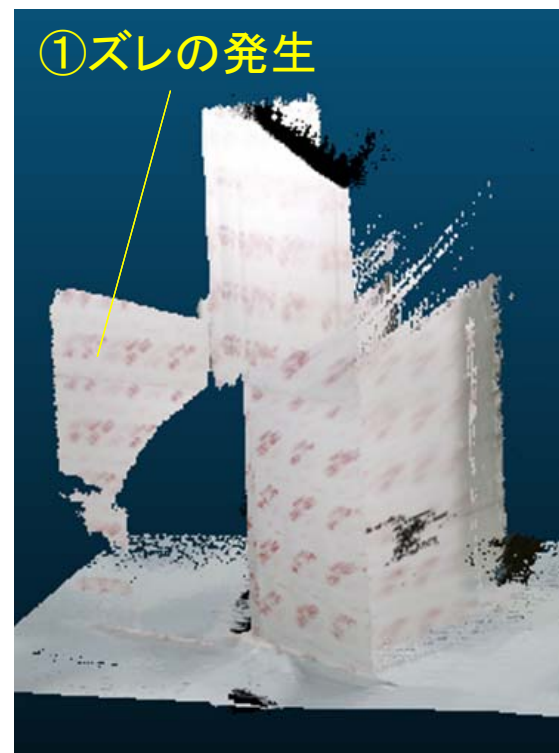
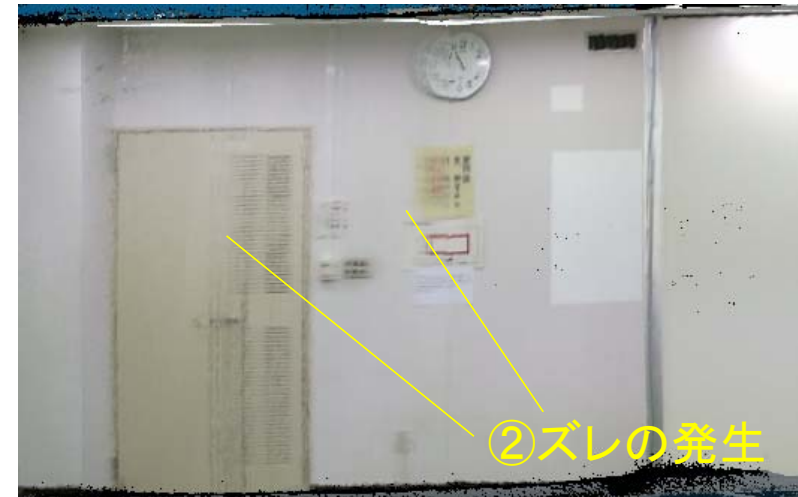


カメラ付きスマートフォン(Sony Xperia XZ1)によるSfM/MVS

# 距離センサによるSLAM計測時の課題と対策

## SLAM (Kinect v2, Tango) で計測した際の主な課題

- ① 計測時の急な動きや振動によるズレ等の発生。
- ② 特徴的な形状が無いと正しく繋がらない。
- ③ 壁付近の床部分が計測できないケースがある。
- ④ 計測ノイズが出る場合がある。

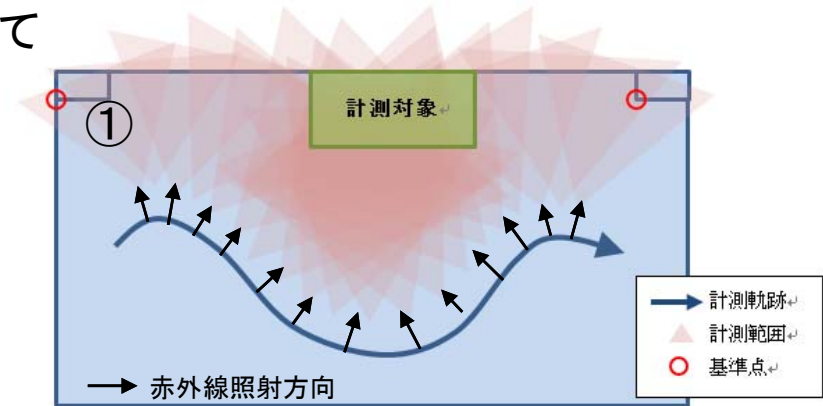


# 距離センサによるSLAM計測方法の検討

SLAMによる計測データのズレ等を軽減する方法として次の3つの計測方法で検証。

## SLAM計測方法①:

計測対象と周囲(基準点を含む)を移動しながら一度に計測 (SLAM使用)



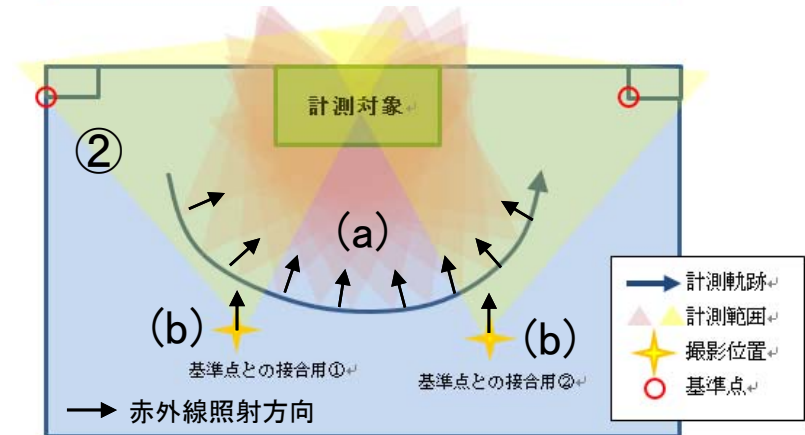
## SLAM計測方法②:

(a)計測対象のみ移動しながら計測 (SLAM使用)

+

(b)周囲(基準点を含む)を複数地点から計測

⇒上記(a)(b)で計測したデータを後処理で接合

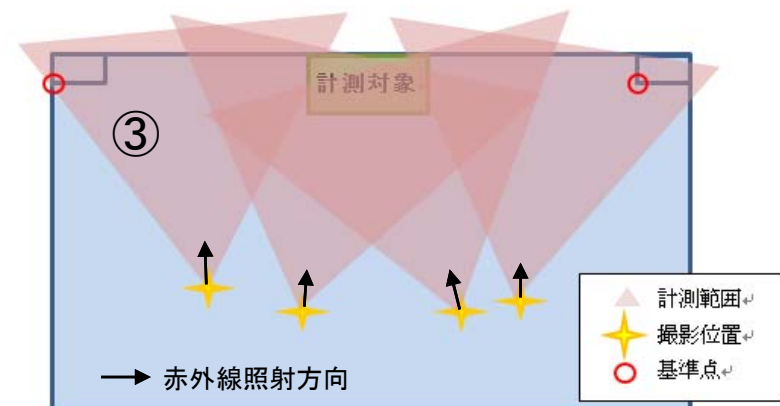


## SLAM計測方法③:

計測対象と周囲(基準点を含む)を複数地点から計測

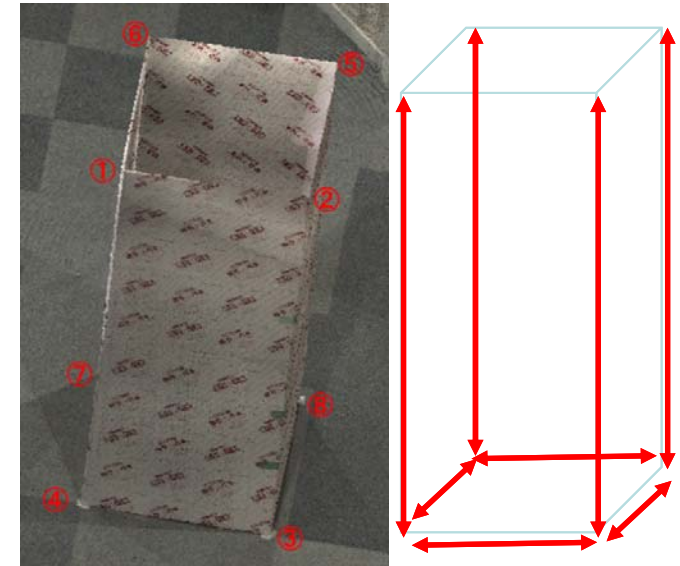
⇒複数地点から計測したデータを後処理で接合

※本方法はSLAMは使用していないが、便宜的にSLAM計測方法③と呼ぶ



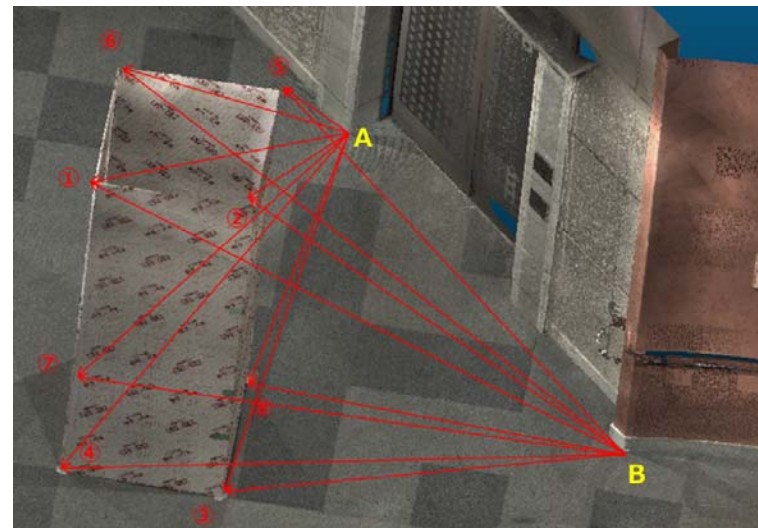
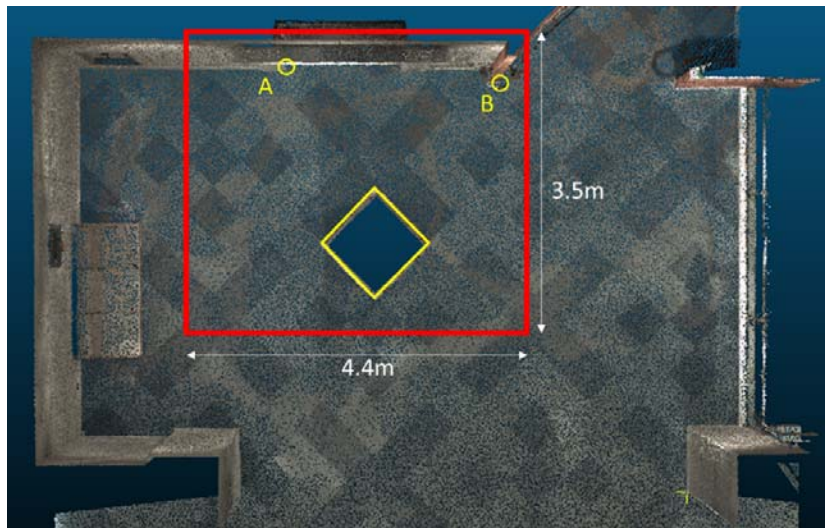
# 異なる手法による3次元モデルの精度確認

**【精度確認①】** 対象地物の形状の再現精度を確認  
 ⇒3次元モデル上で対象地物の寸法を測り、正解値と比較



地図と測量の科学館の例： 対象地物の底面及び側面の8辺を計測

**【精度確認②】** 対象地物が空間内の正しい位置に配置できているかの確認  
 ⇒3次元モデル上で既存の明瞭な点から対象地物の端点までの距離を測り、正解値と比較



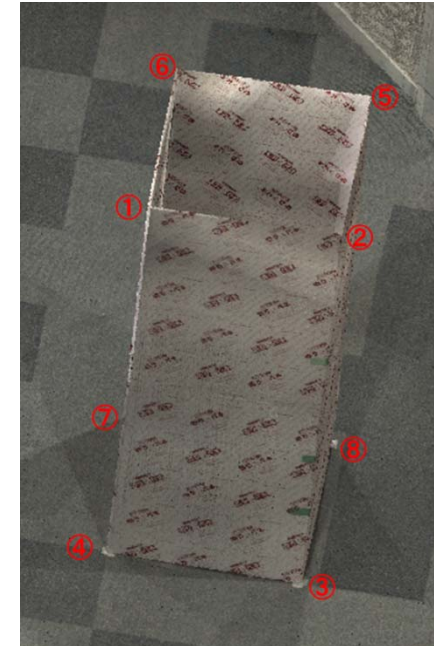
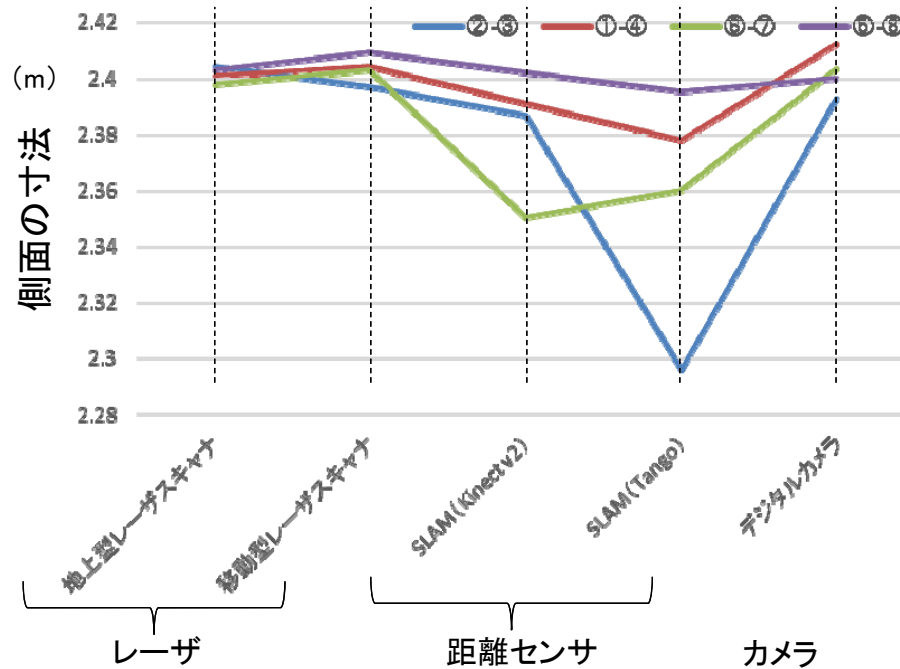
地図と測量の科学館の例： 2点(A,B)から対象地物の8つの端点までの距離を計測



# 異なる手法による3次元モデルの精度比較

(地図と測定の科学館の例)

【精度確認①】 3次元モデルの底面、側面の8辺の寸法を比較



計測技術	地上型レーザースカナデータとの誤差 (m)								最大誤差
	側面				底面				
	高さ②-③ (2.40*)	高さ①-④ (2.40*)	高さ⑥-⑦ (2.40*)	高さ⑤-⑧ (2.40*)	底辺⑦-⑧ (0.93*)	底辺⑧-③ (0.92*)	底辺③-④ (0.93*)	底辺④-⑦ (0.91*)	
移動型レーザースカナ	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.01
SLAM(Kinect v2) 計測方法①	0.02	0.01	0.05	0.00	0.06	0.02	0.02	-0.01	0.06
SLAM(Tango) 計測方法①	0.11	0.02	0.04	0.01	0.01	0.06	-0.03	0.03	0.11
デジタルカメラ	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01

\*(正解値: 地上型レーザーデータ)

最小誤差

最大誤差

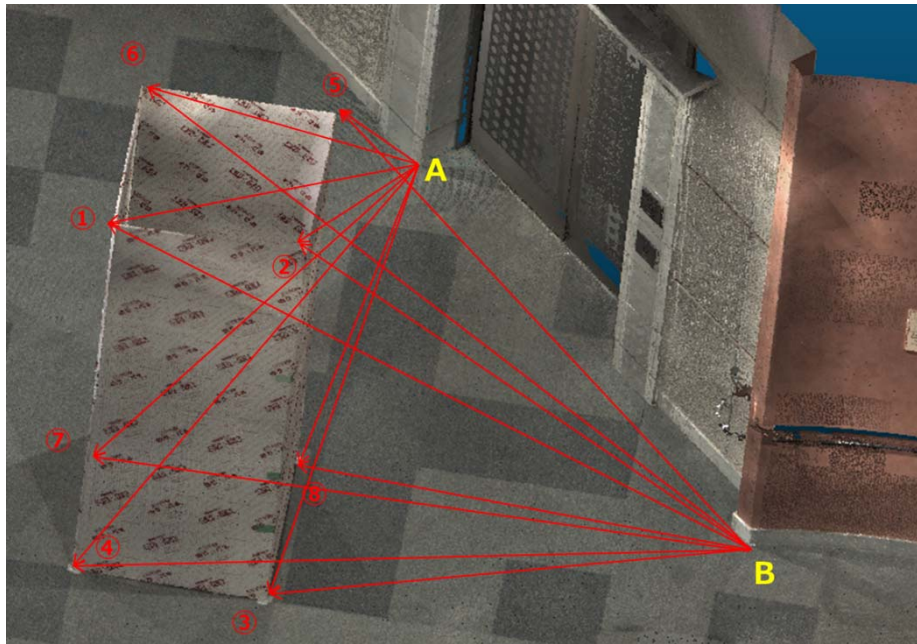
地上型レーザーデータを正解値として、他の手法による計測値の誤差を比較した結果

- 移動型レーザースカナ、デジタルカメラは**最大1cmの誤差**
- SLAM(Kinect v2, Tango)は**最大6-11cmの誤差**

# 異なる手法による3次元モデルの精度比較

(地図と測量の科学館の例)

【精度確認②】 2点(A、B)から3次元モデルの8つの端点までの距離を比較



地上型レーザーデータを正解として、  
他の手法との誤差を比較した結果

- 移動型レーザスキャナ、デジタルカメラは **最大誤差6-7cm**
- SLAMは**最大誤差9-19cm**

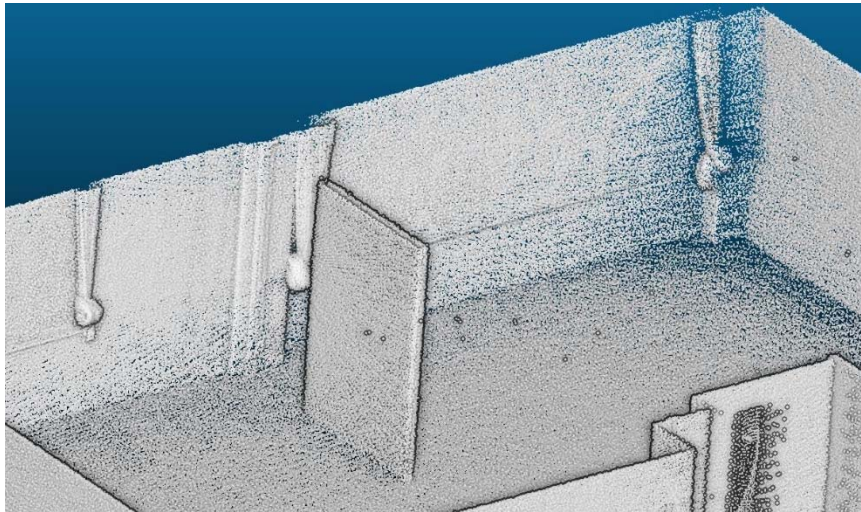
最小誤差  
最大誤差

\*(正解値:地上型レーザーデータ)

計測技術	地上型レーザースキャナデータとの誤差(m)																平均誤差	最大誤差	標準偏差
	基準点Aからのモデル端点までの距離								基準点Bからのモデル端点までの距離										
	A-① (3.93*)	A-② (3.75*)	A-③ (2.94*)	A-④ (3.17*)	A-⑤ (3.10*)	A-⑥ (3.33*)	A-⑦ (2.38*)	A-⑧ (2.02*)	B-① (4.01*)	B-② (3.38*)	B-③ (2.33*)	B-④ (3.24*)	B-⑤ (3.27*)	B-⑥ (3.97*)	B-⑦ (3.20*)	B-⑧ (2.20*)			
移動型レーザスキャナ	0.06	-0.01	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.02	-0.04	0.05	0.04	0.00	0.01	0.04	0.02	0.05	0.02	0.03	0.06	0.03
SLAM(Kinect v2) 計測方法①	0.06	0.03	0.01	-0.07	-0.04	0.03	0.01	-0.04	0.03	0.09	-0.03	0.04	0.00	0.06	0.08	0.00	0.04	0.09	0.04
SLAM(Tango) 計測方法①	0.05	0.04	0.00	-0.03	0.02	0.06	0.03	0.19	-0.04	0.01	-0.05	0.00	0.05	0.06	-0.03	0.06	0.05	0.19	0.06
デジタルカメラ	0.00	0.01	-0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01	0.00	0.03	-0.02	-0.02	0.04	0.04	0.07	0.03	0.02	0.07	0.03

# 異なる手法を用いた3次元モデルの比較

【留意点】 デジカメを用いたSfM/MVS解析では、特徴点が少ない地物の場合、データが取得できない場合がある(例:色調が均一の扉)→ レーザ、距離センサでは、色調の影響を受けにくい



移動型レーザスキャナ(Zeb-Revo)によるSLAM



距離センサ(Kinect v2)によるSLAM(Kinect Fusion)



デジタルカメラによるSfM/MVS



距離センサ付きスマートフォンによるSLAM(Google Tango)

# 異なる3次元モデルを接合する手法の検討

本検討では次の4パターンの接合を検証。2.~4.は地物の更新を想定して実施。

- |                                       |                 |
|---------------------------------------|-----------------|
| 1. SLAMによる点群同士の接合                     | ⇒使用ソフト(a)       |
| 2. 3次元CADに対し、SLAMによる点群を接合             | ⇒使用ソフト(b)(c)    |
| 3. 3次元CADに対し、SLAMによる点群から作成した3次元CADを接合 | ⇒使用ソフト(b)(c)    |
| 4. 地上型レーザスキャナによる点群に対し、SLAMによる点群を接合    | ⇒使用ソフト(b)(c)(d) |

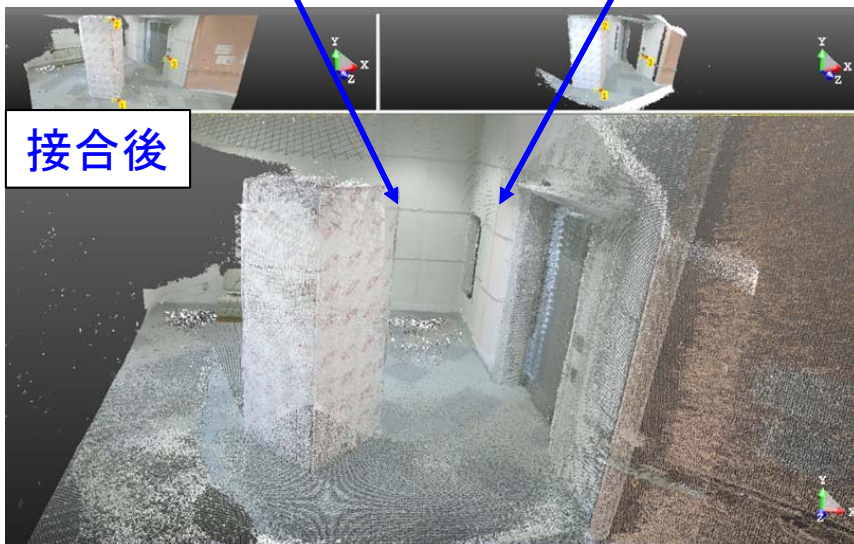
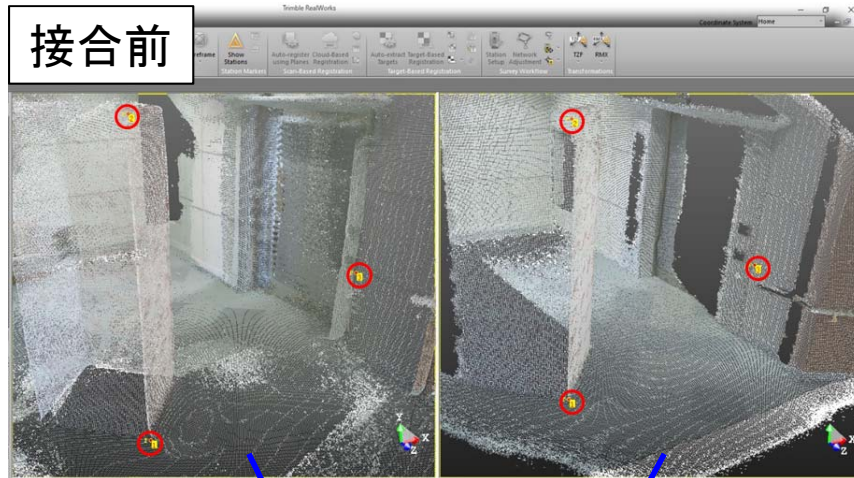


## 本検討で接合に使用したソフトウェア

	ソフト名称	接合対象	接合機能 (3点指定移動)
(a)	<点群系ソフト> Real Works	<ul style="list-style-type: none"> <li>SLAMによる点群</li> </ul>	最小2乗法タイプ
(b)	<3DCG系ソフト> Rhinoceros	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元CADデータ</li> <li>地上型レーザスキャナによる点群</li> </ul>	移動+回転タイプ
(c)	<CAD系ソフト> AutoCAD+ ReCAP(点群用ソフト)	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元CADデータ</li> <li>地上型レーザスキャナによる点群</li> </ul>	移動+回転タイプ (ReCAP Proの点群同士の接合方法は不明)
(d)	<点群系ソフト> InfiPoints	<ul style="list-style-type: none"> <li>地上型レーザスキャナによる点群 (点群系ソフトであるため、現最新バージョンでは3DCADデータとの接合が困難)</li> </ul>	最小2乗法タイプ

# 異なる3次元モデルを接合する手法の検討

## 1. SLAMによる点群同士の接合 (⇒点群に共通する明瞭な3点を使用)



SLAM計測方法②、③における点群の接合も同様の方法で実施。計測方法①～③の点群の精度を比較。

### 【方法】

計測方法①、②、③による各点群上で、基準点から計測対象地物の端点までの距離を計測し、地上型レーザによる点群上での距離(正解値)と比較

### 【結果】

計測方法①と、点群を接合する②、③との違いは見られなかった。

(地図と測量の科学館の例)

基準点2点 × 計測対象物の端点8点の16本の誤差の平均値と標準偏差

計測技術	基準点間誤差 平均値(m)	標準偏差 (m)
SLAM(Kinect v2) 計測方法①	0.081	0.043
SLAM(Tango) 計測方法①	0.032	0.055
SLAM(Kinect v2) 計測方法②	0.045	0.062
SLAM(Tango) 計測方法②	0.041	0.058
SLAM(Kinect v2) 計測方法③	0.038	0.049
SLAM(Tango) 計測方法③	0.067	0.058

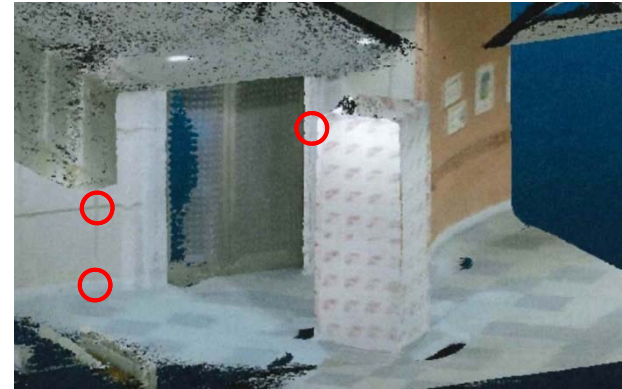
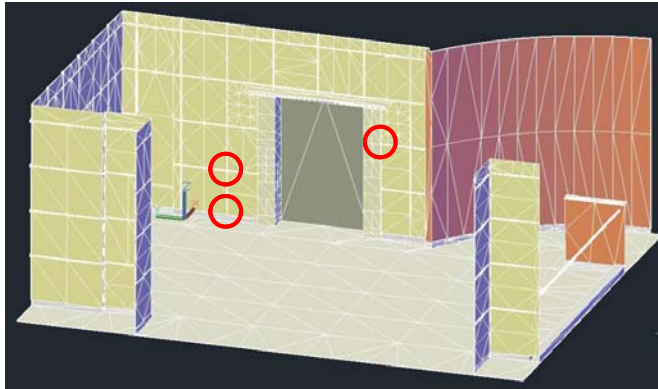
誤差平均値  
3-8cm程度

誤差平均値  
4-7cm程度

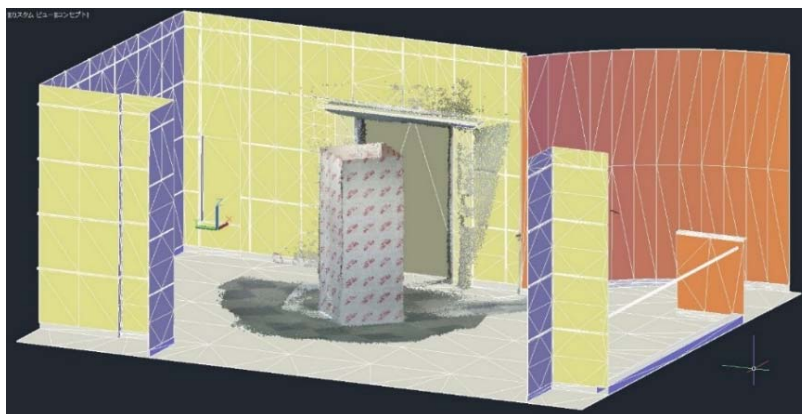
# 異なる3次元モデルを接合する手法の検討

## 2. 3次元CADデータに対し、SLAMによる点群(更新対象地物周辺)を接合

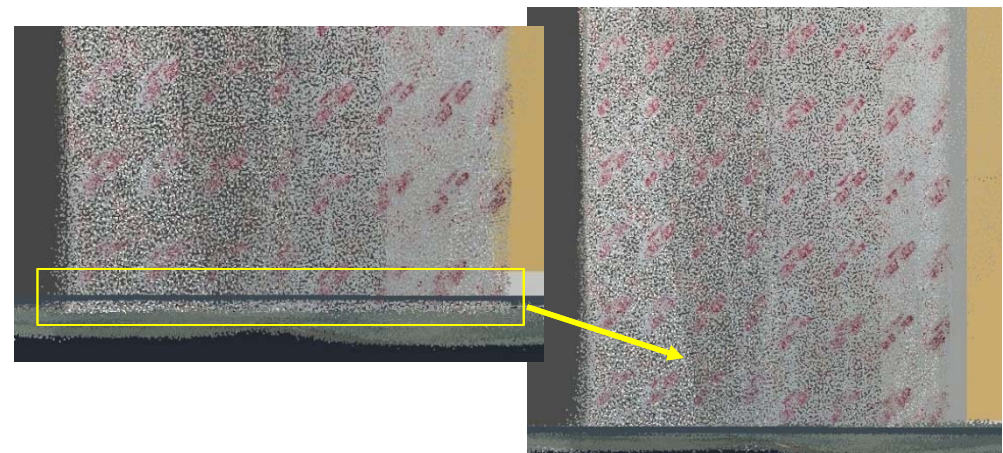
①更新対象地物周辺で明瞭に識別できた箇所を基準点として選定



②基準点を使って、SLAMによる点群を部屋の3次元CADデータに位置合わせ



③SLAMによる点群上の更新対象地物を床に合わせる。明らかな接合不備の場合は床面や壁面を基準に調整。



# 異なる3次元モデルを接合する手法の検討

## 3. 3次元CADデータに対し、SLAMによる点群(更新対象地物周辺)から作成した3次元CADデータを接合



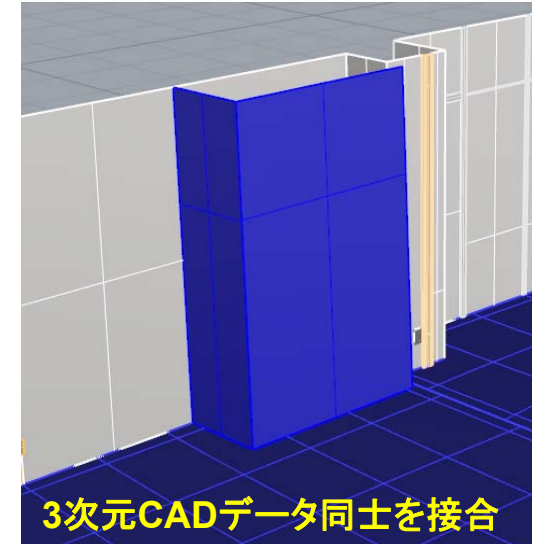
計測 (Tangoの例)



基準点選定



位置合わせ前モデル作成



位置合わせ(基準点3点) + モデル接合調整  
(傾き調整、天井や壁面に接続)

(研究交流センターでの例)

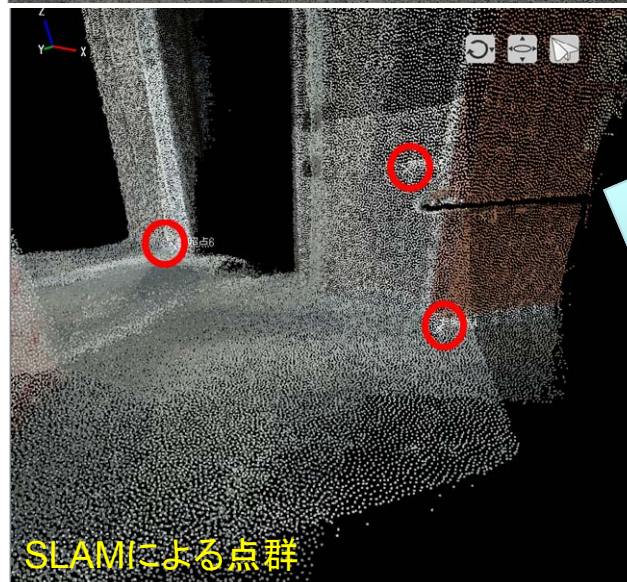
接合方法	基準点選定	位置合わせ前モデル作成	位置合わせ	モデル作成	モデル接合調整	作業時間
3次元CAD同士	2分	11分	19分	—	4分	36分
点群同士	2分	—	21分	7分	—	30分

- 接合したデータの精度を評価(地上型レーザデータの座標値を正解値)。  
3次元CADデータ同士より 点群同士の接合の方が15cm程度精度が良かった。
- 3次元CADデータ同士より 点群同士の接合の方が、作業時間も6分短く簡便。

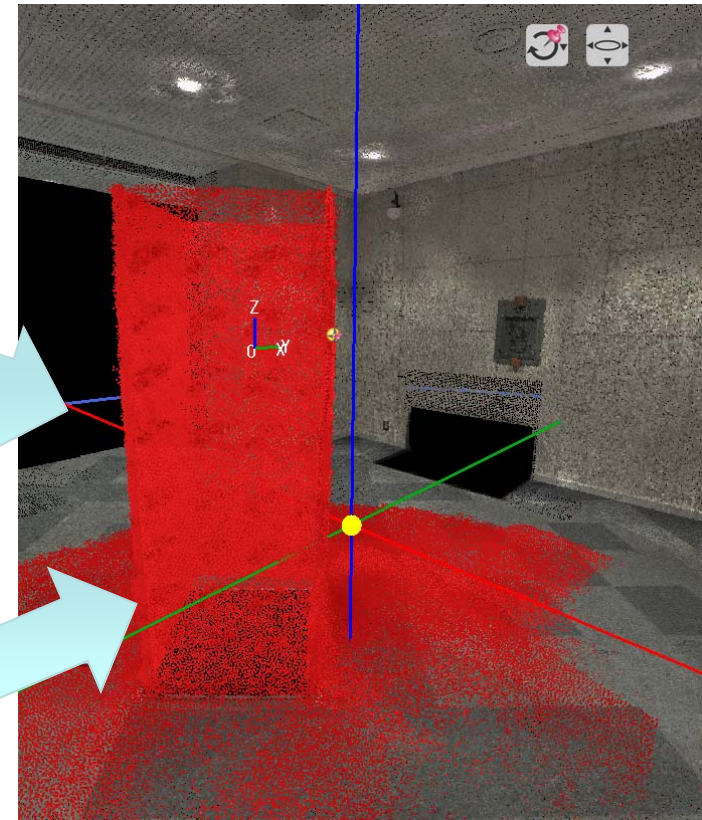
# 異なる3次元モデルを接合する手法の検討

## 4. 地上型レーザスキャナによる点群に対し、SLAMによる点群(更新対象地物周辺)を接合

①位置合わせのための基準点を選定



②基準点をもとに更新対象地物を配置





# 3次元モデルの接合手法の評価

接合した3次元モデルにおける更新対象地物の端点の座標値と、地上型レーザスキャナによる点群上の同一箇所の座標値(正解値)を比較し、誤差を評価。

## 2. 3次元CADに対し、SLAMによる点群を接合する場合

(\* )端点(各6~8箇所)での誤差平均値(m)

		計測技術	平均誤差(m) (* )	
			AutoCAD	Rhinocero
研究交流センター	変更想定箇所① (壁面変更)	SLAM(Kinect v2)計測方法③	0.025	0.032
		SLAM(Tango)計測方法①	0.034	0.027
	変更想定箇所② (仕切り追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法②	0.029	0.059
		SLAM(Tango)計測方法②	0.030	0.042
地図と測量の科学館	変更想定箇所① (ノリパネボックス)	SLAM(Kinect v2)計測方法①	0.032	0.032
		SLAM(Tango)計測方法②	0.038	0.027
	変更想定箇所② (長椅子追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法②	0.009	0.030
		SLAM(Tango)計測方法②	0.016	0.021
排水処理施設	変更想定箇所① (仕切り追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法③	0.062	0.051
		SLAM(Tango)計測方法③	0.052	0.044
	変更想定箇所② (柱追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法②	0.046	0.040
		SLAM(Tango)計測方法①	0.030	0.030
		平均	0.033	0.036

地上型レーザデータを正解として、座標値の誤差を比較した結果

- AutoCAD  
平均誤差0.9-6.2cm
- Rhinoceros  
平均誤差2.1-5.9cm

ソフトウェアによる差はほぼなし

## 4. 地上型レーザスキャナによる点群に対し、SLAMによる点群を接合する場合

更新箇所		計測技術	平均誤差(m) (* )		
			InfiPoints (最小二乗法)	ReCAP+AutoCAD	Rhinoceros(移動+回転)
研究交流センター	変更想定箇所① (壁面変更)	SLAM(Kinect v2)計測方法③	0.038	/	/
		SLAM(Tango)計測方法①	0.031		
	変更想定箇所② (仕切り追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法②	0.071		
		SLAM(Tango)計測方法②	0.032		
地図と測量の科学館	変更想定箇所① (ノリパネボックス追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法①	0.022	0.073	0.044
		SLAM(Tango)計測方法②	0.099	0.033	0.038
	変更想定箇所② (長椅子追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法②	0.045	0.032	0.016
		SLAM(Tango)計測方法②	0.017	0.031	0.020
排水処理施設	変更想定箇所① (仕切り追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法③	0.038	/	/
		SLAM(Tango)計測方法③	0.029		
	変更想定箇所② (柱追加)	SLAM(Kinect v2)計測方法③	0.035		
		SLAM(Tango)計測方法①	0.028		
		平均	0.040	0.042	0.030

- InfiPoints  
平均誤差1.7-9.9cm
- AutoCAD  
平均誤差3.1-7.3cm
- Rhinoceros  
平均誤差1.6-4.4cm

誤差の大きいものはSLAMによる点群上で明瞭でない箇所が含まれていたもの。

# 3次元モデル作成時間等の比較

計3つの場所で3次元モデル作成に要した単位面積当たりの平均時間を評価

(各場所で10m<sup>2</sup>程度の地物2箇所を更新対象として検討)

単位:(分)/m<sup>2</sup>

	準備	計測	現地後処理	データ処理	トータル 作業時間
距離センサ(Kinect v2) によるSLAM 計測方法①	・機材セットアップ 0.32	・計測 0.94	・データファイル出力 0.10	・点群データ変換 0.06	<b>1.42</b>
距離センサ(Kinect v2) によるSLAM 計測方法②	・機材セットアップ 0.47	・計測 2.15	・データファイル出力 0.12	・点群データ変換 ・点群合成処理 1.80	<b>4.54</b>
距離センサ(Kinect v2) によるSLAM 計測方法③	・機材セットアップ 0.44	・計測 2.27	・データファイル出力 0.09	・点群データ変換 ・点群合成処理 2.97	<b>5.77</b>
距離センサ(Tango) によるSLAM 計測方法①	・スマートフォン起動 0.09	・計測 0.31	—	・点群データ変換 0.09	<b>0.48</b>
距離センサ(Tango) によるSLAM 計測方法②	・スマートフォン起動 0.06	・計測 0.40	—	・点群データ変換 ・点群合成処理 0.77	<b>1.24</b>
距離センサ(Tango) によるSLAM 計測方法③	・スマートフォン起動 0.10	・計測 0.48	—	・点群データ変換 ・点群合成処理 1.79	2.36
地上型レーザースキャナ	・計測機設置 ・マーカ―設置 0.25	・計測 1.78	・マーカ―撤去 0.10	・点群合成(点群処理ソフト) ・ノイズ処理 ・位置合わせ(基準座標付与) 2.00	<b>4.13</b>
移動型レーザースキャナ によるSLAM	・イニシャライズ 0.02	・計測 0.07	・メディアへのデータ保管 0.02	・PCでのSLAM処理(専用ソフト) 0.07	<b>0.18</b>
デジタルカメラ によるSfM/MVS	・カメラセットアップ 0.02	・撮影 0.15	—	・SfM/MVS処理 2.05	2.21

※地上型レーザースキャナは広い面積になれば、単位面積当たりの時間が下がる。

※SLAM(Kinect v2、Tango)の計測方法②、③は計測データの合成作業があるため、計測方法①の3~5倍の時間が掛かる。

# 異なる手法による3次元データ作成のコスト等の評価

	レーザ		距離センサ		カメラ	
	地上型 レーザスキャナ	移動型 レーザスキャナ	距離センサ (赤外線)	距離センサ(赤外線) 付きスマートフォン	デジタルカメラ	カメラ付き スマートフォン
本検討で使用した機器	Scan Station (Leica社)	Zeb-Revo (Geoslam社)	Kinect v2 (Microsoft社)	Tango(Google社)	EOS 5D mark3 (Canon社)	Xperia XZ1(Sony社)
データ取得方法		SLAM	SLAM	SLAM	SfM/MVS	SfM/MVS
一般的な価格帯	1,000-2,000万円 +α(PC、ソフト)	500-1,000万円 +α(PC、ソフト)	2万円 +α(PC、バッテリー、ソフト)	10万円	2-25万円 +α(PC、ソフト)	10万円
計測範囲(m)	0.4~100以上	~30	0.5~8.1	~4	カメラ性能に依存	不明
基準点間誤差(m) <small>地上型レーザデータとの比較</small>	—	0.03	0.05	0.05	0.03	不明
本検討で使用した 機材重量	本体: 12.65kg	本体: 1.0kg 外付け: 3.1kg (バッテリー)	本体: 935g 外付け: 約7kg (ノートPC、バッテリー)	本体: 170g	本体: 約200g	本体: 156g
可搬性	× (三脚等)	○	▲ (台車等)	◎	◎	◎
トータル作業時間	4.13分/m <sup>2</sup>	0.18分/m <sup>2</sup>	1.42分/m <sup>2</sup> (計測方法①)	0.48分/m <sup>2</sup> (計測方法①)	2.21分/m <sup>2</sup>	—
確実性	◎	○	▲ (SLAMIに依存)	▲ (SLAMIに依存)	▲ (その場でデータ確認不可) (計測方法に制約)	▲ (計測方法に制約)
総合評価 局所域 (~10m <sup>2</sup> 程度)	× (可搬性低い、長時間)	◎ (機器コスト高)	○ (可搬性低い)	○ (SLAMIに依存)	▲ (対象物のマッチング精度に依存)	▲ (計測方法に制約)

## 【局所域 (~10m<sup>2</sup>程度) の計測範囲及び、5cm程度の計測誤差】

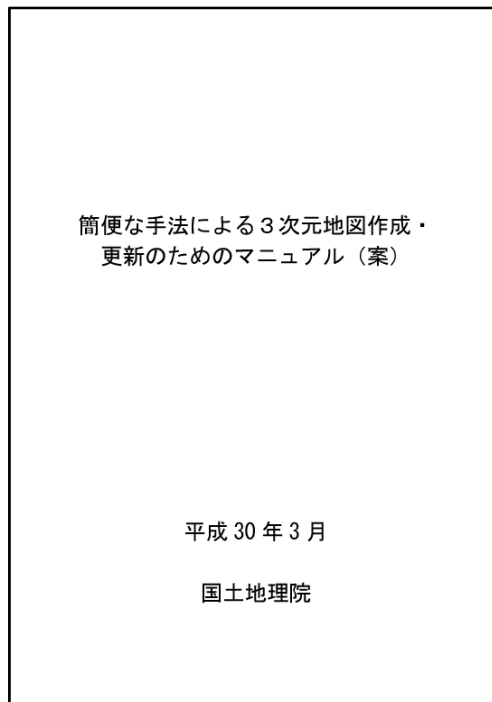
- 短時間で作業でき、可搬性が高く、最も効率的に計測できるのは移動型レーザスキャナで、続いて距離センサ(Kinect v2、Tango)計測方法①であった。
- 移動型レーザスキャナは高価なため、機材購入から始める場合は距離センサ(Kinect v2、Tango)の活用が効果的である。
- デジタルカメラは、移動型レーザスキャナと計測精度は同程度であったが、作業時間を要し、また計測データを計測後すぐに確認できないため確実性は低い。

➤更新対象が10m<sup>2</sup>程度の地物で要求精度が5～10cm程度の場合、距離センサ(Kinect v2、Tango)によるSLAMを用いた簡便な計測手法を用いることで、比較的廉価に3次元地図を更新できる可能性があることが分かった。

➤検討した計測方法や接合方法、点検方法などをまとめて、「簡便な手法を用いた際の3次元地図作成・更新マニュアル(案)」を作成した。

※本分野は技術の進展が著しく、Kinect v2は生産終了(平成29年10月)、Tangoはサポート終了(平成30年3月)となっているが、今後も計測機器の小型化、低廉化や処理技術の高度化が進むことが期待される。本マニュアル(案)は、入力される点群データが変わっても、後工程の接合、点検などの部分は活用可能と考えられる。

## 【 目次(案) 】



1. はじめに
2. 簡便な手法による3次元地図作成・更新のための計測
  - 2.1. 計測手法
  - 2.2. 計測手順
  - 2.3. 精度を確保するための計測条件や方法
3. 3次元地図作成
  - 3.1. 作成手順
  - 3.2. フィルタリング
  - 3.3. 位置補正
  - 3.4. 3DCAD化
  - 3.5. 点検
4. SLAMを用いた3次元地図の更新
  - 4.1. ソフトウェア
  - 4.2. 更新手順
  - 4.3. 既存モデルに合わせて接合、調整
  - 4.4. 3DCAD化
  - 4.5. 点検
5. 3次元地図仕様への変換
  - 5.1. 3次元地図仕様
  - 5.2. 変換方法

## 屋内計測データ + 屋外計測データ ⇒ 屋内・屋外シームレスな3次元地図の整備・更新

屋内計測データと屋外計測データを接合  
(共通箇所では位置合わせ)  
→共通箇所の絶対位置計測を行う場合、大都市等では必要に応じマルチパス軽減技術を活用

屋内3次元地図の整備  
→屋内3次元標準地図仕様に沿って整備  
→地図上にパブリックタグの位置等も表示

「地図と測定の科学館」の屋内・屋外シームレス点群データ (移動型レーザスキャナによる計測例)

部分的に屋内の3次元地図を更新  
→簡便な手法による3次元モデル作成・更新のためのマニュアル(案)を使用