

LiDAR と SfM によるボブスレーコース形状の 3D 測定

藤川興昌¹ 大西翔馬¹ 山下晃弘¹ 松林勝志¹ 鈴木寛² 久田一郎²

概要: ボブスレー等のそり競技のコースは世界でヨーロッパを中心に 17 カ所しかない。日本では 1998 年の長野五輪で長野市ボブスレー・リージュパーク (以下、スパイラル) が建設されたが、経営難から 2017 年より競技施設としては休止となっている。そのため選手はカナダやドイツでトレーニングをせざるを得ない状況となっている他、国内において、若い選手の育成が思うように進まない状況となっている。世界各国のコースで十分練習を積むことが選手にとって理想であるが、コスト的にも時間的にも難しい。そこで選手強化に資するため、コース形状を正確に測定する他、一流選手のそりの滑走軌跡をコース上に可視化することを検討している。本研究では、スパイラルにて LiDAR と SfM を用いてコースの 3D 形状を測定したのでその結果を報告する。

キーワード: LiDAR, SfM, ドローン空撮, そり競技, 三次元点群

3D measurement of bobsled track structure by LiDAR and SfM

KOSUKE FUJIKAWA^{†1} SHOMA ONISHI^{†1}
AKIHIRO YAMASHITA^{†1} KATSUSHI MATSUBAYASHI^{†1}
HIROSHI SUZUKI^{†2} ICHIRO HISADA^{†2}

1. はじめに

日本のボブスレー等のそり競技コースは長野市ボブスレー・リージュパーク (以下スパイラル) しか存在しない。しかしそのスパイラルも 2017 年に財政難から休止されてしまっている。そのため、選手が滑走練習を行うためにはヨーロッパを中心とした海外コースに遠征する必要がある。しかし、コストや時間の面から参加できる選手は限られてしまい、日本のそり競技は選手育成という面で不利な状態となっている。

実コースを使わないトレーニングとしては、コースを CG で再現し、コース形状から物理計算により選手にかかる加速度を計算し、Stewart Platform 型モーションシミュレーターで再現しようという研究[1]の他、VR と 3 自由度モーションベースを用いて、ライブあるいはリプレイで滑走体験できるシンクロアスリート[2]を使ったトレーニングが検討されている。シンクロアスリートは選手が実際に見ている 360 度映像を VR ヘッドマウントディスプレイで再現し、実際に計測された加速度を正確に再現することができるため、海外遠征を伴わない形での事前トレーニングやコース攻略法の検討等への応用が期待されている。

しかし、これらの技術では、得られる体験が一人称視点によるものであるため、コースの全容やコースのつながりを考慮したライン取りの検討、一流選手のライン取りの意図の把握が簡単ではなく、コーチングが難しいという問題がある。

そこで本研究では、実際のコース形状のデジタル化を目

的として、スパイラルにおける滑走コースの 3D 点群測定実験を行った。徒歩で移動しながら高精度で 3D 測定できる LiDAR センサーと、広範囲を半自動で測定できるドローン空撮・SfM の 2 つを組み合わせる点群測定を行った。さらに、3 人称視点からの可視化を目指し、RTK-GNSS を用いた歩行者の移動軌跡と、周囲の点群データとを重ね合わせて可視化する実験を行った。

2. 使用した技術

2.1 NavVis VLX

NavVis VLX とは、NavVis GmbH によって開発されている装着型のモバイルレーザースキャナーである。使用者がこの機材を装着し動き回る (図 1) ことで、頭部および腹部に設置された 2 台の ToF LiDAR センサーが周囲の環境をスキャンし 3D 点群データを短時間で測定することができる。また、専用後処理ソフト NavVis SiteMaker を使用することで、動的物体の自動除去、頭部に設置された 4 台の魚眼カメラで撮影したパノラマ写真を用いた点群の色付け、測位済み基準点を使用した歪み補正等を行うことができる [3]。

2.2 SfM

SfM (Structure from Motion) は対象の物体を様々な角度で撮影した画像から、複数の共通する特徴点を探索しカメラの撮影位置や方向を推定することで、対象の 3D 形状を復元する技術である。

¹ 国立東京工業高等専門学校
National Institute of Technology, Tokyo College.
² 日本ボブスレー・リージュ・スケルトン連盟

Japan Bobsleigh・Luge・and Skelton Federation.



図1 NavVisを装着した様子

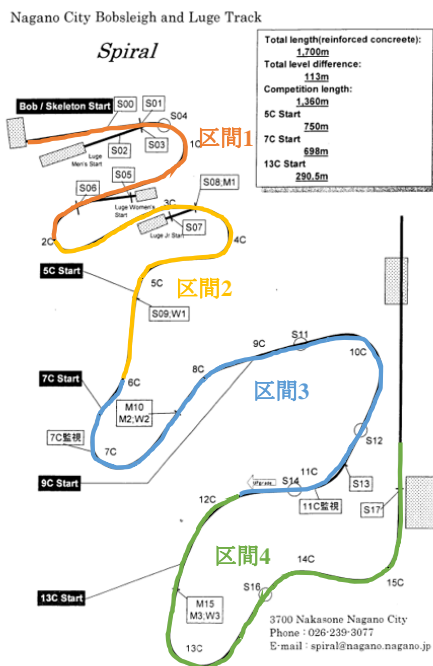


図2 スパイラルのコース図

SfM は 3D 形状の復元に特徴点を使用する影響から、特徴点の少ないコンクリート建造物の壁面や同じパターンが続くレンガやタイルを使用した建造物の復元精度が低くなる欠点がある[4]。しかしドローン空撮と組み合わせることで、比較的短時間で大規模な 3D 形状測定を行うことが可能であり、地形モデルの生成などに利用されている[5]。建造物の 3D 形状測定を行う際は、LiDAR センサーでの測定で影になる部分を広範囲に補完するのに有効である。

スパイラルの点群測定においてはコースの内側は LiDAR センサーで測定し、周囲はドローン空撮および SfM

を使用して測定することで、短時間で高品質な 3D 点群データの生成を目指す。

2.3 RTK-GNSS

RTK-GNSS(Real Time Kinematic-GNSS)は数 cm 規模での高精度位置測位が可能な衛星測位システムであり、既知の座標に設置した基準局と、そこから約 10km 以内に存在する移動局、インターネットを介した補正データ転送システムから構成される。基準局では常に衛星からの搬送波を観測しており、観測データは転送システムを介して移動局に送信される。移動局では搬送波の観測に加えて、受信した基準局の観測データから 2 つの搬送波の位相差を計算することで 2 点間の相対位置を算出し、基準点の既知座標から移動局の絶対座標を推定することができる。この手法での測位は電離層、対流圏、衛星時計、衛星軌道などによって生まれる誤差が近傍の 2 点でほぼ共通になるため無視できることを利用しており、GPS 衛星の単独測位と比較して非常に高精度である[6]。

位置推定に使用する搬送波位相バイアスは搬送波位相観測値の二重位相差をとることで初期位相項が消去されて整数になる。しかし、拡張カルマンフィルタによって推定した搬送波位相バイアスは整数の拘束条件をつけていないため実数推定値であり、このとき得られる受信機推定位置は FLOAT 解と呼ばれる。そして、この FLOAT 解に対して Z 変換や整数格子点探索などを行い求めた最適整数解を使用して得られる推定位置を FIX 解と呼ぶ[7]。

3. スパイラルでのコース形状測定実験

3.1 NavVis VLX を用いた測定

NavVis VLX をそり競技コースの形状測定に使用するうえで、適切な測定条件や 3D 点群が十分な精度で測定できるかを確認するためにスパイラルにて測定実験を行った。

NavVis VLX は計算負荷上、移動距離 500m 毎に区切って測定することが望ましいため、全長 1360m のコースをそれぞれの区間が 340m 程度になるように、図 2 の様に 4 つに区間分けした。測定者は NavVis VLX を装着し (図 1)、スタート地点からゴール地点までの片道でコース中央を一步 20cm 程度でゆっくり歩行 (約 25m/min) して測定を行った。また、点群の色データの取得を行うために約 1m ごとに立ち止まってパノラマ写真の撮影を行った。さらに各区間の始点と終点では、高精度での結合を行えるよう、それぞれ 3D 点群の位置合わせ用 CP (Control Point) を 3 つ設置し、計測 (図 3) するとともに、区間が約 5m 重複するように測定を行った。

測定した 4 区間の 3D 点群は、まず CP を使用して位置合わせを行った後、オープンソース点群編集ソフトウェアである CloudCompare の位置合わせ機能 (ICP アルゴリズム

[8]) を使用した精密な位置合わせを行い結合した。位置合わせと結合を行ったスパイラルの全点群とコース図との比



図3 CPの設置と計測

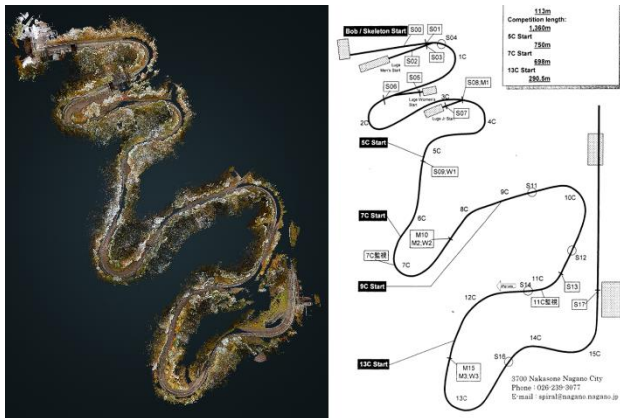


図4 点群全体とコース図との比較



図5 パノラマ写真(上)と生成した点群(下)

較を図4に示す。また、図5に測定時に撮影したパノラマ写真と生成した点群との比較画像を示す。LiDARから測定できる範囲ではコース形状に加えて電柱やスコアボード、木の葉などの細かな物体も正確に3D点群化できていることがわかる。

3.2 ドローン空撮および SfM を用いた測定

3.2.1 実験方法

NavVis VLX では LiDAR センサーで周囲の測定を行っているため、レーザーの届かないコースの壁の裏側や構造物の屋根等は測定することができない。そこで、NavVis VLX で測定した点群を補完するために、ドローン空撮・SfM を用いたコース周辺環境の 3D 点群測定実験を行い、両者の点群を合成する実験を行った。

ドローン空撮は3つの自動飛行パターン(図6)でコース全体の写真や動画の撮影を行った(図7)。(1)では少し異なる角度からの撮影になる様、往復の WP (Way Point) を、

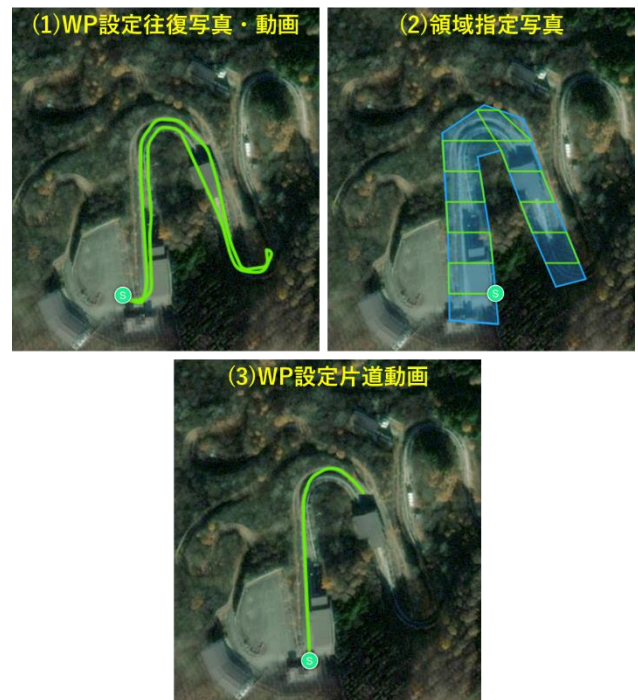


図6 ドローン空撮自動飛行パターン

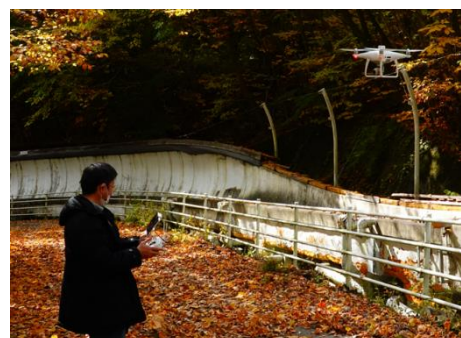


図7 SfMのための空撮の様子

幅をとって設定し、カメラは-45度（前方斜め下方向）に向けて撮影（写真・動画）を行った。（2）では領域を指定し、航路上のオーバーラップ率90%、航路間のオーバーラップ率60%で、カメラは-90度（真下）に向けて写真撮影を行った。（3）では片道でカメラを-90度に設定し動画撮影を行った。

ドローンの高度は10~50mで、飛行速度は5m/s固定とし、写真は2秒毎に一旦ホバリングさせて撮影している。動画は4K、30fpsで撮影し、1, 3, 10fpsに間引いてSfM処理を行った。

ドローンはRTK-GNSS移動局が内蔵されているDJI社のPantom4 RTKを使用し、SoftBank社の高精度測位データ配信サービスichimillが提供する基準局と通信することで測位を行った。測位した座標データは撮影画像のEXIFデータに埋め込まれる。また操縦アプリケーションはDJI社のDJI GS ProをSfMはPix4D社のPix4DMapperを使用した。

3.2.2 実験結果

(1)の往復撮影では、写真・動画のいずれも図8に示すように、ずれが発生しコースが2重になってしまった。カメラを下方45度に設定したため、往復で特徴点の一致が難



図8 (1)での点群測定結果

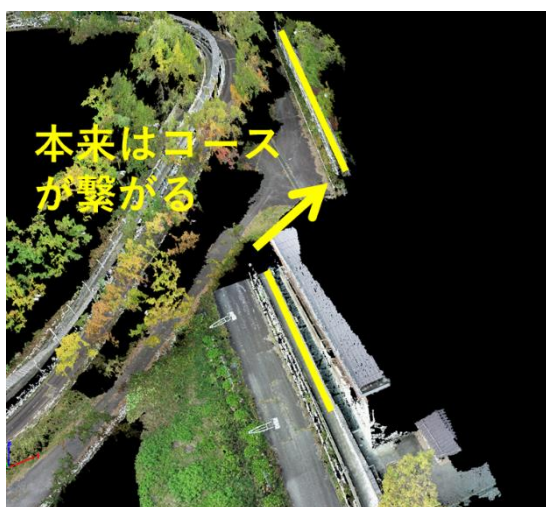


図9 (3)での点群測定結果

しく、累積誤差がそのまま表現されてしまったと考えられる。画像スケールを1/2に小さくすることで、木の葉などにより過剰となってしまう特徴点を減らす処理を行ったところ、若干の改善が見られたが2重化は解消されなかった。

(2)では、スタートからゴールまでのコースを9区間に分割して撮影を行った。区間ごとにSfM処理を行ったところ、SfMによって画像から推定したカメラの位置や向き、画角が実際と異なる、つまり画像間で共通の特徴点がうまく抽出されない画像により、9区間中3区間は正常な点群が生成されなかった。

(3)もコースを9区間に分けて測定を行った。SfM処理を行い、区間毎に点群を作成したところ、区間の始めと終わりは歪みが大きくなる傾向が見られた。9区間分の動画をまとめて処理したところ、図9に示すように、終端だけが大きく歪む結果となった。

これらの結果から歪みの改善策として、CPの設置や、目的の区間より広い範囲で撮影を行うなどが考えられる。広範囲の点群を生成する際は誤差が累積していくため、同じ地点を何度か通る、“綴じ込み (Loop Closure)”を多く作るようにする必要があると思われる。

(3)で生成した1つの区間の点群と、3.1項でNavVis VLXを用いて生成した点群を合成したところ、図10で示すようにNavVis VLXで測定しきれなかった建造物の屋根やコースで影になった部分などを補完することができた。

4. 滑走軌跡の可視化

4.1 RTK-GNSSの精度検証

まず始めに、滑走軌跡の測定や点群の絶対座標化を行う

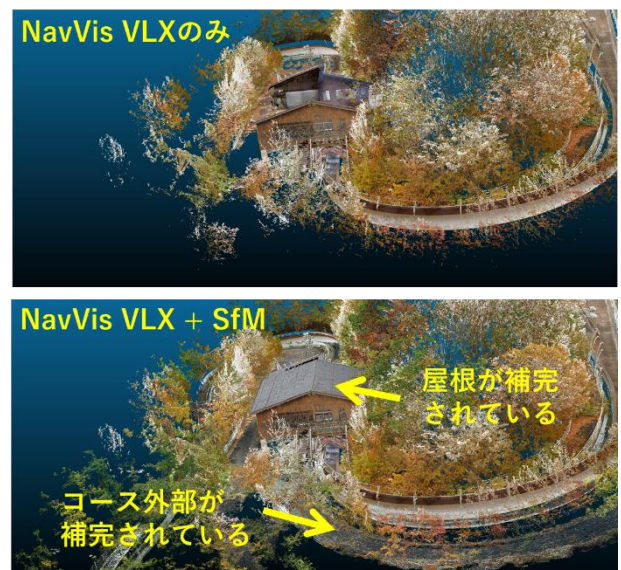


図10 NavVis VLX点群 (上) と空撮・SfMによる点群を合成した結果 (下)

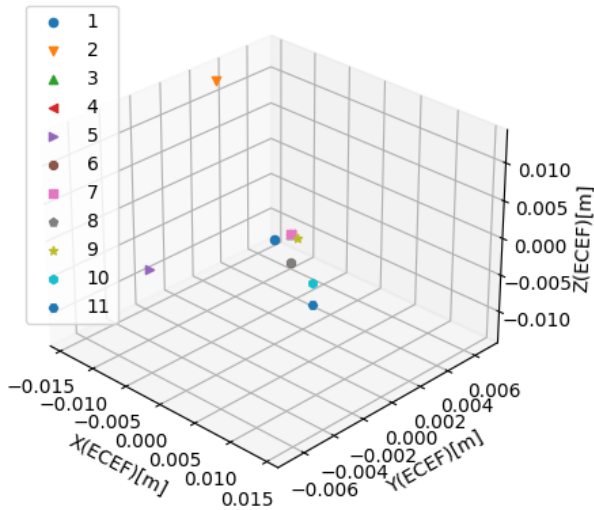


図 11 定点測位座標の 3D 散布図



図 12 基準点の配置 (左), 設置した基準点 (右)
(地図画像 ©2022 CNES / Airbus, Digital Earth Technology, Maxar Technologies)

表 2 各基準点の RTK-GNSS と点群内での誤差

基準点 番号	RTK-GNSS測位座標			点群内基準点座標			誤差(m)
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	
1	0	0	0	-0.028	0.02	0.004	0.035
2	3.133	-0.533	3.823	3.114	-0.543	3.845	0.031
3	6.222	-1.159	7.695	6.23	-1.17	7.74	0.047
4	9.456	-1.599	11.493	9.441	-1.588	11.526	0.038
5	12.654	-2.067	15.338	12.655	-2.049	15.364	0.032
6	15.915	-2.376	19.101	15.886	-2.375	19.114	0.032
7	19.175	-2.73	23.034	19.21	-2.747	23.032	0.039
8	17.009	-6.972	24.454	16.983	-6.972	24.48	0.037
9	13.827	-6.506	20.639	13.819	-6.506	20.664	0.026
10	10.632	-6.063	16.836	10.616	-6.079	16.845	0.024
11	7.346	-5.459	12.855	7.37	-5.494	12.861	0.043
12	4.227	-5.034	9.043	4.178	-5.024	9.053	0.051
13	1.026	-4.479	5.24	1.028	-4.518	5.239	0.039
14	-2.144	-3.987	1.445	-2.139	-4.007	1.411	0.04

上で使用する RTK-GNSS の定点測位の精度を調査した。

以降の実験で RTK-GNSS を使用する際は、ichimill が提供する基準局を使用し、u-blox 社の 2 周波 RTK-GNSS 対応アプリケーション・ボード C099-F9P-0 を移動局として、測位を行った。受信したデータは u-blox 社の GNSS 評価ソフトウェア u-center を用いて解析し、点群編集ソフトウェアで扱いやすい形式である地心直交座標系で絶対座標データを取得した。

実験は東京工業高等専門学校内の駐車場にて実施した。上空に障害物のない駐車場地面に RTK-GNSS アンテナを設置し、FIX 解取得後に 1Hz で 10 秒間定点測位を行った。測位した座標の平均を原点として測位座標を相対座標へと変換し、そのばらつきを検証した。相対座標を 3D 離散図にプロットしたものを図 11 に示す。

原点からの平均距離誤差を計算したところ、0.007m になった。一般的な RTK-GNSS 測位の精度は数 cm であり、十分な測位精度を得ることができた。

4.2 点群の絶対座標化

NavVis VLX で測定した点群は、測定開始位置を原点とするローカル座標系で管理されており、精度検証や滑走軌跡の重ね合わせを行うためには点群の座標系を、地球を基準とした絶対座標に変換する必要がある。そこで、RTK-GNSS で測位した基準点を用いて、点群の座標系を地心直交座標系に変換する実験を行った。

点群の生成を行う前に、駐車場地面にチョークで基準点の十字マーク計 14 個を約 5m 間隔で描き、十字の中心を RTK-GNSS で測位した。設置した基準点とその配置を図 12 に示す。

その後、NavVis VLX を使用して基準点 1, 4, 7, 8, 11, 14 を CP として設定しつつ駐車場の測定を行った。測定したデータから NavVis SiteMaker で CP の絶対座標を入力として与えることで、IMU のドリフトエラーを矯正しつつ解像度 1mm の点群を生成した。

生成した点群データと、RTK-GNSS で測位した基準点 1 の座標を原点として相対座標化した基準点 1, 7, 8, 14 の点データを CloudCompare に読み込んだ。その後、位置合わせ機能を使用して、読み込んだ基準点と点群内の基準点の対を選択し、できるだけ 2 点が近接するように点群のアフィン変換を行った。位置合わせ後の基準点 1, 7, 8, 14 について、RTK-GNSS で測位した座標との RMSE は 0.037m であり、大きなずれを発生させることなく変換を行うことができた。

4.3 点群の精度検証

4.2 項で生成した点群から 14 カ所の基準点の絶対座標を計算し、RTK-GNSS で測位した実際の絶対座標と比較することで点群の精度を検証した。検証結果を表 2 に示す。各

座標は RTK-GNSS で測位した基準点 1 を原点とした相対座標である。各基準点の平均誤差は 0.037m となり、最大でも 0.051m であるため、生成した点群の位置精度は十分高いと言える。

4.4 移動軌跡の測定

そり競技は最高速度が 140km/h 近く、タイムはボブスレー、スケルトンは 1/100 秒、リュージュは 1/1000 秒単位で測定される。そのためコース取りはわずかな差であってもスコアに大きく影響を与える重要な要素の 1 つである。そこで、測定したコースの点群に選手が滑走した軌跡を重ね合わせて表示することが実現できれば、選手の練習およびコーチングに大きく役立てることが可能となる。

滑走軌跡測定の類似実験として歩行者の移動軌跡を測定し、点群を重ねて表示することを目的に実験を行った。移動軌跡は、歩行者頭部に 1Hz で測位を行う RTK-GNSS アンテナを取り付け、ジグザグを描くように駐車場内を歩行することで測定した。測定した軌跡は CloudCompare で点

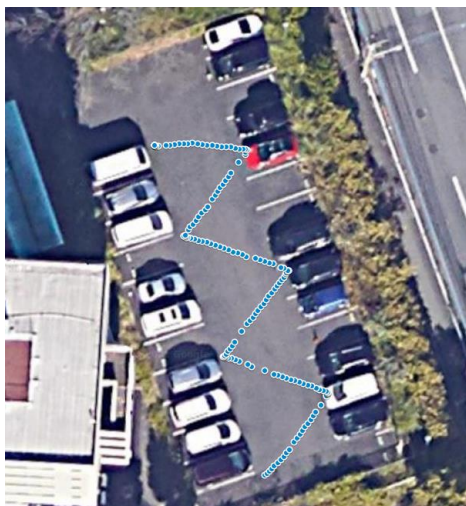


図 13 衛星写真に重ねて表示した移動経路
(地図画像 ©2022 CNES / Airbus, Digital Earth
Technology, Maxar Technologies)

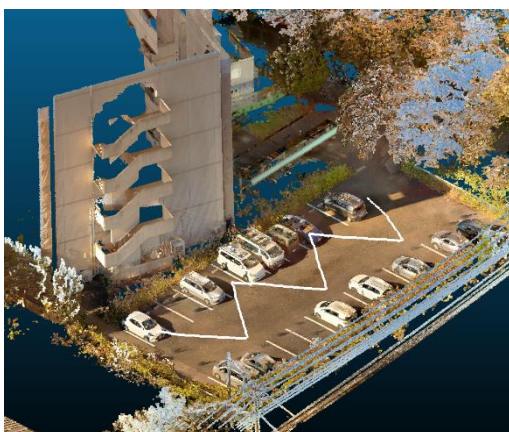


図 14 点群に重ねて表示した移動経路

群とともに、ポリラインとして読み込むことで点群と重ねて表示させた。図 13 に衛星写真と移動軌跡の画像を、図 14 に移動軌跡と点群の画像を示す。

今回は徒歩による移動を 1Hz で測位したため、解像度の高い移動軌跡の取得ができています。しかしボブスレーは最高速度は 140km/h にもなるため、測定間隔を 1m 以内におさめるためには 39Hz 以上で測位する必要があります。しかし、今回使用した C099-F9P-0 は 5Hz が測位の限界であるため、より高速測位が行える RTK-GNSS モジュールを使用するなどの対策を考える必要があります。

また RTK-GNSS は衛星との間に障害物があると大きく精度が落ちるため、その対策の検討も必要である。RTK-GNSS に加えて IMU (Inertial Measurement Unit) や LDV (Laser Doppler Velocimeter) などを組み合わせたドレコニング技術を使用するなどの方法が考えられる。

5. まとめ

本研究では、実際のコース形状のデジタル化を目的として、スパイラルにおける滑走コースの 3D 点群測定実験を行った。NavVis VLX を用いた測定実験では、コース中央を約 25m/min で歩行し、1m ごとにパノラマ写真を撮影しながら測定を行うことで、十分な精度で点群を生成することができた。

さらにドローン空撮および SfM を用いた実験では、スパイラルのコース上空に WP を設定し、高度 10~50m を 5m/s でドローンを自動飛行させ、コースの撮影を行った。撮影した写真・動画から SfM 処理を行い生成した点群を、NavVis VLX で生成した点群と合成することで NavVis VLX で測定できなかった範囲の点群を補完し、高い精度の点群を生成することができた。

しかし、ドローン空撮と SfM を用いた実験では、点群の両端に歪みが発生する可能性がある。その対策としては次のようなものが考えられる。

- CP の設置を行う。
- 端が歪みやすいので対象より広範囲で撮影する。
- 誤差の累積を防ぐためなるべく多く綴じ込みを作る。

また、スパイラルでの実験に加えて、3 人称視点からの滑走軌跡の可視化を目指す類似実験として、歩行者の移動軌跡測定および周囲の点群データと重ね合わせるの可視化を行った。重ね合わせる点群データは NavVis VLX で測定し、RTK-GNSS と CP を用いて絶対座標化した。変換した絶対座標を用いて精度を検証したところ、平均誤差は 0.037m であり、十分な精度で生成できていることを確認した。

また、RTK-GNSS を用いて 1Hz で歩行者の移動軌跡測定を行い、周囲の点群データと重ね合わせて高い精度で可視化することに成功した。

参考文献

- [1] 荻野雅敏, 瀧剛志, 大塚勝也, 北島章雄, 宮崎慎也, 長谷川純一. ボブスレー競技のための体感型トレーニングシミュレータの構築. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2006, Vol.11, No.4, p.469-477.
- [2] 松林勝志, 山下晃弘, 冨平準喜, 佐藤悠之輔, 瀧島和則, 本間朗, 吉川千里. 3 自由度モーションベースの制御とカヌー競技への応用. 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), 2019, Vol.9, No.3, p.1-9.
- [3] “NavVis VLX | NavVis で複雑な現場の 3D データを高速かつ高品質にご提供”. <https://navvis.kke.co.jp/products/vlx/>, (参照 2022-12-11).
- [4] 菅野美紀, 冨永泰正, 邵万朋, 碓崎賢一, 荒木俊輔. コンクリート建築物壁面の SfM 計測の品質向上手法の提案と評価. 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集. 2021, p. 622-623.
- [5] 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, 2014, 第 81 号, p.37-60.
- [6] 白井澄夫. 高精度衛星測位技術と精密計測への応用. 精密工学会誌, Vol. 77, No. 4, 2011, p. 358-361.
- [7] 高須知二. RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術. GPS/GNSS Symposium 2007, p.267-278.
- [8] 増田健. ICP アルゴリズム. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol.2009-CVIM-168, No.23, p.1-8.