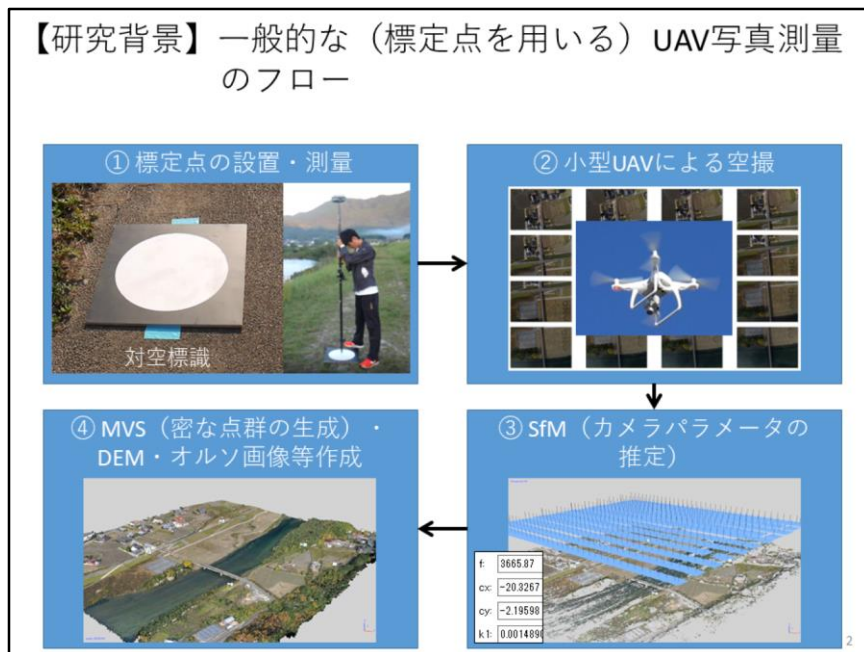




ご紹介いただきありがとうございます。
それではご覧のタイトルで発表いたします。
この発表は、山口大学と株式会社GEOソリューションズとの共同研究の成果の一部です。



UAV写真測量は一般に、ご覧の手順で行なわれてます。
通常は現地で標定点の設置・測量作業が必要です。

【研究背景】 撮影位置のRTK測位が可能な
廉価UAVの登場

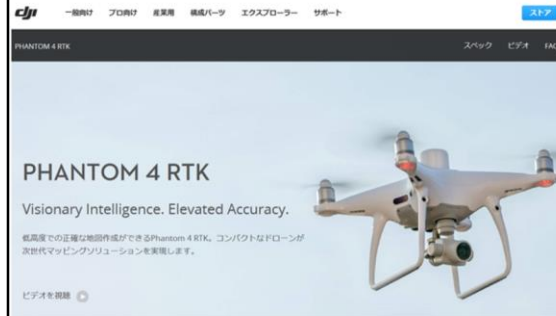
DJI社製 Phantom 4 RTK
(<https://www.dji.com/>)

- 各画像に、撮影位置の緯度・経度・楕円体高を埋め込む。
- 対象領域のテクスチャ等と撮影・解析の工夫次第では、**標定点をゼロとし、設置・測量・回収の手間を省ける可能性。**

3

一方最近、撮影位置のRTK測位が可能な「廉価なUAV」が、登場してきています。このようなRTK測位が可能なUAVは、各画像に撮影位置の緯度・経度・楕円体高を埋め込むことができます。このようなUAVを用いることで、対象領域のテクスチャ等と撮影・解析の工夫次第では、標定点をゼロとし、設置・測量・回収の手間を省ける可能性があります。

【研究背景】 撮影位置のRTK測位が可能な
廉価UAVの登場



DJI社製 Phantom 4 RTK
(<https://www.dji.com/>)

標定点を用いないUAV写真測量について、
たくさんの実証実験が行われつつあるが、
適用範囲を明らかにするためには、
特に**難しい条件下での実証データの蓄積**が必要である

現在、「あとは読む」

【研究目的】

撮影位置のRTK測位が可能なUAVによる
写真測量について

撮影高度に対して**長く、誤差が蓄積しやすい**
と予想される領域を対象として
SfMの精度検証を行った。

5

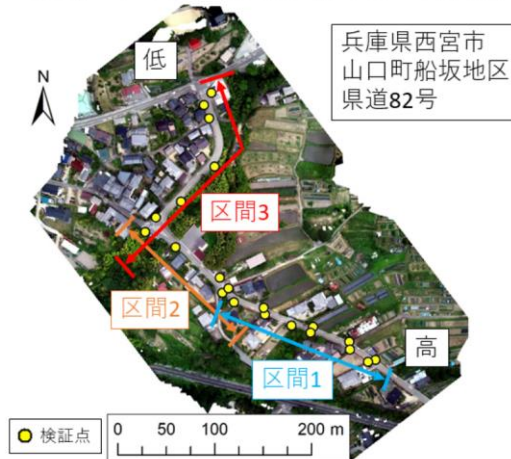
そこで本研究では、撮影位置のRTK測位が可能なUAVによる写真測量について、撮影高度に対して長く、誤差が蓄積しやすいと予想される領域を対象としてSfMの精度検証を行いました。

【実験・解析方法】対象領域と検証点

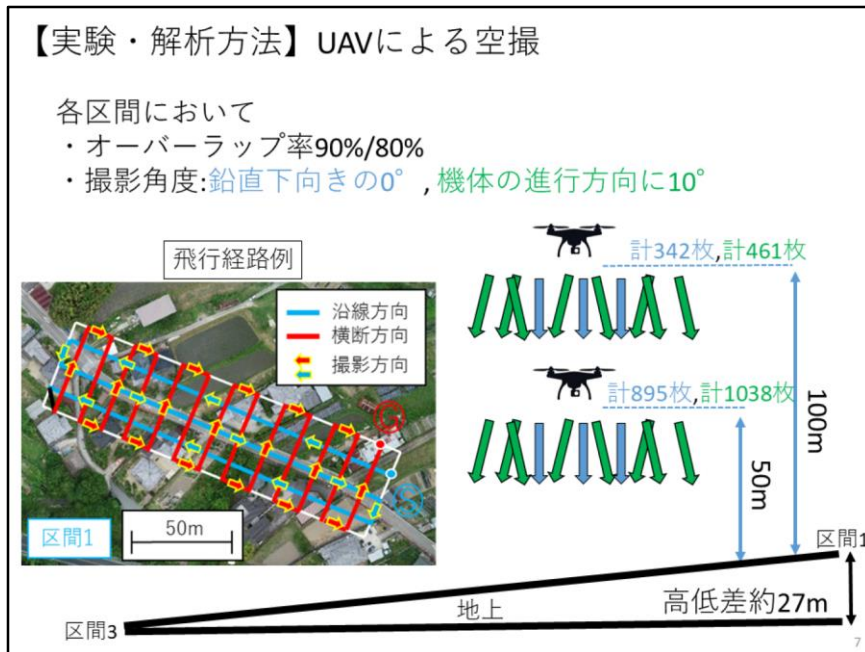
対象領域：延長約400m×幅約5mの道路沿い

検証点：21点

区間1の東端と区間3の北端は約27mの高低差あり



続いて、実験・解析方法についてです。対象領域と検証点の位置を示しております。実験は兵庫県西宮市山口町船坂地区を通ります、県道82号で実施しました。対象領域は延長約400m×幅5mの道路沿いとし、検証点は21点配置いたしました。1フライトで全体は撮れないので、南側から区間1,2,3といたしまして、区間ごとに空撮を行いました。また、区間1の東端と区間3の北端は約27mの高低差がある場所になっています。



続いて、UAVによる空撮についてです。

撮影高度は示している通りで、離陸地点から100mと50mです。オーバーラップ率は進行方向に90%,左右方向に80%に設定しました。飛行経路は左下に示している通りで、沿線方向の経路と横断方向の経路に2つに分けて呼んでいます。沿線方向の経路というのは〜〜このように飛ぶ道路沿いの経路です。横断方向の経路というのは、ここから〜〜このように折り返してジグザグ進み、道路を横断する方向に飛ぶ経路です。斜め撮影については、各経路の進行方向に向けて、鉛直下向きから 10° で撮影を行いました。つまり、この緑の矢印のように、多方向を向いた斜め撮影を行ったことになります。また、解析では、青線の沿線方向と赤線の横断方向に分けたパターンでも解析を行いました。

【実験・解析方法】 内部パラメータの扱いの予備検討

P4RTK搭載カメラの構造の安定性は不明のため、
絞り値を固定できなかったため、

内部パラメータ ($f, cx, cy, k1 - k4, p1 - p4$)の扱いとして

- A. 画像ごとに1組推定
- B. フライトごとに1組推定
- C. 全画像で1組推定

の3通りについて、全画像を使ったSfMの精度を評価

→ 最も高精度を与えた「A. 画像ごとに1組推定」を採用

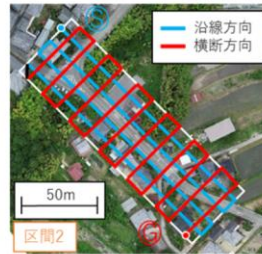
8

次に解析方法になりますが、内部パラメータの扱いの予備検討を行いました。なぜかという、ファントム4RTK搭載カメラの構造の安定性は不明であることと、絞り値を固定できず、変わってしまった画像があるため、内部パラメータを推定する上で、ごらんのABCの3通りについて、それぞれ全画像を使ったSfMの精度を評価しました。そこで最も高精度を与えた、Aの画像ごとに1組推定する手法で解析を行いました。以降の解析では全て、Aの手法で解析を行いました。

【実験・解析方法】 現段階で精度を比較した画像セット
(3区間の画像を混ぜた)

ケース番号	画像セット	画像枚数
①	50m下	895
②	100m下	342
③	50m斜	1038
④	100m斜	461
⑤	50m下+100m下	1237
⑥	50m下+100m斜	1356
⑦	50m下沿線+100m斜	861
⑧	50m斜+100m下	1380
⑨	50m斜沿線+100m下	780
⑩	100m下+100m斜	803
⑪	50m下+50m斜	1933
⑫	50m下+50m斜横断	1495
⑫'	50m下+50m斜横断*1	1363
⑬	50m下+50m斜沿線	1333
⑭	50m下沿線+50m斜	1438
⑮	50m下沿線+50m斜横断	1000
⑯	50m下沿線+50m斜沿線	838
⑰	50m下沿線+50m斜沿線1	516
⑱	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534

「下」→鉛直下向き撮影画像
 「斜」→天底角10°の斜め撮影画像
 「沿線」→沿線方向経路上で撮影された画像
 「横断」→横断方向経路上で撮影された画像
 「沿線1」→「沿線」画像から中央付近1コース分のみを抽出した画像



*1 沿線方向を向いた斜め撮影画像は削除
 *2 区間2では対地高度一定で撮影

続いて、現段階で精度を比較した画像セットの一覧を示します。なお、これら画像セットは3区間の画像を混ぜた上で、それぞれ解析を行っております。表の画像セット列の略称は右側に示している通りです。下は~~~~斜は~~~です。

【結果】 画像セットごとの検証点誤差の統計量

ケース 番号	画像セット	画像 枚数	検証点誤差の統計量					
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上			検出画像数 10以上	
				RMS [m]	検証点数	RMS [m]		
						鉛直成分		3軸合成
①	50m下	895	0.360	33	0.349	0.358	0.358	
②	100m下	342	0.627	9	0.621	0.625	0.622	
③	50m斜	1038	0.042	40	0.036	0.040	0.041	
④	100m斜	461	0.109	15	0.071	0.107	0.103	
⑤	50m下+100m下	1237	0.140	33	0.129	0.139	0.136	
⑥	50m下+100m斜	1356	0.088	34	0.077	0.088	0.080	
⑦	50m下沿線+100m斜	861	0.103	28	0.075	0.101	0.105	
⑧	50m斜+100m下	1380	0.036	40	0.029	0.034	0.034	
⑨	50m斜沿線+100m下	780	0.050	29	0.048	0.051	0.052	
⑩	100m下+100m斜	803	0.089	15	0.063	0.087	0.093	
⑪	50m下+50m斜	1933	0.065	44	0.056	0.062	0.064	
⑫	50m下+50m斜横断	1495	0.059	41	0.054	0.058	0.057	
⑫'	50m下+50m斜横断*1	1363	0.071	41	0.064	0.070	0.070	
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	0.215	38	0.197	0.218	0.215	
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	0.061	41	0.055	0.060	0.063	
⑮	50m下沿線+50m斜横断	1000	0.188	38	0.169	0.193	0.190	
⑯	50m下沿線+50m斜沿線	838	0.533	33	0.485	0.540	0.518	
⑰	50m下沿線+50m斜沿線1	516	0.239	26	0.118	0.231	0.282	
⑱	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534	0.201	20	0.128	0.205	0.226	

それでは結果に移ります。こちらは画像セットごとの検証点誤差の統計量の表です。概要の4ページに示したものとほぼ同じです。

【結果】 画像セットごとの検証点誤差の統計量

ケース 番号	画像セット	画像 枚数	検証点誤差の統計量					
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上		検出画像数 10以上		
			RMS [m] 3軸合成	検証点数	RMS [m] 鉛直成分	RMS [m] 3軸合成		

検出画像数

SfM解析に基づいて三角測量の用いられた画像数
三角測量由来の誤差の混入を防ぐため

↑

検証点数

カメラパラメータの推定誤差によって
同一の対空標識が画像間で異なるものと検出されることがある
同じ絶対座標を持つ検証点として利用

表の説明に移ります。表中に、緑枠の検証点数というものがありますが、カメラパラメータの推定誤差によって、対空標識を自動検出した際に、同一の対空標識が画像間で異なるものと検出されることがあります。この場合、同じ絶対座標を持つ検証点として利用しました。そこで、赤枠の検出画像数ごとに検証点誤差を集計したのですが、これはSfM解析に基づいて三角測量に用いられた画像数です。これは三角測量由来の誤差の混入を防ぐためです。よって本講演では、検出画像数が3以上、4以上、10以上の場合の3通りの検証点誤差でもって、sfmの精度を検討しました。

【結果】 A) 鉛直下向きのみ①② VS 斜め撮影のみ③④

ケース番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差の統計量					
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上			検出画像数 10以上	
				RMS [m]	検証点数	RMS [m]		
						鉛直成分		3軸合成
①	50m下	895	0.360	33	0.349	0.358	0.358	
②	100m下	342	0.627	9	0.621	0.625	0.622	
③	50m斜	1038	0.042	40	0.036	0.040	0.041	
④	100m斜	461	0.109	15	0.071	0.107	0.103	
⑤	50m下+100m下	1237	0.140	33	0.129	0.139	0.136	
⑥	50m下+100m斜	1356	0.088	34	0.077	0.088	0.080	
⑦	50m下沿線+100m斜	861	0.103	28	0.075	0.101	0.105	
⑧	50m斜+100m下	1380	0.036	40	0.029	0.034	0.034	

鉛直下向きの撮影よりも
天底角10° の多方向斜め撮影の方が
 誤差の鉛直成分が小さい

↓

考察：各区分1フライトしかできない状況では、
斜め撮影を選ぶ方が精度上有利

⑪	50m下沿線+50m斜沿線1	516	0.239	26	0.118	0.231	0.282
⑫	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534	0.201	20	0.128	0.205	0.226

以降は、概要3ページ目の結果のA～Eにそって発表いたします。結果Aについてです。鉛直下向きのみ画像を用いたケース①②と斜め撮影のみ画像を用いたケース③④を比較します。検出画像数4以上の3軸合成のRMS誤差を見ますと、ケース①②は、35cm台、62cm台で、1つ左の列を見ますと、この誤差は、ほとんどが鉛直成分の誤差であることがわかります。一方、ケース③④は4cmと10cm程度に抑えられています。

よって鉛直下向きの撮影よりも天底角10°の多方向斜め撮影の方が誤差の鉛直成分が小さいということで、各区分1フライトしかできない状況では、平行撮影ではなく、斜め撮影を選ぶ方が精度上有利であると考えられます。

【結果】 B) 「沿線」 画像のみのケース⑬⑭⑮

ケース番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差の統計量				
			検証点数	検出画像数4以上			
				RMS [m]			
東西成分	南北成分	鉛直成分	3軸合成				
⑬	50m下	895	33	0.033	0.074	0.349	0.358
⑭	100m下	342	0	0.024	0.050	0.621	0.625
他の多くのケースと異なり 鉛直方向のみならず水平方向にも大きな誤差							
原因（高精度ケースとの詳細な比較に基づく推察）： 内部パラメータのみならず、カメラの向きの推定に大きな誤差が生じている							
⑯	100m下+100m斜	803	15	0.030	0.047	0.063	0.087
⑰	50m下+50m斜	1933	44	0.012	0.023	0.056	0.062
⑱	50m下+50m斜横断	1495	41	0.015	0.014	0.054	0.058
⑲	50m下+50m斜横断*1	1363	41	0.022	0.017	0.064	0.070
⑳	50m下+50m斜沿線	1333	38	0.065	0.066	0.197	0.218
㉑	50m下沿線+50m斜	1438	41	0.012	0.023	0.055	0.060
㉒	50m下沿線+50m斜横断	1000	38	0.065	0.065	0.169	0.193
㉓	50m下沿線+50m斜沿線	838	33	0.181	0.154	0.485	0.540
㉔	50m下沿線+50m斜沿線1	516	26	0.148	0.132	0.118	0.231
㉕	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534	20	0.132	0.091	0.128	0.205

13

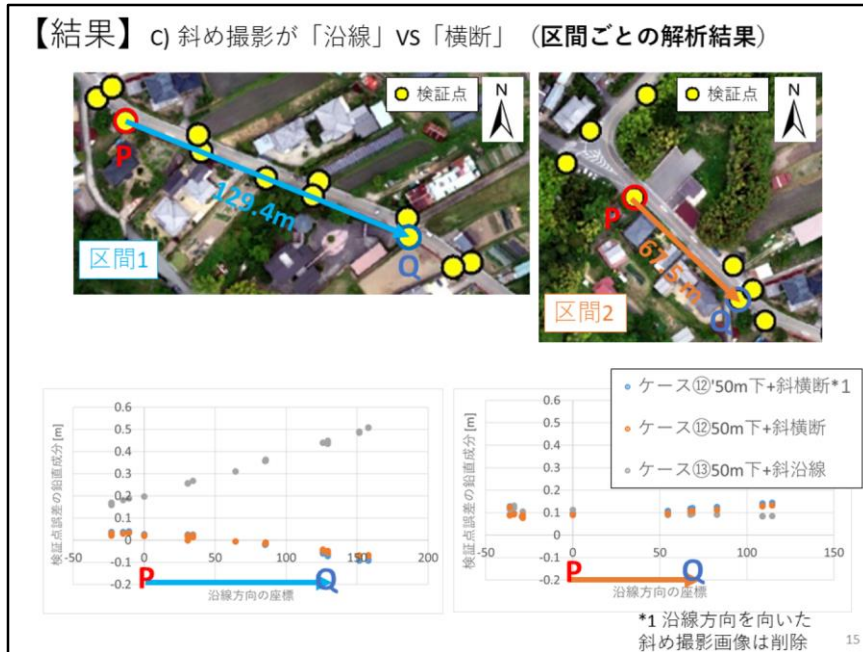
この3ケースでは他の多くのケースと異なり、鉛直方向のみならず水平方向にも大きな誤差が生じています。その原因について高精度ケースとの詳細な比較に基づく推察にはなりますが、この3ケースでは内部パラメータのみならず、カメラの向きの推定に大きな誤差が生じているということが示唆されています。（チートfは3668.58）

【結果】 C) 斜め撮影が「沿線」⑬⑯ VS 「横断」⑫⑫'⑮

ケース番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差の統計量				
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上		検出画像数 10以上	
				RMS [m] 3軸合成	検証点数		RMS [m] 鉛直成分 3軸合成
①	50m下	895	0.360	33	0.349	0.358	0.358
②	100m下	342	0.627	9	0.621	0.625	0.622
③	50m斜	1038	0.042	40	0.036	0.040	0.041
④	100m斜	461	0.109	15	0.071	0.107	0.103
⑤	50m下+100m下	1237	0.140	33	0.129	0.139	0.136
考察：「沿線」よりも「横断」の斜め撮影の方が 精度向上に貢献している							
⑨	50m斜沿線+100m下	780	0.050	29	0.048	0.051	0.052
⑩	100m下+100m斜	803	0.089	15	0.063	0.087	0.093
⑪	50m下+50m斜	1933	0.065	44	0.056	0.062	0.064
⑫	50m下+50m斜横断	1495	0.059	41	0.054	0.058	0.057
⑫'	50m下+50m斜横断*1	1363	0.071	41	0.064	0.070	0.070
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	0.215	38	0.197	0.218	0.215
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	0.061	41	0.055	0.060	0.063
⑮	50m下沿線+50m斜横断	1000	0.188	38	0.169	0.193	0.190
⑯	50m下沿線+50m斜沿線	838	0.533	33	0.485	0.540	0.518
⑰	50m下沿線+50m斜沿線1	516	0.239	26	0.118	0.231	0.282
⑱	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534	0.201	20	0.128	0.205	0.226

*1 沿線方向を向いた斜め撮影画像は削除

結果Cとしまして、斜め撮影を沿線方向に行っているケース⑬⑯と横断方向に撮影しているケース⑫⑫'⑮を比較しています。赤枠は横断方向の画像を使ったケースで、青枠は沿線方向の画像を使ったケースです。例えば、ケース12とケース13を比較すると、検証点誤差はケース13は20cm台ですが、ケース12は6cm程度に抑えられています。よって、沿線方向の画像よりも横断方向の斜め画像の方が精度向上に貢献していることが示唆されています。この仮説をさらに詳しく検証するために→（次のスライド）



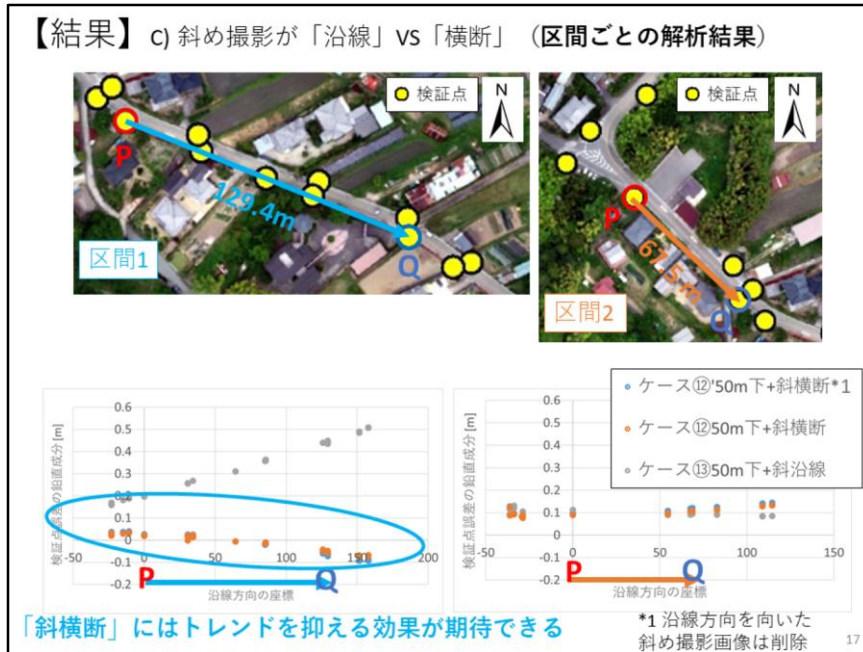
結果Cで比較したケース⑫、⑫'、⑬について区間ごとに解析を行いました。すると、区間1には「斜沿線」画像を使ったケース⑬では大きなトレンドが見受けられました。しかし「斜横断」画像を使ったケース⑫と⑫'では、鉛直成分の誤差が小さく、沿線画像で発生していたトレンドを抑える効果に期待できると考えられます。

（緊急の場合）実際、区間別に解析しても、区間1では、「斜横断」の画像にはトレンドを抑える効果が観察されました。



結果Cで比較したケース⑫、⑫'、⑬について区間ごとに解析を行いました。すると、区間1には「斜沿線」画像を使ったケース⑬では大きなトレンドが見受けられました。しかし「斜横断」画像を使ったケース⑫と⑫'では、鉛直成分の誤差が小さく、沿線画像で発生していたトレンドを抑える効果に期待できると考えられます。

（緊急の場合）実際、区間別に解析しても、区間1では、「斜横断」の画像にはトレンドを抑える効果が観察されました。



結果Cで比較したケース⑫、⑫'、⑬について区間ごとに解析を行いました。すると、区間1には「斜沿線」画像を使ったケース⑬では大きなトレンドが見受けられました。しかし「斜横断」画像を使ったケース⑫と⑫'では、鉛直成分の誤差が小さく、沿線画像で発生していたトレンドを抑える効果に期待できると考えられます。

（緊急の場合）実際、区間別に解析しても、区間1では、「斜横断」の画像にはトレンドを抑える効果が観察されました。

【結果】 D) 単一高度⑪⑬(※) VS 複数高度⑧⑨

ケース番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差の統計量				
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上		検出画像数 10以上	
				RMS [m] 3軸合成	検証点数	RMS [m] 鉛直成分	3軸合成
<p>ケース⑨の平均鉛直誤差+0.044m < ケース⑬の平均鉛直誤差+0.161m ケース⑨の平均f3666.5 > ケース⑬の平均f3661.8</p> <p>↓ 考察：撮影の複数高度化により、内部パラメータf（鉛直スケール）の推定精度が向上した可能性</p>							
⑧	50m斜+100m下	1380	0.036	40	0.029	0.034	0.034
⑨	50m斜沿線+100m下	780	0.050	29	0.048	0.051	0.052
⑩	100m下+100m斜	803	0.089	15	0.063	0.087	0.093
⑪	50m下+50m斜	1933	0.065	44	0.056	0.062	0.064
⑫	50m下+50m斜横断	1495	0.059	41	0.054	0.058	0.057
⑫'	50m下+50m斜横断*1	1363	0.071	41	0.064	0.070	0.070
⑬	50m下+50m斜沿線	1333	0.215	38	0.197	0.218	0.215
⑭	50m下沿線+50m斜	1438	0.061	41	0.055	0.060	0.063
⑮	50m下沿線+50m斜横断	1000	0.188	38	0.169	0.193	0.190
⑯	50m下沿線+50m斜沿線	838	0.533	33	0.485	0.540	0.518
⑰	※撮影高度は、実際には離陸地点からの高度であり、						2
⑱	離陸地点が複数あるため約10m程度のフライト間の高度差がある						6

結果Dについてです。単一高度のみで解析を行ったケース⑪⑬と複数高度のケース⑧⑨の比較です。ケース⑬とケース⑨に着目しますと、ケース⑬の平均鉛直誤差は+16cmと浮いて推定されていましたが、ケース⑨は+4cmということで浮きが抑えられていました。その原因として、鉛直方向のスケールを表すfに着目しますと、ケース⑬で推定されたfは⑨のそれよりも、小さく推定されてきました。従って、ケース⑬はfの過小評価によって、地表面が浮いて推定されてしまった可能性があります。（チートfは3668.58）よって、撮影の複数高度化により、内部パラメータfの推定精度が向上したものと考えられます。

【結果】 E) 高高度で斜め撮影⑥⑦ VS 低高度で斜め撮影⑧⑨

ケース番号	画像セット	画像枚数	検証点誤差の統計量					
			検出画像数 3以上	検出画像数4以上		検出画像数 10以上		
				RMS [m]	検証点数		RMS [m]	
							鉛直成分	3軸合成
①	50m下	895	0.360	33	0.349	0.358	0.358	
②	100m下	342	0.627	9	0.621	0.625	0.622	
③	50m斜	1038	0.042	40	0.036	0.040	0.041	
④	100m斜	461	0.109	15	0.071	0.107	0.103	
⑤	50m下+100m下	1237	0.140	33	0.129	0.139	0.136	
⑥	50m下+100m斜	1356	0.088	34	0.077	0.088	0.080	
⑦	50m下沿線+100m斜	861	0.103	28	0.075	0.101	0.105	
⑧	50m斜+100m下	1380	0.036	40	0.029	0.034	0.034	
⑨	50m斜沿線+100m下	780	0.050	29	0.048	0.051	0.052	
⑩	100m下+100m斜	803	0.089	15	0.063	0.087	0.093	
⑪	50m下+50m斜	1933	0.065	44	0.056	0.062	0.064	
<p>枚数が変わらないにも関わらず 低高度側で斜め撮影をする方が高精度 斜め撮影の枚数は低高度側の方が多い</p> <p>↓</p> <p>考察：斜め優先の撮影が高精度を得やすい</p>								
⑬	50m下沿線*2+50m斜沿線1	534	0.201	20	0.128	0.205	0.226	

結果Eですが、高高度で斜め撮影を行っているケース⑥⑦と、低高度で斜め撮影を行っているケース⑧⑨を比較しています。ケース⑥とケース⑧、ケース⑦とケース⑨を見ると枚数が変わらないにもかかわらず、低高度側で斜め撮影をする方が高精度となっています。この時、斜め撮影の画像枚数は低高度側のほうが多いということで、結果Aでも述べましたが、やはり斜め優先の撮影が高精度を得やすいと考えられます。

【結論】

対象領域が撮影高度に対して
長大で誤差が増大しやすい難しい条件下でも

- **高いオーバーラップ率の確保**
- **撮影高度の複数化**
- **斜め撮影の向きの工夫**

などによって、
標定点を用いずに高精度なSfMが
可能であることが示唆された。

20

最後に、結論になります。～～