

Hovermap 精度レポート

Emesent と他の主要な
LiDAR スキャナーとの比較



Emesent の SLAM 技術の最終的な背景を含む

Hovermap データ品質ファクターと精度評価

ステファン・フラバー博士 著

1 概要

本稿では、エメセントの Hovermap ST-X スキャナーと付属の Aura ソフトウェアによって生成された 3D データの品質について説明します。3D データの品質は、精度、正確度、再現性の観点から定義されます。この議論には、データ品質に影響を与える基本的な要因（ハードウェア、ソフトウェア、キャリブレーション等）も含まれます。典型的な屋内建築物のマッピング実験で実施された評価結果を紹介します。この評価は、GeoWeek 2024 Expo において U.S. Institute of Building Documentation (USIBD) がコーディネートしたもので、様々な LiDAR マッピング開発元の結果を比較することを目的としています。異なる技術（歩行速度、ループ閉合の度合い）でキャプチャーされた 3 つの異なる Hovermap スキャンを、Aura の自動 GCP ワークフローを使用した場合と使用しない場合で比較しました。また、他のレーザースキャナー（SLAM ベースと TLS システムの両方）で撮影したデータセットとも比較しました。Hovermap は一貫して、GCP を使用しない場合は 10mm、GCP を使用した場合は 5mm 以下のグローバル正確度を実現しました。このデータセットには、ジョギング速度でループ閉合なしで取得したデータセットも含まれています（開始位置と終了位置は 300m 以上離れていました）。これに対して、他のスキャナーでは、9mm から 35mm までの様々なグローバル正確度が得られました。

2 序章

同時定位マッピング（SLAM）ベースのレーザースキャナーは 2013 年に発売され、数年間の市場教育の後、その採用は着実に拡大しました。SLAM ベースのスキャナーの性能が向上し、測量士、エンジニア、建築家、その他多くの職種にとって価値あるツールとして受け入れられるようになったため、ここ 3~5 年で急速に普及が進みました。SLAM ベースのスキャナーは、その使いやすさ、多用途性、そして地上レーザースキャナー（TLS）システムよりも格段に速く環境を捉える能力で知られています。しかし、キャプチャー速度とデータ品質にはトレードオフの関係があります。

SLAM スキャナーの出力品質は、グローバル正確度、ローカル正確度、正確度、再現性の観点から測定することができます。これらの用語を以下のように定義します：

グローバル正確度 (Global Accuracy)： スキャン内の点がグローバル座標フレーム内の同じ点にどれだけ近いかを示す尺度（すなわち、点群が既知の座標フレームにジオリファレンスされていることを前提とします）。また、スキャンの範囲にわたる結果の精度、つまり長距離（トンネルの長さなど）の測定精度を指します。

ローカル正確度 (Local Accuracy): ローカルエリア内のポイント間、つまりある場所から見えるポイント間の測定精度。例えばトンネルの幅や部屋の幅など。

精度 (Precision): スキャンの局所的なノイズのレベル、つまり平らな面を通して断面を見たときに見える点の散らばり。

再現性 (Repeatability): スキャン経路に関係なく、同じ環境を複数回スキャンしても同じ結果が得られるソリューションの能力。

SLAM ベースのスキャナーのもう一つの重要な指標は、環境やスキャン技術などの外的要因に対するソリューションのロバスト性です。環境によっては、特徴がないため（例：平滑なトンネル）、SLAM ベースのシステムにとって、より困難な場合があります。移動速度、角度運動、ループ閉合の度合いなどのスキャン技術は、結果に影響を与える可能性があります。

2019 年に最初の Hovermap が発売されて以来、異なる環境やキャプチャー技術にロバストでありながら、高品質の結果を生成することで高い評価を得ています。第 3 セクションでは、Hovermap の結果の品質とロバスト性に寄与する要因について論述します。第 4 セクションでは、典型的な屋内環境における Hovermap の精度、正確度、再現性を調査した評価結果を示します。また、Hovermap の結果を他のいくつかのメーカーの結果と比較します。

3 Hovermap パフォーマンス要因

SLAM ベースのシステムの品質（ローカルおよびグローバルの正確度、精度、再現性）やロバスト性に影響を与える要因は数多くあります。以下では、Hovermap の性能に寄与する主な要因について説明します。

3.1 SLAM の遺産及びチーム

Emesent の SLAM アルゴリズムは、2008 年にオーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) で開発されました。CSIRO は、無線 LAN (Wi-Fi) など画期的な技術を開発してきた実績を持つ、オーストラリアの卓越した政府研究機関です。また、CSIRO は移動ロボットのナビゲーション用、後にマッピング用の 3D LiDAR SLAM 開発のパイオニアでもあります。これは、2013 年に GeoSLAM 社によって商品化された、初の商用利用可能な SLAM ベースの LiDAR マッピングソリューション、ZEBI につながりました。エメセントの創設者とオリジナルの技術チームは、ZEBI と関連する SLAM アルゴリズム (CT-SLAM) を開発した CSIRO ロボティクス・グループの一員でした。

2017 年、次世代 SLAM 実装 (Wildcat SLAM (Ramezani, et al., 2022)) の開発が CSIRO で開始され、Emesent が結成される前に CSIRO Hovermap チームの参加とインプットがありまし

た。この新しい実装には、実際の環境で SLAM がどのように機能するかについての長年の経験と学習に基づいて、CT-SLAM よりも多くの改良が含まれていました。Wildcat を利用したオリジナルの Hovermap は 2019 年に発売され、SLAM ソリューションの精度と堅牢性のおかげで瞬く間に市場シェアを獲得しました。Wildcat の開発は継続され、長年にわたって性能が大幅に改善されました。Wildcat の世界をリードする地位は、Emesent / CSIRO チームが地下環境をマッピングするためにロボット群を配置した 2021 年の DARPA Sub-T チャレンジで実証されました。Wildcat はマップの生成に使用され、基準マップから「偏差ゼロパーセント」という出場者中最高の結果を出しました (Hudson, et al., 2021)。Wildcat は 2022 年のヒルティ SLAM チャレンジでも優勝しました (Ramezani, Catt, Khosoussi, Pauling, & Moghadam)。

2022 年、エメセントは CSIRO から Wildcat のソースコードのコピーを入手し、Wildcat の主要開発者がエメセントに加わりました。エメセントの SLAM チームはその後成長し、CSIRO とは独立して Wildcat コードのバージョンの改良を続けています。これには、コア SLAM アルゴリズムとサポート SLAM 機能 (キャリブレーション、テストなどに使用) が含まれています。

3.2 多様なサンプルデータ

Hovermap は 2018 年から商業的に展開され、さまざまな業界にわたる数百の顧客に利用されています。3 次元の特徴のタイプ、キャプチャー速度、キャプチャー方法 (手持ち、ドローン搭載、車両搭載など) が異なる多様な環境のマッピングに使用されてきた。これにより、アルゴリズムの改善やデバッグに役立つ豊富なサンプルデータが生成されました。エメセントの SLAM チームは、SLAM のための新しい環境や困難な環境に遭遇するたびに、そこから学び、SLAM アルゴリズムの改良と堅牢性の向上を図っています。そのため、Hovermap は、他の SLAM システムが失敗したり、性能が低かったりする困難な環境 (トンネルなど) のマッピングで高い評価を得ています。s)。

3.3 ロバスト SLAM の実装

Emesent SLAM の実装は、多くの低レベルの実装の詳細と高レベルのコンセプトにより高いロバスト性を実現しています。以下では、Emesent SLAM ソリューションのユニークなロバスト性に貢献しているいくつかの実装要因について説明します。しかし、この IP の機密性のため、公開できない側面もあります。

SLAM アルゴリズムは、LiDAR データから得られる特徴のマッチングに依存しています。アルゴリズムは、(視点、点密度、ノイズなどにロバストな) 3D 特徴をユニークかつ一貫して表現する SLAM の特性から恩恵を受けます。異なる SLAM 実装は異なる特徴を使用し、他のものよりもロバストなものもあります。

Emesent の SLAM ソリューションは、空間の離散的なボリューム内の 3 次元の点の「パッチ」である特徴を使用します。SLAM アルゴリズムは、世界を一連のパッチとして表現し、各パッチの特性（平面性など）を計算します。プロパティは、LiDAR によって異なる視点から見たときに、関連するパッチによって 3D 特徴を一貫して表現するのに役立つものが選択されます。この一貫性は、スキャナーが環境内を移動する際の特徴マッチングに役立ちます。この形式の SLAM 特徴は、エッジやコーナーなどを表現しようとしらないという点で汎用的であるため、どのような顕著な 3D 特徴も表現することができます。エッジのような特徴の識別に依存する他の SLAM ソリューションは、特定の環境ではロバスト性が低くなります。

パッチは多数のポイントを蓄積することができ、ポイントが増えるほど、より積極的なノイズフィルタリングを適用して「より強い」特徴を生成することができます。そのため、点密度が高くなるほど SLAM 性能は向上します。また、外れ値を除去するためのフィルタリングも適用されます（これにより、環境中に移動する特徴がある場合でも、SLAM のロバスト性を向上させることができます）。環境の大きさの変化に対応するために、多重解像度アプローチが使用されます。

多くの SLAM 実装と同様に、Emesent SLAM パイプラインには、ローカル推定（オドメトリ）フェーズとグローバル最適化のフェーズがあります。他の多くの実装とは異なり、大規模な補正を行う高度な特徴マッチングのフェーズも含まれています。

SLAM の実装では、最終的な到達精度を左右する要因であるため、優れた局所推定を行うことが最も重要であると言えます。Emesent SLAM オドメトリフェーズは、スライディング・ウィンドウ・アプローチによる連続時間最適化を利用します。これは、重複する「時間窓」データを処理して、局所的な軌道推定を生成します。ウィンドウが時間的に前進するにつれて、結果は継続的に改善されます。

高度な特徴マッチングのフェーズは、ループ閉合や場所の認識など、グローバルレベルの操作を実行するポーズグラフのような最適化を行うものです。マップ内の大規模なエラー（正しく閉じられていないループなど）がすべて解決され、グローバルな一貫性が維持されるようになります。これにより、Emesent SLAM ソリューションは、非常に大きなループを正常に閉じることができます。

グローバル最適化フェーズは、データセット全体に対して最適化を実行し、主に、オドメトリおよび高度な特徴マッチングフェーズの後に残った誤差の除去/スムージングを担当します。

3.4 ユーザーが調整可能なパラメーター

SLAM アルゴリズムには通常、出力に様々な影響を与える多数のパラメーターがあります。処理時間と精度はトレードオフの関係にあり、パラメーター値によっては、特定の環境で他のアルゴリズムよりも優れた性能を発揮することもあります。Emesent の Aura アプリケーションで Hovermap デー

タを処理する場合、ユーザーは特定の環境 (SLAM 機能が不十分な環境など) 向けに調整されたさまざまなデフォルトパラメータのセットから選択できます。これらのプロファイルを導き出すのに役立ったのが、前述の多種多様なサンプルデータです。プリセットのプロファイルはほとんどの典型的な状況に適していますが、パラメーターを追加変更することで役立つ使用例もあります。そのため、Aura はすべての主要な SLAM パラメーターへのフルアクセスと、カスタムパラメータープロファイルの保存機能をユーザーに提供しています。エメセントのサポートチームは、さまざまな状況に応じてどのパラメーターを調整すべきかアドバイスします。

3.5 ISO9001 認定の製造施設

すべての Hovermap ユニットは、オーストラリアの ISO9001 認定製造施設で、Emesent の技術者が手作業で組み立てています。ISO9001 規格に準拠することで、再現可能なプロセスが使用され、一貫した品質基準が満たされていることが保証されます。1,700m² の施設はキャリブレーションプロセスに合わせて調整されており、正確に測量された地上ターゲットも含まれています。

3.6 キャリブレーション及びテスト

Hovermap の各ユニットは、品質基準が満たされていることを確認するため、厳格なキャリブレーションとテストプロセスを経ており、キャリブレーションレポートは各ユニット毎に作成されます。キャリブレーションプロセスでは、IMU やエンコーダーなどのコンポーネントだけでなく、個々の LiDAR のタイミングやその他の不一致も考慮されます。これらのコンポーネント間の変換も決定され、説明されます。キャリブレーションプロセスは一貫性を確保するために半自動化されています。センサーと SLAM 出力を評価し、不良コンポーネントを特定する特注の品質分析ソフトウェアツールが使用されます。キャリブレーション後、各ユニットは事前にプログラムされたドローン飛行でテストされます。これにより自律飛行能力がテストされ、出力を基準スキャンと自動的に比較することで地図の品質が評価されます。

3.7 回転する LiDAR パック

SLAM アルゴリズムは、環境内の顕著な 3D 特徴を検出して追跡することに依存しています。スキャナーが環境内を移動する際に、これらの特徴が SLAM アルゴリズムによって何度も「認識」されるためには、異なる視点から見たときに特徴が同様の特性 (点密度、点の広がり、範囲など) を保持していることが役立ちます。LiDAR パックを第二の軸の周りに回転させることで、LiDAR ポイントはより一貫性のある均一な方法で作成されます (非回転 LiDAR パックシステムによって作成される筋状のパターンと比較して)。これにより、より一貫性のある SLAM の特徴が得られます。

パックを回転させることの更なる利点は、スキャンユニットの向きに関係なく、球状の視野内に SLAM フィーチャーが作成されることです。これにより、SLAM アルゴリズムが追跡できる特徴が増え、SLAM ソリューションがさらに制約され、改善されます。対照的に、回転しないパックソリューションは、水平に取り付けられた場合、上下の特徴が不足します。これは、しばしば 2 つのパックを異なる向きで使用することで克服されますが、システムに重量、複雑さ、コストを追加することになります。回転パックはまた、完全なカバレッジを達成するためにユーザーがユニットをさまざまな方向に向ける必要がないため、データキャプチャの使いやすさを向上させます。このため、さまざまな配備オプション（車両搭載、バックパック搭載、ハンドヘルドなど）に適しています。

3.8 センサーレンジ

上述したように、SLAM では特徴を時間経過とともに追跡する必要があります。より長い検出範囲を持つ LiDAR センサーを使用することで、より遠くの特徴を追跡することができます。特徴をより長く「見る」ことができるため、SLAM のドリフトを減らすことができます。これは、追跡すべき近くの特徴が少ないシナリオで特に有用です（例えば、より高い高度でドローンに搭載してマッピング飛行を行う場合や、船舶から河川や海岸の海岸線をスキャンする場合など）。また、近くの特徴が低品質である場合にも有効です。例えば、滑らかな壁面を持つトンネルをスキャンする場合、交差点や接合部がより遠くにスキャナーから「見える」ようにすることで、トンネルに沿った軸方向に SLAM ソリューションを制約することができ、軸方向のスリップやドリフトを防ぐことができます。

また、検知範囲を広げることで、ループを閉じる機能が向上し、スキャナーの経路が交差していなくても、共通の特徴を遠くから「見る」ことができるようになります。例えば、平行する 2 つの通りをスキャンする場合、交差する通りから共通の特徴が見えることがあり、ループ閉鎖が可能になり、SLAM ソリューションが向上します。

Hovermap ユニットは長いセンシングレンジ（ST は 100m、ST-X は 300m）を提供し、SLAM の特徴をより広い範囲で検出することができます。しかし、一般的に検知範囲のノイズは距離とともに増加し、ポイント密度は低下するため、トレードオフがあります。このため、長距離での SLAM 特徴の品質が低下する可能性があります。範囲を広げると、処理時間も長くなります。そこで、エメセントの Aura ソフトウェアでは、SLAM 特徴生成の最大距離をユーザーが調整できるようにし、必要に応じて環境に適応できるようにしています。図 1 の例は、スキャンの開始点と終了点が 100m 離れている Hovermap ST-X のスキャンを示しています。センサーの範囲が 300m であるため、共通の特徴を識別し、ループを閉じることができた。スキャンは時間ごとに色分けされ、左下の挿入図は開始と終了の特徴（赤と青）が正しく位置合わせされていることを示しています。

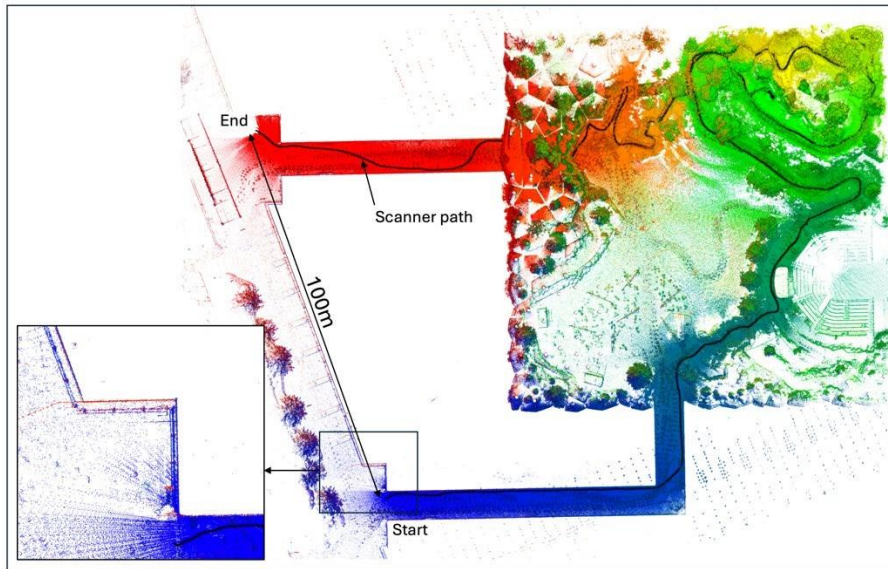


図 1. 開始位置と終了位置が 100m 離れているスキャンの上面図

3.9 ユーザー定義のノイズフィルタリングオプション

SLAM で生成された点群に含まれるノイズは、以下のような様々な原因から発生する可能性があります:

1. LiDAR センサー固有のレンジノイズ。レンジノイズは一般的に、検知された距離に応じて、返されるパルスの S/N 比が低くなるため増加します。また、センサーによっては、エッジ、薄い物体、高輝度物体からの「ゴースト」ポイントやアーティファクトも発生します。
2. 環境中の反射材からの反射（鏡など）
3. 太陽による LiDAR センサーへの干渉
4. 環境内で移動する物体
5. ある種の SLAM エラー。

エメセントの SLAM パイプラインと Aura ソフトウェアは、様々な方法でこれらのノイズ源に対処します。Aura は、ユーザーが調整可能なパラメーターを持つ、多くのノイズフィルタリングオプションを提供します。これには、統計的外れ値除去 (SOR) フィルターなどの業界標準フィルターや、エメセント独自のフィルターが含まれます。独自のフィルターには以下が含まれます:

適応型 SOR フィルター: これは、標準的な統計的外れ値除去フィルターを改良したもので、ポイントの密度が異なる領域に対して、フィルターの攻撃性を自動的に適応させます。これにより、低密度の領域では密度を維持し、高密度の領域ではより積極的になります。

デノイズ SOR フィルター: ランダムな点群ノイズと反射により生成されたアーティファクトを除去します。

動くオブジェクトのフィルター:動いているオブジェクト(歩行者や車など)を自動的に除去します。ダイナミックな環境でデータをキャプチャーする場合に非常に便利で、ポスト処理/クリーンアップの時間を大幅に短縮します。

Aura では、これらのフィルターを SLAM 処理パイプラインの一部としてデフォルトで適用することも、必要に応じて出力に個別に適用することもできます。

3.10 ジオリファレンスと正確度の向上のための GCP

SLAM は繰り返し推定技術であるため、時間や距離の経過とともに推定誤差が蓄積され、ドリフトが発生する可能性がある。これは、ループ閉合が実行されない場合(パイプラインのような長い直線資産のスキャンなど)に悪化する可能性があります。ドリフトに対抗するために、位置が既知の特徴(Ground Control Points または GCP)を使用して SLAM ソリューションを制約することが役立ちます。GCP は、SLAM ベースのスキャンの地理参照にも使用できます。

Emesent Aura は、Hovermap 用の自動 GCP ワークフローを提供しており、GCP ターゲットを点群から自動的に検出し、SLAM ソリューションの改善と点群のジオリファレンスに使用します。

他の SLAM ベースのソリューションでは、ユーザーが GCP の位置でスキャナーを停止し、マークを付ける必要があります。これはキャプチャー時間が長くなり、GCP が手の届かないところにある状況では実用的ではありません。また、ドローンや車両を使ったスキャンにも適さない。対照的に、オーラ GCP ワークフロー中のスキャンでターゲットが自動的に検出されるため、Hovermap を停止して GCP に配置する必要はありません。

ターゲット(とその中心点)の検出を自動化することで、(手動でターゲットの中心点を選ぶ際に生じる)人為的ミスや矛盾の可能性を排除します。これにより、結果の精度と一貫性が向上し、手作業にかかる時間がなくなります。

現在、Emesent GCP ターゲットは反射ディスクの形をしています。将来的に Aura は、ユーザーが点群内の任意のフィーチャーを GCP として指定できるようにする予定です(例:コーナー、ペイントされたマーキングなど)。

セクション 4 で見たように、USIBD 評価データセットで GCP を使用することで、3 つの Hovermap スキャンすべてでグローバル正確度が向上しました(たとえば、「標準」スキャンでは 17.3mm から 8.5mm へ)。

3.11 地理参照と精度向上のための RTK GPS

RTK GPS データを追加制約として SLAM パイプラインに組み込むことで、Aura は SLAM ドリフトを低減し、点群を自動的に地理参照することができます。Emesent の連続時間 SLAM 実装では、GPS データを SLAM ソリューションの制約として完全に統合することができます。異常値フィルタリングは GPS データに適用され、エラーを検出し、結果への影響を取り除きます。

Hovermap は現在、DJI M300 および M350 ドローン、Emlid Reach シリーズの RTK レシーバーから受信した RTK データと互換性があります。将来的には、Freefly Astro ドローンやその他の RTK レシーバーブランドからの RTK データをサポートする予定です。Emlid デバイスとの統合は、ビークル RTK マウントとバックパック RTK ソリューションの形で利用できます。

RTK を使用することで、ループ閉合を必要とせず、より高速・高高度での飛行が可能になるため、Hovermap のドローンベースのユースケースが拡大します。これにより、より広いエリアや長い直線資産のマッピングが可能になります。

Hovermap ST-X Vehicle RTK ソリューションの精度を独自に評価したところ、2km の道路をスキャンした場合、地上コントロールを追加することなく、XY で 14mm、Z で 9mm (いずれも 1 標準偏差) のグローバル正確度が得られました (Orion Spatial Solutions、2024 年)。

4 Hovermap の正確度の評価

4.1 はじめに

この章では、Hovermap ST-X と他の様々な LiDAR スキャナーで取得したデータの評価を紹介します。データは USIBD が主催したイベントで収集されたもので、ソリューション間のバイアスのない比較を目的としています。参加者は環境をスキャンし、典型的な LOD 200 リアリティ・キャプチャ・プロジェクトに適した出力を作成するよう求められました。これには、主催者から提供されたコントロールポイントへのジオリファレンス、データのクリーニング、カラー化などが含まれていました。

エメセントはこの機会を利用し、テスト条件下で同じ環境の 3 つのデータセットをキャプチャーし、キャプチャー速度とパスを変えて、精度への影響を評価しました。Hovermap データセットは、SLAM パイプラインで GCP を使用する場合と使用しない場合を Aura で処理し、自動 GCP ワークフローが精度に与える影響を評価しました。

Hovermap には、点群をカラー化する 360 画像や、SLAM を向上させ点を地理参照する RTK GPS データを使用するオプションがありますが、今回の評価にはこれらの機能は含まれていません。

4.2 テスト環境

USIBD スキャナーの評価は、デンバー・コンベンション・センターで開催された GeoWeek 2024 イベント中に実施された。コンベンション・センターの一部がテスト環境として使用されました。このエリアは、SLAM/移動型スキャナーと静止型スキャナーの評価に使用できるように、主催者によって慎重に選ばれました。このエリアには、会場を縦断するメイン通路（幅 17~28m、長さ 315m）のひとつ、通路の一端から斜めに分岐した部分（長さ 93m）、メイン通路から階段とエスカレーターでアクセスできる下のホワイエ（広間）のエリアが含まれます（図 2 参照）。屋外エリアや内部階段室は含まれていません。この環境には、LiDAR にとって困難な様々な素材（床から天井まである大きな窓、磨き上げられたステンレススチールの手すり、黒い天井など）が含まれています。

スキャンは会議の時間帯に行われたため、多くの人がホールを歩いていたため、

イベントに参加した各メーカーには、スキャンを完了するために公称 1 時間が割り当てられたが、必要に応じて追加時間が認められました。主催者が収集した比較指標には、データをキャプチャーする時間と、一般的なリアリティ・キャプチャ・プロジェクトに使用できる地理参照出力を提供するための処理時間が含まれていました。



図 2(左) USIBD スキャナーの評価に使用したデンバーコンベンションセンターのメイン通路と下部ホワイエ（広間）エリアの画像
(右) 使用エリアの平面図

4.3 グラウンド・トゥルース

USIBD チームは、テストエリアの上層部全体に測量基準点を設置しました(図 3 参照)。下のホワイエ(広間)には GCP は設置されませんでした。トータルステーションを使用して、環境を横断し、GCP の位置を測量しました。残念ながら、この作業中にエラーが発生したため、トータルステーションのデータは使用できませんでした。代替案として、Riegl チームが VZ-600i TLS を使用して取得したスキャンが GCP ターゲットの位置特定に使用され、これがグラウンド・トゥルースとして使用されました。Riegl のスキャンの精度レポートは提供されなかったため、グラウンド・トゥルースの精度は不明です。

表 1 に示すような GCP の位置が csv ファイルで出場者に提供されました。出場者は、自分のスキャンを GCP にジオリファレンスし、ジオリファレンスされた結果を提出することが求められました。

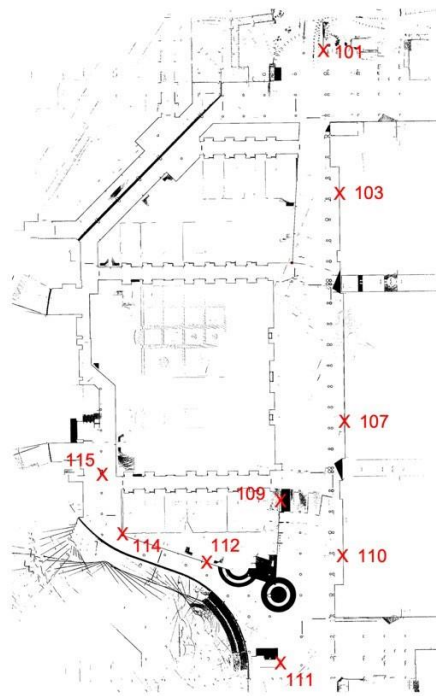


図 3. 試験環境における GCP の位置

表 1. GCP 座標値

ID	X	Y	Z
101	406.784	527.293	62.137
103	413.211	464.393	61.978
107	414.571	364.118	62.048
109	385.806	329.808	62.289
110	413.305	305.501	61.899
111	385.346	258.675	60.96
112	353.599	302.996	61.826
114	316.392	315.607	62.021
115	308.116	342.234	61.807

4.4 Hovermap によるデータ取得

2 台の Hovermap ST-X を手持ちで使用し、3 つの Hovermap データセットを取得しました。3 つのデータセットは、異なるキャプチャー方法の効果を評価するためにキャプチャーされていました。

高速スキャン: (図 4a) このスキャンの意図は、エリアをどれだけ高速でスキャンできるか、そして速度と精度のトレードオフがどうなるかを見ることでした。エメセント・チームのメンバーが Hovermap を持ってオープン・ループ・パスでジョギングしました (スキャン開始地点と終了地点はメイン通路の反対側)。対角線上の通路と下のホワイエ・エリアには、まだいくつかの小さなループが形成されていました。

標準スキャン: (図 4b) このスキャンは、このサイズと複雑さの環境のスキャンに通常使用される方法でキャプチャーされました。スキャンはほぼ同じ場所で開始され、ほぼ同じ場所で終了し、通常の歩行速度で撮影され、いくつかの小さなループ閉合がありました。

長距離スキャン: (図 4c) このスキャンも通常の歩行速度で撮影され、同じ場所で開始/終了しましたが、コンテスト・エリアには含まれない他の通路をスキャンすることによって作成された追加のループ閉合が含まれていました。その意図は、追加のループ閉合がグローバル正確度の向上に役立つかどうかを評価することでした。

下の図 4 は、スキャンの平面図と各スキャンにかかった経路です。それぞれの経路の長さ、スキャン時間、スキャン速度も示しています。

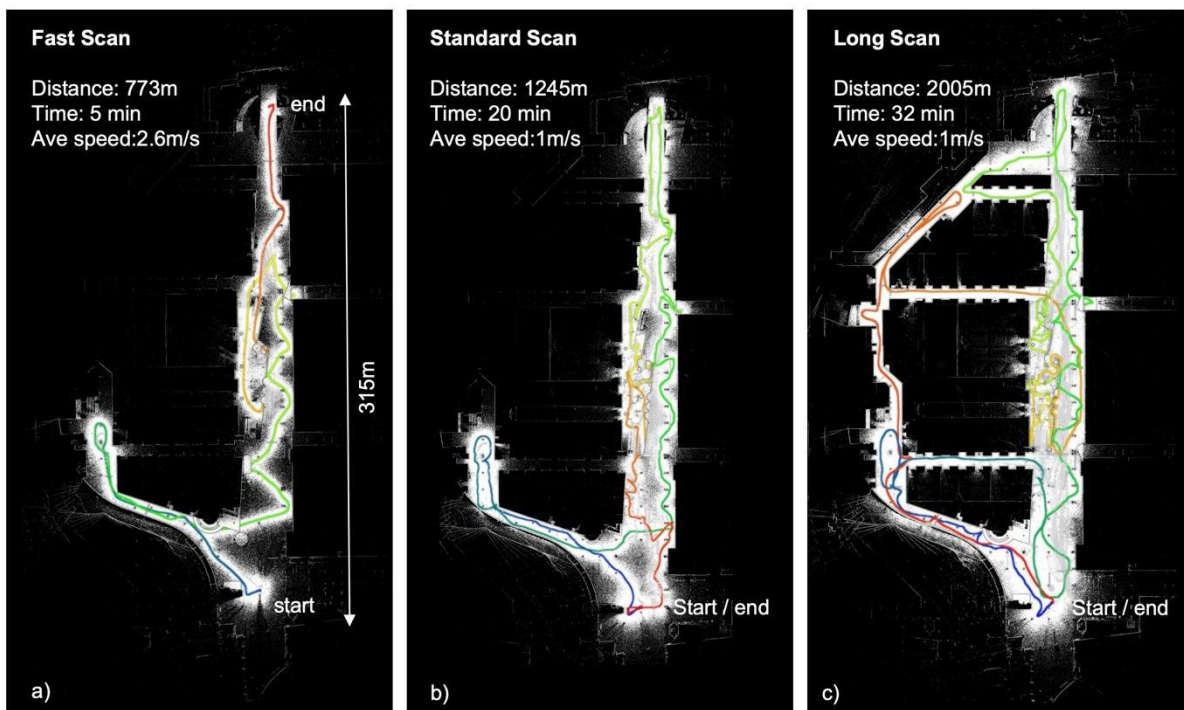


図 4. キャプチャーされた 3 つの Hovermap スキャンの概要



図 5. GCP の近くで歩行スキャンを行う Emesent のチームメンバー (左)、標準的なチェッカーボード GCP の上に設置された Emesent の反射ディスク GCP (右)。

4.5 Hovermap スキャンの処理

3 つの Hovermap スキャンのデータは、64GB の RAM を搭載した Intel i9 ベースのノート PC で稼働する Emesent の Aura デスクトップアプリケーション (v1.5) で処理されました。

Aura では多くの SLAM パラメーターを調整することができますが、データセットはデフォルトのパラメーターを使用して処理されました。デフォルトのノイズ除去フィルター (Moving Object Filter を含む) を適用しました。

4.6 Aura 自動 GCP ワークフロー

Aura には自動 GCP ワークフローがあり、SLAM パイプライン内で GCP が使用され、SLAM 結果の改善と点群の地理参照 (非剛体変換) の両方が行われます。自動 GCP ワークフローがどの程度精度を向上させるかを評価するため、ワークフローを使用した場合と使用しない場合のスキャンを処理しました。USIBD チームから提供された GCP ロケーションは、すべて GCP ワークフローで使用されました (除外されたものではなく、後にチェックポイントとして使用されました)。

Emesent の自動 GCP ワークフローでは、円形の GCP ターゲットを使用する必要があるため、これらのターゲットは、USIBD チームが環境に配置したチェックボードターゲットの上に配置しました (図 5 参照)。Emesent ターゲットの厚さ (5mm) は無視するものとし (つまり、GCP ワークフローや精度評価には考慮されていません)。

4.7 CloudCompare による半自動 GCP 検出

自動 GCP ワークフローが適用されていないスキャンを地理参照するためには、スキャン内の GCP 中心を特定する必要があります。GCP の位置は、対距離 (ペアワイズ) 精度評価 (セクション 4.9.2 参照) にも必要でした。Emesent の GCP ターゲットは円形で、一様な高反射率であるため、

点群内のターゲットを見るときに中心点を手動で選ぶのは容易ではありません（市松模様またはクロスヘアのターゲットはありません）。手動で中心点をピックアップすることによって生じるエラーを避けるために、CloudCompare にて下記の半自動ワークフローが使用されました（図 6 に図示）：

1. 反射強度の高いターゲットが見えるように反射強度別に点群を色分けした。
2. 低強度の点を除去するために、強度によって点群をフィルタリングした。
3. ターゲット周辺の局所領域が選択され、この領域に SOR フィルターが適用され、統計的外れ点が除去されました。
4. CloudCompare の「Create Cloud from Selected Entities Centre（選択した対象のセンターから点を創出する）」機能を使って、高強度 GCP ターゲット点の中心に位置する新しい点を作成しました。この新しい点をターゲットセンターとして保存しました。

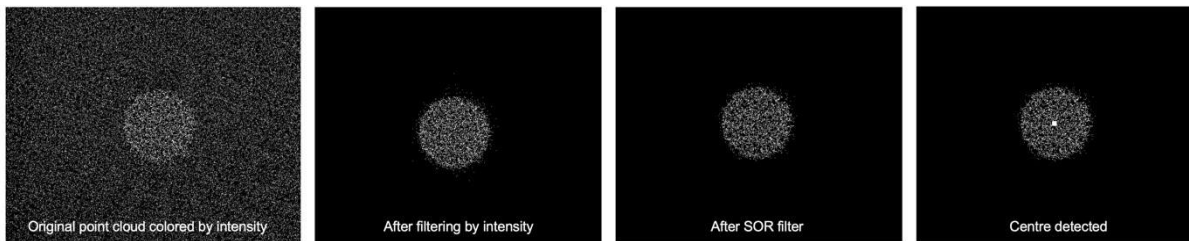


図 6. CloudCompare での半自動 GCP 中心点の抽出

Aura 自動 GCP ワークフローは、円形 GCP ターゲットを自動的に検出し、その初期位置（GCP ワークフロー前の位置）を報告しますが、最終位置（ジオリファレンス後）は報告されません。そのため、上記の半自動 CloudCompare ワークフローは、自動 Aura GCP ワークフロー適用後のスキャンで GCP 位置を見つけるためにも使用されました。

4.8 Hovermap スキャンのジオリファレンス

3 つの Hovermap スキャンは、USIBD チームから提供された測量コントロールポイント（Riegl スキャン）にジオリファレンスされました。2 つのジオリファレンス技術が適用されました。

1. **Aura を使用した自動ジオリファレンス。**Aura の自動 GCP ワークフローを使用して、スキャンデータの非剛性（non-rigid）の変換を行いました。
2. **CloudCompare での ICP ベースのジオリファレンス。**セクション 4.7 で概説したワークフローを使用して GCP 位置を検出し、9 つの GCP 中心を含む新しいクラウドを作成しました。グラウンド・トゥルースの位置は 2 つ目のクラウドとして CloudCompare にインポートしました。最初のクラウドをグラウンド・トゥルースのクラウドと大まかに位置合わせし、

CloudCompare のファイン・レジストレーション・ツールを使ってアライメントを精緻化しました（これは ICP ベースのクラウド間アライメントを実行します）。得られた変換行列を使用してフルスキャンを変換し、GCP にジオリファレンスしました。

表 2. CloudCompare を使用した Hovermap スキャンのジオリファレンス RMS 誤差

Scan	RMS Error (m)
Fast	0.016190
Standard	0.018285
Long	0.016982

表 2 は、ICP ベースのジオリファレンス後に CloudCompare が報告した RMS 誤差を示しています。

4.9 Hovermap 正確度の結果

4.9.1 絶対位置の誤差

この精度評価の目的は、USIBD チームから提供されたグラウンド・トゥルス調査位置に対するジオリファレンス後の GCP ターゲット中心の絶対位置の誤差を測定することでした。これは、キャプチャー速度/パスと、SLAM 結果を改善するために GCP を使用する自動 GCP ワークフローの使用の影響を評価するために、6 つのスキャンバリエーションのそれぞれについて実行されました。

各スキャンバリエーションについて、GCP とグラウンド・トゥルス点の各ペア間のユークリッド距離を計算しました。表 3 は、これらのユークリッド距離から得られた統計値を示しています。

表 3. 自動 GCP ワークフローを適用した場合と適用なかった場合の Hovermap スキャン 3 種の絶対位置誤差

スキャンの種類	自動 GCP なし					自動 GCP あり				
	Min (mm)	Max (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	RMSE (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	RMSE (mm)
高速	12.9	21.2	15.9	± 3.0	16.2	2.1	9.7	6.1	± 2.2	6.4
標準	9.2	25.8	17.3	± 6.4	18.3	2.9	18.7	8.5	± 4.6	9.6
長距離	8.6	31.6	15.5	± 7.2	17.0	3.9	28.7	10.8	± 8.5	13.4

4.9.2 対距離誤差 (Pair-Wise Distance Errors)

この精度評価は、Hovermap スキャンの GCP ポイントのペア間のユークリッド距離を測定し、グラウンド・トゥルス GCP ポイント間の同じ測定値と比較することで行いました。9 つの GCP ポイントが

利用可能であったため、各スキャンで合計 36 のペア間の距離を測定できました。これらの距離は 28m から 269m の範囲でした。

評価は、Aura の自動 GCP ワークフローを使用した場合と使用しなかった場合の 3 種類のスキャン（高速、標準、長距離）について行いました。この評価では、絶対距離ではなく相対距離のみを測定するため、自動 Aura GCP ワークフローで処理されなかったスキャンについては、CloudCompare の半自動ジオリファレンスワークフローを使用する必要はありませんでした。自動 Aura GCP ワークフローは、スキャンを地理参照し、GCP 位置を使用して SLAM ソリューションを制約/改善します。この評価では、後者の影響のみを測定します。

図 7 は、GCP 位置間の 2 点間距離を示している。表 4 は、3 種類のスキャンの測定値とグラウンド・トゥールースのポイント間の絶対差から得られた誤差統計の要約です。

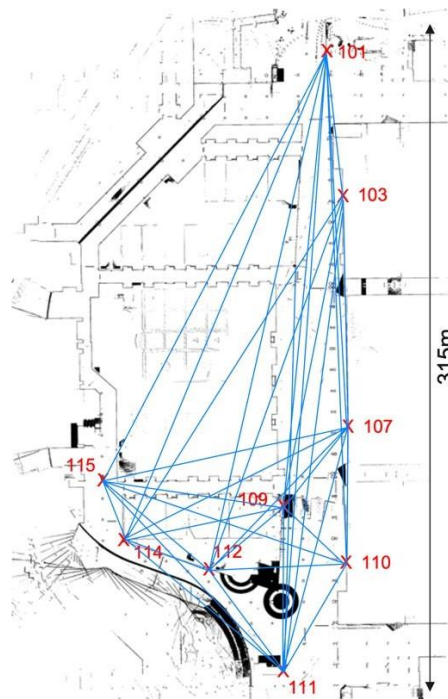


図 7. GCP の位置間の距離

表 4. Hovermap スキャン 3 種のペアワイズ距離誤差

スキャンの種類	自動 GCP なし					自動 GCP あり				
	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
高速	0.4	23.8	7.7	10.2	± 6.2	0.2	11.5	3.0	4.2	± 3.0
標準	0.5	25.9	7.7	10.3	± 6.6	0.2	11.4	3.0	4.4	± 3.1
長距離	0.7	38.6	6.7	10.2	± 9.9	0.1	38.0	4.4	7.6	± 9.1

4.10 結果に関する考察

4.10.1 絶対位置の誤差

表 3 からわかるように、SLAM ソリューションを改善するために GCP を使用しなくても、3 つのスキャン方法すべてで良好な結果が得られました（平均誤差はすべて 18mm 以下）。自動 GCP ワークフローを使用すると、3 つのスキャン全てで結果が改善されました（全て 11mm 以下）。異なる方法と 2 つの異なる Hovermap ユニットで撮影された 3 つのスキャン間のパフォーマンスの一貫性は、Emesent の SLAM ソリューションの堅牢性、再現性、品質を物語っています。SLAM パイプラインに GCP を導入することで改善されたことは、このプロセスの利点を示しています。

最も驚くべき印象的な結果は、GCP の有無にかかわらず、高速スキャンが他の 2 つのスキャンに比べていかに優れているかということです。高速スキャンが GCP なしで他のスキャンと同等のパフォーマンスを示した（実際、標準スキャンよりも優れている）という事実は、SLAM アルゴリズムのパフォーマンスとセクション 3 で概説したその他の要因の証です。

表は、自動 CGP ワークフローを適用した場合、高速スキャンが他の 2 つの方法を実際に上回っていることを示している（平均誤差 $6.1 \pm 6.4\text{mm}$ 対 $8.5 \pm 9.6\text{mm}$ および $10.8 \pm 13.4\text{mm}$ ）。これは直感に反するよう思えるかもしれませんが、SLAM-GCP ワークフローによって説明できます。GCP は SLAM パイプラインの制約として使用されるため、純粋な SLAM ソリューションとは逆に、SLAM 軌道をこれらの「アンカー（錨）」ポイントに向かって「引っ張る」または「曲げる」ために使用されます。多くのループ閉合を持つスキャンによって形成された SLAM 軌道またはソリューションは、より多くの SLAM 特徴ベースの制約を持ち、GCP 制約によって「曲げられる」影響を受けにくくなります。対照的に、オープンループの SLAM ソリューションは、GCP 制約によって「曲げ」られやすくなります。

これは今回の評価で観察された興味深い現象ですが、最良の結果を得るためには GCP を使用したオープンループ・スキャンを行うことは必ずしもお勧めできません。GCP の制約が最も大きな影響を及ぼす場所なので、GCP 箇所では良い結果が得られるかもしれませんが、スキャンの他の領域では結果が悪くなる可能性があります。ループを閉じたスキャンの方が、理論的には、GCP 位置から離れた他のエリアでの誤差が小さくなるはずですが、この効果の詳細な評価は、本稿の範囲を超えています。

4.10.2 対距離（ペアワイズ距離）誤差（Pair-Wise Distance Errors）

表 4 からわかるように、SLAM ソリューションを改善するために GCP を使用しなくても、3 つのスキャンすべてで良好なペアワイズ距離誤差の結果（すべて平均誤差 10.5mm 未満）が得られました。自動 GCP ワークフローを組み込むことで、結果はすべて改善されました。しかし、長距離スキャンに

については、あまり改善が見られませんでした（長距離スキャンの平均誤差は 10.2mm から 7.6mm という若干の改善であったのに対して、高速スキャンと標準スキャンではそれぞれ 10.2mm から 4.2mm、10.3mm から 4.4mm と大幅に改善されました）。

注目すべきは、高速スキャンが他の 2 つのスキャンに比べていかに優れているかということです。GCP を使用しない場合、長距離スキャンと同程度の性能を示しました（平均誤差 10.2mm）。これは、セクション 4.9.1 で示した絶対位置誤差の結果をさらに検証するもので、Emesent SLAM ソリューションがこの種の環境においてロバストで再現性が高いことを示しています。

もう 1 つの注目点は、長距離スキャンがワースト 1 位の最大誤差（38.6mm 対 23.8mm、25.9mm）を示したことです。詳しく調べてみると、この悪い結果は特定の GCP ポイント（ポイント #110）に関連していることがわかりました。

表 5 は、長距離スキャンの個々のペアワイズ誤差のヒートマップです。表からわかるように、点 #110 と他の多くの点（101、103、107、111）間の距離が最も悪い結果となっています（31.1～38.6mm、赤/オレンジのセル）。対照的に、他の 2 つのスキャンでは明確な異常値 GCP はありませんでした。これは誤差の標準偏差からも明らかです（高速スキャンと標準スキャンではそれぞれ 6.2mm と 6.6mm であるのに対し、長距離スキャンでは 9.9mm）。

表 5. Hovermap による長距離スキャンでの距離誤差のヒートマップ (単位:mm)

GCP ID	101	103	107	109	110	111	112	114	115
101		0.7	4.1	8.6	35.2	1.7	11.2	7.4	4.6
103			4.7	7.9	35.8	2.3	11.3	7.2	4.4
107				0.7	31.1	8.6	8.3	4.7	5.3
109					10.4	10.3	10.7	4.8	14.5
110						38.6	3.8	4.5	15.5
111							3.1	16.8	11.7
112								1.3	5.3
114									8.5
115									

絶対位置誤差についても同様の傾向が見られました。表 6 は、SLAM を改善するために自動 GCP ワークフローを使用した場合と使用しなかった場合の、各 GCP ポイントの絶対位置誤差のヒートマップを示しています。この表から、GCP ポイント#110 の絶対位置誤差が最も悪かったことがわかります (自動 GCP なし:31.6mm、自動 GCP あり:28.7mm)。

表 6. Hovermap 長距離スキャンにおける GCP 点の絶対位置誤差 (mm 単位) のヒートマップ

GCP ID	Euclidean distance error (mm)	
	自動 GCP なし	自動 GCP あり
101	16.1	3.9
103	11.7	9.4
107	21.3	6.6
109	8.6	10.0
110	31.6	28.7
111	16.6	20.7
112	10.0	3.9
114	14.1	9.8
115	9.9	3.9

これらの結果は、このエリアではスキャンの精度が低いか、セクション 4.7 で説明した方法で GCP ターゲット中心が正確に推定されていないことを示しています。GCP#110 の位置で点群を検査すると、このエリアでは点密度が低く、GCP 全体の密度が均一でないことがわかりました。そのため、半自動 GCP 中心検出ワークフローでは、中心を正確に検出できませんでした。ペアワイズ距離メトリクスから GCP#110 を削除することで、表 7 の最後の行に示すように、長距離スキャンの結果は改善されました。この変更により、自動 GCP ワークフローを使用した場合と使用しなかった場合の両方で、長距離スキャンが最高のパフォーマンスを示しました。自動 GCP ワークフローを使用した場合、平均誤差は $3.9\text{mm} \pm 2.1\text{mm}$ に減少しました。

表 7. GCP#110 を削除した Hovermap 長距離スキャンのペアごとの距離誤差 (下段)。

スキャンの種類	自動 GCP なし					自動 GCP あり				
	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
ST-X 高速	0.4	23.8	7.7	10.2	± 6.2	0.2	11.5	3.0	4.2	± 3.0
ST-X 標準	0.5	25.9	7.7	10.3	± 6.6	0.2	11.4	3.0	4.4	± 3.1
ST-X 長距離	0.7	38.6	6.7	10.2	± 9.9	0.1	38.0	4.4	7.6	± 9.1
ST-X 長距離 GCP110 番なし	0.7	16.8	5.3	6.8	± 4.1	0.1	8.7	3.0	3.9	± 2.1

5 他社製スキャナーの結果

5.1 はじめに

本章では、USIBD スキャナー比較イベントに参加した他のスキャナーの結果を紹介し、これらの結果を Hovermap の結果と比較します。イベントの参加者として、エメセントは、他の参加者がキャプチャーして評価のために提出したデータセットにアクセスすることができました。すべてのデータセットは、スキャナーメーカーの代表者によって同じ条件でキャプチャーされ、データを処理して主催者に結果を提出するのに十分な時間が与えられました (通常適用されるデータの後処理、クリーニングなどを含む)。各メーカーは、比較のために良い結果を出すために最善の努力をしたものと思われます。従って、提出された結果は、ユーザーエラーはなく、このような環境におけるスキャナーの可能な限り最良の結果を表しているものと考えられます。

5.2 評価方法

全てのデータセットで一貫した比較を行う為、すべてのデータセットを同じ方法で解析するよう最善の努力を払いました。一貫した評価を行うためには、すべてのデータセットが同じエリアをカバーし、USIBD チームによって提供されたコントロールポイントにジオリファレンスされていることが理想的です (ジオリファレンスはスキャナーメーカーによって行われました)。データセットの中には、より狭い範囲をカバーするものもあれば、地理参照されていない (あるいは正しく地理参照されていない) ものもあります。

このような場合、評価の最初のステップは、CloudCompare で GCP 中心に手動でポイントを検出し、ICP ベースの登録ツールを適用してジオリファレンスを実行します。データセットを一貫性のある正確な方法でジオリファレンスするために最善の努力を払いましたが、これはグローバル正確度の結果に影響を与える可能性のある潜在的なエラーの原因となることを認識しています。

5.3 他社製スキャナーのデータセットに関するコメント

以下では、一貫した評価ワークフローを実行する能力に影響を与えた、他のメーカーから提出されたデータセットのいくつかの特徴についてコメントを記載します。

5.3.1 Exyn 製 Nexys

Exyn 社は Nexys スキャナーと Nexys Pro スキャナー（それぞれ Velodyne LiDAR と Hesai LiDAR を使用）のデータセットを提出しました。この評価では、Nexys Pro の結果のみを掲載しています。

Nexys Pro のスキャンは Riegl のスキャンにジオリファレンスされていましたが、データには強度や RGB 属性が含まれていなかったため、GCP は見えませんでした。そのため、GCP の中心をピックアップしてスキャン精度の評価を行うことはできませんでした。しかし、断面評価は行うことができました。

5.3.2 Faro 製 Focus

提出された Faro Focus データセットは Riegl スキャンに正しくジオリファレンスされていなかったため、評価のために CloudCompare でジオリファレンスが行われました。データには RGB 属性は含まれていましたが、反射強度は含まれていませんでした。いくつかの GCP ターゲットには大きなジオリファレンスエラーがありました。よく調べてみると、これらの地域では RGB データが LiDAR データにうまく投影されていないことがわかりました。そのため、RGB で表示された中心ではなく、真のターゲット中心を選ぶことが最善の試みでした。

Faro Focus スキャナーには「フラッシュ」スキャンをキャプチャーするオプションがありますが、スキャナーコンテストのデータキャプチャ中にこの機能が使用されたかどうかは不明です。

5.3.3 Faro 製 Orbis

Faro Orbis には「フラッシュ」スキャンのオプションもあるが、イベント中に使用されたかどうかは不明です。

提出された Faro Orbis データセットは、Riegl スキャンに正しくジオリファレンスされていなかったため、評価のために CloudCompare でジオリファレンスが行われました。このスキャンはコンペティションのエリアのほんの一部しかカバーしていないため、スキャンの取り込みと処理時間を他のスキャンと直接比較することはできません。このことは、ペアワイズ距離誤差の統計値を確認する際にも考慮されるべきです。一般的に、より小さなエリアでは結果が良くなるため、他社製品よりも不当に有利になります。

5.3.4 Gexcel 製 Heron

Gexcel Heron のスキャンでは、床に著しい「反り」が見受けられたため、(スキャンの一端で 2.8m の高さ誤差、5.6.1 項参照)、精度評価から除外しました。

5.3.5 NavVis 製 VLX3

提出された NavVis データセットは Riegl スキャンに正しくジオリファレンスされていなかったため、評価のために CloudCompare でジオリファレンスが行われました。

5.3.6 GreenValley 製 LiGrip

GreenValley LiGrip のスキャンは広い範囲をカバーしましたが、点群の品質が悪過ぎたため、GCP ポイントを確実に特定できない場所も有りました。9 つの GCP のうち 6 つしか特定出来ませんでした。

以下の表 8 は、スキャナー・データセットの概要と、メーカーから納品された状態に関するメモです。

図 8 は、各スキャナーがカバーする相対的なエリアを示しております。

表 8. データセットの概要

Scanner	Scan Time (mins)	Processing Time (hh:mm)	Georeferenced by manufacturer?	Geo-referenced in CloudCompare by Emesent?	CloudCompare geo-referencing RMSE (m)	Complete coverage?	GCPs visible?	No of GCPs
Hovermap Fast scan	5	0:15	Yes			Yes	Yes	9
Hovermap Standard scan	20	0:46	Yes			Yes	Yes	9
Hovermap Long scan	32	2:00	Yes			Yes	Yes	9
Exyn Nexys Pro	22	0:18	Yes			Yes	No	0
Faro Focus	90	1:30	No	Yes	0.04317	Yes	Yes	9
Faro Orbis	17*	2:00*	No	Yes	0.03652	No	Yes	5
Gexcel Heron Twin	67	4:30	No	No		Yes	Yes	9
GreenValley LiGrip H300	16	0:30	Yes			Yes	Yes	6
NavVis VLX3	66	11:00	No	Yes	0.03415	Yes	Yes	9
Riegl VZ600i	126	0:15	Yes			Yes	Yes	9
Z&F 5015 TLS	120	0:40	Yes			No	Yes	4

*スキャン領域は他のスキャンよりかなり小さい - 図 8 参照

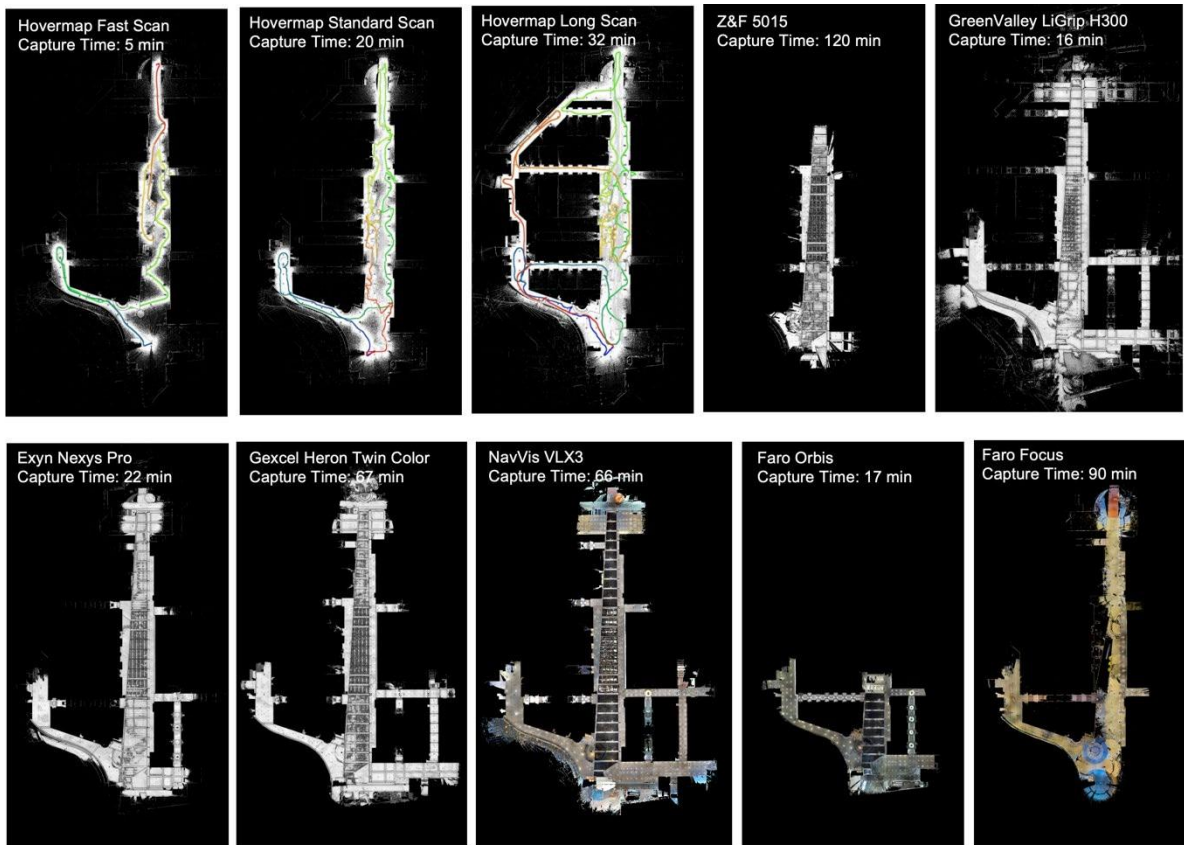


図 8. カバーエリアを示す全スキャンのトップダウン図

5.4 結果

5.4.1 データ取得と処理の時間

表 8 の 2 列目と 3 列目は、データセットの取得と処理に要した時間を示しています。イベント中、コンベンション・センターのどのエリアをキャプチャーすべきか混乱が有りました。図 8 のように、メイン通路の右側の通路をカバーできるスキャンもあれば、そうではないスキャンもあります。一部のスキャン（ファロ・オルビスや Z&F など）は、より狭い範囲をカバーしています。すべてのスキャンが同じエリアをカバーしている訳ではない為、キャプチャーと処理時間についてすべてのスキャンを直接比較することはできません。しかし、一般的に SLAM ベースのシステムは TLS システムよりもキャプチャー時間が速いことは明らかです。Hovermap の高速スキャンが最も短いキャプチャー時間（5 分）であったのに対し、Z&F 5015 TLS は、全エリアをキャプチャーしていないにもかかわらず、最も長時間（2 時間）です。2 番目にキャプチャー時間が速かったのは GreenValley LiGrip で、Hovermap の高速スキャンよりも広いエリアを 16 分でカバーしました。SLAM ベースのシステムの処理時間が長い為、成果物までの時間が全体的に長くなるケースも有ります。（例えば、NavVis VLX3 は 11 時間）。

5.4.2 絶対位置誤差

セクション 4.9.1 の評価に従い、各 GCP と対応するグラウンド・トゥルス点の間のユークリッド距離が計算されました。表 9 はこれらのユークリッド距離から得られた統計量を示し、図 9 は箱ひげ図（Box and Whisker Plot）でグラフ化したものです。セクション 5.4.2 の Hovermap の結果を、他のスキャナーと比較できるように、下記の表と図にもそのまま記載しました。

表 9. 全スキャナーでの絶対位置誤差

Hovermap ST-X	自動 GCP なし				
	Min (mm)	Max (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	RMSE (mm)
ST-X 高速スキャン	12.9	21.2	15.9	± 3.0	16.2
ST-X 標準スキャン	9.2	25.8	17.3	± 6.4	18.3
ST-X 長距離スキャン	8.6	31.6	15.5	± 7.2	17.0
Hovermap ST-X	自動 GCP あり				
	Min (mm)	Max (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	RMSE (mm)
ST-X 高速スキャン	2.1	9.7	6.1	± 2.2	6.4
ST-X 標準スキャン	2.9	18.7	8.5	± 4.6	9.6
ST-X 長距離スキャン	3.9	28.7	10.8	± 8.5	13.4
他社スキャナー	Min (mm)	Max (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)	RMSE (mm)
NavVis VLX3	13.8	53.3	32.6	± 13.5	35.0
GreenValley LiGrip H300	8.8	100.9	49.8	± 34.8	59.1
Faro Orbis	9.5	55.6	34.0	± 16.9	37.2
Faro Focus	8.3	74.6	34.5	± 21.6	40.1
Z&F 5015	3.8	55.8	21.3	± 23.7	29.6

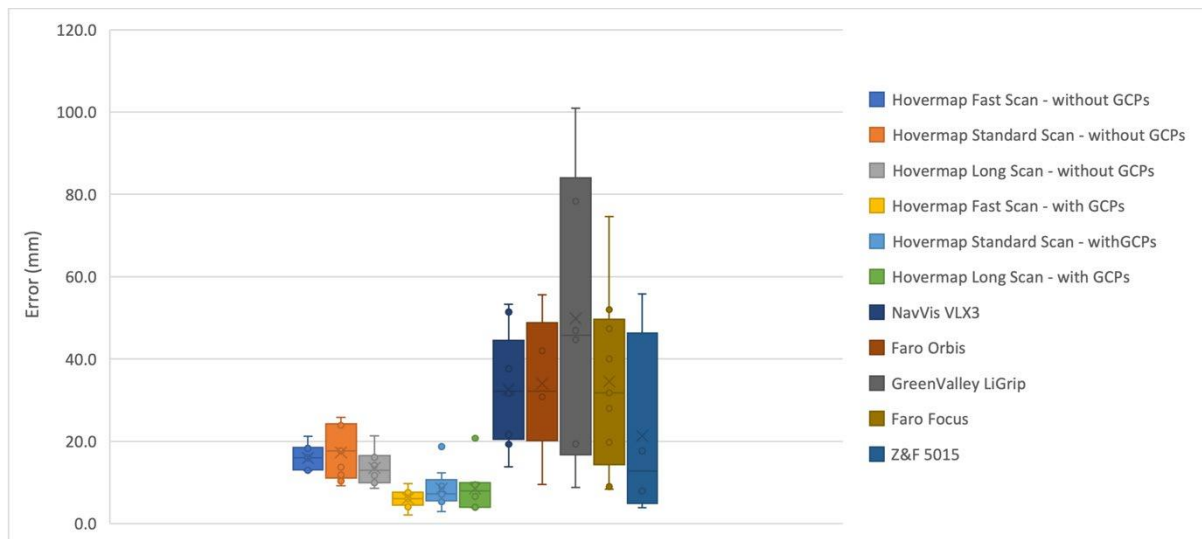


図 9. 全スキャナーの絶対位置誤差の箱ひげ図

5.4.3 Pair-Wise Distance Errors

セクション 5.4.3 で説明した評価と同様に、スキャン内の GCP 点のペア間のユークリッド距離を計算し、グラウンド・トゥルース GCP 点間の同じ測定値と比較しました。結果は表 10 と図 10 です。

いくつかのスキャンは、より狭いエリアを取得していたり、すべての GCP を配置できなかつたりしたため (Faro Orbis、Z&F、GreenValley)、9 点の GCP 全部が含まれているわけではありません。表 10 の 2 列目は、各スキャンで測定されたペア間の最大距離を示しています。通常、距離が長いほど誤差が大きくなるため、今回の評価では、より狭い範囲をカバーするスキャナーが有利でした。

表 10. 全スキャナーでの対距離 (ペアワイズ距離) の誤差

Hovermap ST-X	点間の最大 距離 (m)	自動 GCP なし				
		Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
ST-X 高速スキャン	269.5	0.4	23.8	7.7	10.2	± 6.2
ST-X 標準スキャン	269.5	0.5	25.9	7.7	10.3	± 6.6
ST-X 長距離スキャン	269.5	0.7	38.6	6.7	10.2	± 9.9
ST-X 長距離スキャン GCP110 番なし	269.5	0.7	16.8	5.3	6.8	± 4.1
自動 GCP あり						
Hovermap ST-X	点間の最大 距離 (m)	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
		Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
ST-X 高速スキャン	269.5	0.2	11.5	3.0	4.2	± 3.0
ST-X 標準スキャン	269.5	0.2	11.4	3.0	4.4	± 3.1
ST-X 長距離スキャン	269.5	0.1	38.0	4.4	7.6	± 9.1
ST-X 長距離スキャン GCP110 番なし	269.5	0.1	8.7	3.0	3.9	± 2.1
他社スキャナー						
他社スキャナー	点間の最大 距離 (m)	Min (mm)	Max (mm)	Mean (mm)	Ave (mm)	Std. dev. (mm)
NavVis VLX3	269.5	0.2	52.2	14.5	21.5	± 14.2
Faro Orbis	113.9*	3.1	71.3	16.4	25.2	± 24.0
GreenValley LiGrip H300	207.5	2.3	109.0	18.5	35.3	± 35.8
Faro Focus	269.5	0.2	28.2	4.8	9.0	± 8.4
Z&F 5015	109.4*	0.5	24.0	6.7	12.3	± 10.3

*これらのスキャナーは狭いエリアをカバーしたため、評価において有利です。

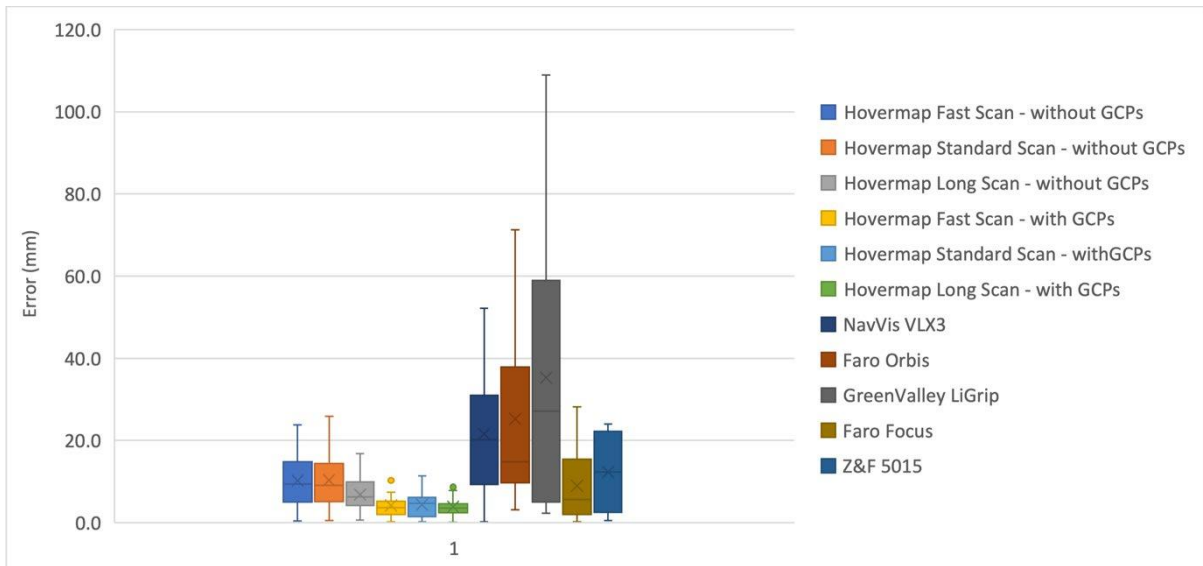


図 10. 全スキャナーの距離誤差の箱ひげ図

5.5 結果について

5.5.1 絶対位置誤差

表 9 と図 9 からわかるように、Hovermap は、自動 GCP ワークフローを使用した場合と使用しなかった場合の両方で、平均絶対位置誤差の点で他のすべてのスキャナーよりも優れた結果を示しました。ループ閉合と自動 GCP を使用しない高速スキャンでさえ、他のスキャナーよりも良好な結果になりました（ $15.9 \pm 3\text{mm}$ に対し、他のスキャナーの中で最も良好な結果を示した Z&F 5015 は $21.3 \pm 23.7\text{mm}$ でした）。自動 GCP ワークフローを含めると、Hovermap は他のスキャナーよりも有意に良好な結果を示しました（高速スキャンで $6.1 \pm 2.2\text{mm}$ ）。Hovermap 以外の SLAM ベースのスキャナーの中では、NavVis VLX3 が最も良好な結果を示しました（ $32.6 \pm 13.5\text{mm}$ ）。

5.5.2 対距離（ペアワイズ距離）誤差

表 10 と図 10 からわかるように、自動 GCP ワークフローを使用しなかった場合でも、Hovermap は Z&F 5015 を除く他のすべてのスキャナーよりも優れた性能を示しました。自動 GCP ワークフローを使用した場合、Hovermap は全スキャナーの中で最も良好な結果を示しました（長距離スキャンの平均誤差は $3.9 \pm 2.1\text{mm}$ であったのに対し、Z&F は $9.0 \pm 8.4\text{mm}$ であり、他のスキャナーの中で最も良好な結果を示しました）。

5.6 断面比較

更なる評価として、スキャンした断面をキャプチャーし、グラウンド・トゥルースのリーグル・スキャンと比較しました。主通路の長さに沿った垂直断面と水平断面を取得しました。図 11 は、スキャン全体に対する断面（紫色）を示しています。各断面の深さ/幅は 10cm です。

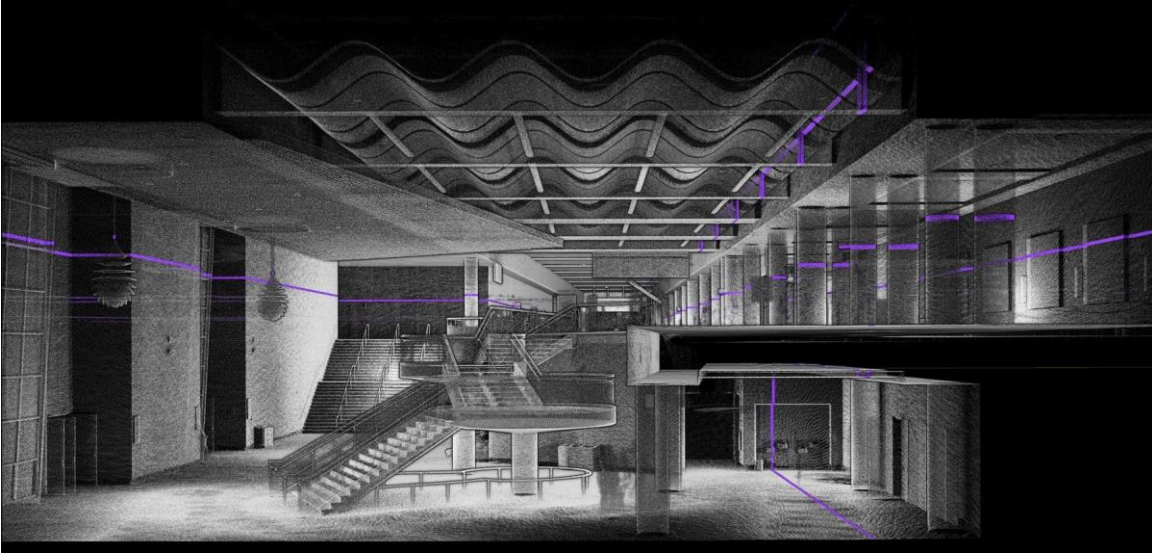


図 11. 水平断面および垂直断面の位置 (紫色で表示)

5.6.1 垂直断面

垂直断面の比較は、通路の長さに沿って3カ所(両端と中央1カ所)で行いました。図 12 は、垂直断面の概要と比較を行った場所を示しています。場所 1a では一部のスキャンで良好な網羅率が得られなかったため、代替の場所(場所 1b)を比較に使用しました。Faro Orbis スキャンは、以下の2つの場所をカバーできていませんでした。

図 13 は、各スキャンと場所の詳細断面図の表です。断面の画像は、図中で「異なる縮尺」と表示されているものを除き、CloudCompare を使用して一貫した縮尺で取り込まれました。各スキャンと Riegl 基準スキャンの間の断面測定は CloudCompare で行いました。比較のため、測定値の垂直成分が図に示されています。比較のため、3つの Hovermap スキャンのうち1つのみが含まれています(自動 GCP ワークフローを適用した「標準」スキャン)。

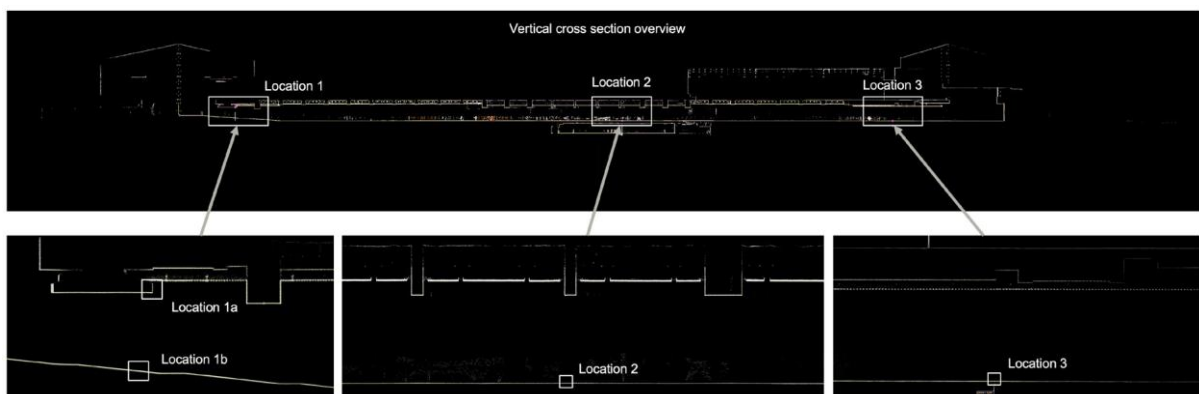


図 12. 垂直断面の概要(上)と比較箇所の拡大図(下)。



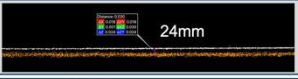
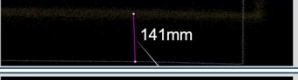
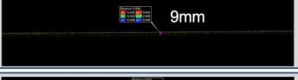
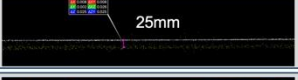



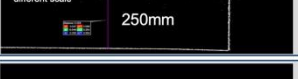
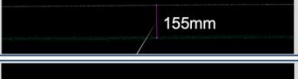



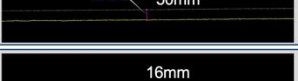
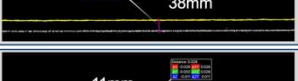

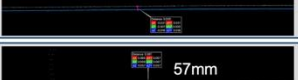
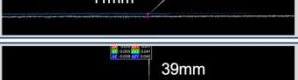
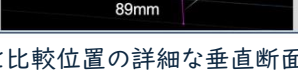
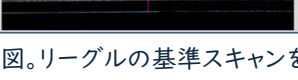
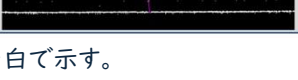
	Location 1	Location 2	Location 3	Average Deviation
Hovermap ST-X (Standard scan with auto GCP)	 40mm	 8mm	 24mm	24mm
Exyn Nexys Pro	 141mm	 9mm	 25mm	58mm
Gexcel Heron Twin	 2.8m different scale	 24mm	 88cm different scale	1235mm
GreenValley LiGrip H300	 250mm different scale	 155mm	 67mm	157mm
Faro Orbis	Area not covered	Area not covered	 32mm	32mm
NavVis VLX3	 78mm	 50mm	 38mm	55mm
Z&F 5015	 37mm	 16mm	 11mm	21mm
Faro Focus	 89mm	 57mm	 39mm	62mm

図 13. 各スキャンと比較位置の詳細な垂直断面図。リーグルの基準スキャンを白で示す。

5.6.2 垂直断面比較結果の考察

図 13 は、スキャナーの性能に大きなばらつきがあることを示しています。いくつかのスキャンは、ある場所ではうまくアライメントされましたが、他の場所では基準スキャンからずれていました。Z&F スキャンの性能が最も高く（3カ所の平均偏差が 21mm と最も小さい）、Hovermap スキャンの性能が 2 番目に高く（平均偏差 24mm）、SLAM ベースのスキャナーの中で最も優れていた。SLAM ベースのスキャナーの 2 位と 3 位は、それぞれ NavVis (55mm) と Exyn (58mm) でした。

特に注目すべきは、Gexcel スキャン性能の低さであり、通路の終点で大きなズレが生じています（1 地点で 2.8m、3 地点で 88cm）。このスキャンは、基準スキャンに比べて端が反り返っています。これは、性能の低い SLAM ベースのシステムが長距離にわたって垂直方向のドリフトを起こす可能性があることを強調しています。NavVis スキャンも弓なりですが程度は小さいです。

5.6.3 水平断面

水平断面は、通路の長さに沿って 6 箇所（3つのコーナーと 3つの柱）で比較されました。図 14 は、水平断面の概要と比較を行った場所を示しています。

図 15 はコーナー断面の詳細断面図の表で、図 16 はコラム断面図です。断面測定は、CloudCompare を使用して、各スキャンと Riegl 基準スキャンの間で行われました。断面結果の要約を表 11 に示します。

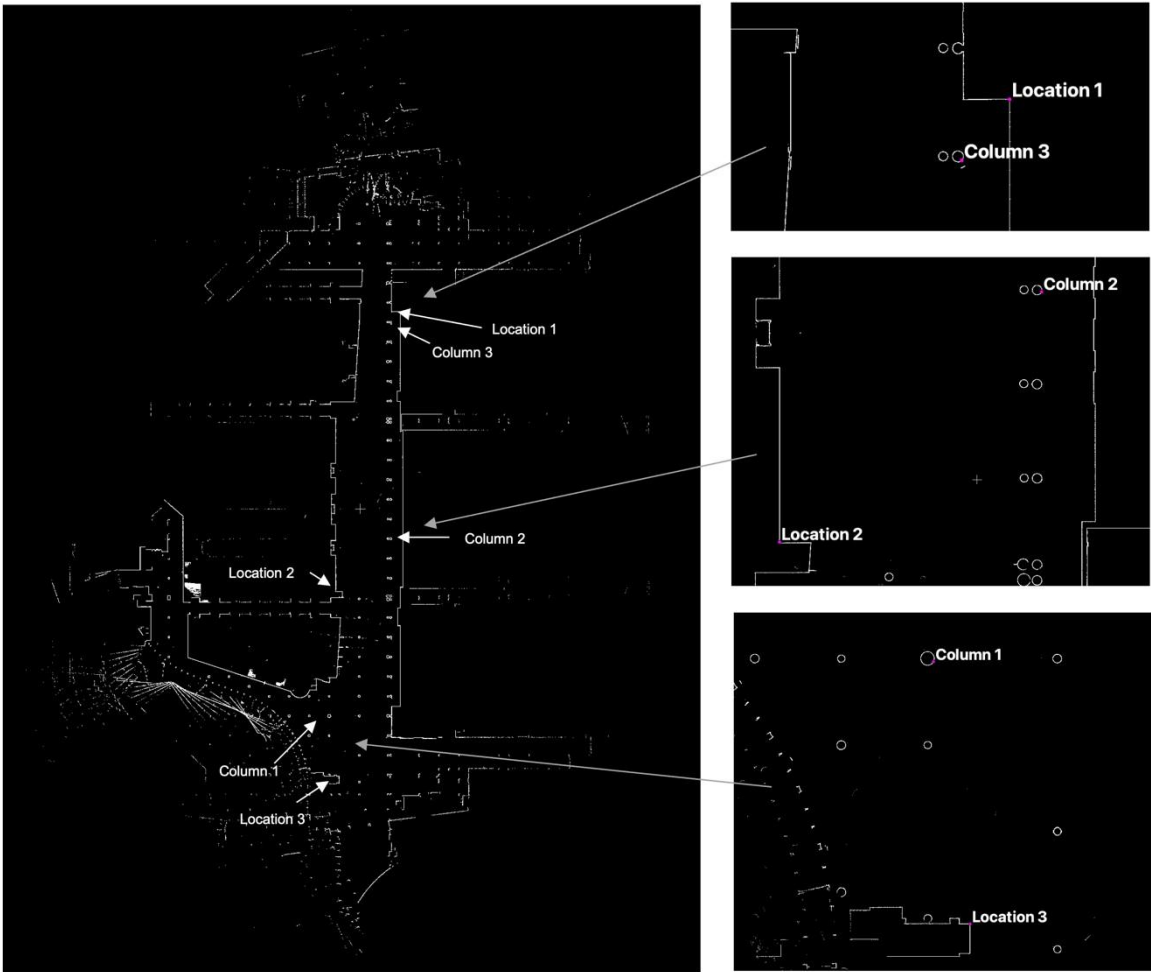


図 14. 水平断面の評価の場所

	Location 1	Location 2	Location 3	Average Deviation
Hovermap ST-X (Standard scan with auto GCP)	13mm	21mm	13mm	16mm
Exyn Nexys Pro	33mm	15mm	19mm	22mm
Gexcel Heron Twin	19mm	14mm	47mm	27mm
GreenValley LiGrip H300	16mm	26mm	16mm	19mm
Faro Orbis	Area not covered	Area not covered	17mm	17mm
NavVis VLX3	23mm	4mm	19mm	15mm
Z&F 5015	11mm	3mm	6mm	7mm
Faro Focus	7mm	8mm	8mm	8mm

図 15. 各スキャンと比較位置の詳細水平断面図。リーグルの基準スキャンを白で示す。

	Column 1	Column 2	Column 3	Average Deviation
Hovermap ST-X (Standard scan with auto GCP)	6mm	11mm	13mm	10mm
Exyn Nexys Pro	24mm	12mm	11mm	16mm
Gexcel Heron Twin	26mm	18mm	51mm	32mm
GreenValley LiGrip H300	13mm	65mm	66mm	48mm
Faro Orbis	Area not covered	Area not covered	43mm	43mm
NavVis VLX3	29mm	10mm	15mm	18mm
Z&F 5015	Area not covered	2mm	7mm	5mm
Faro Focus	14mm	12mm	9mm	12mm

図 16. 各スキャンと比較位置の詳細な柱断面図。リーグルの基準スキャンを白で示す。

表 11. 断面比較結果の要約

Scanner	Vertical (mm)	Horizontal Corners (mm)	Horizontal Columns (mm)	Average Horizontal (mm)	Average all (mm)
Hovermap ST-X	24	16	10	13	15
Exyn Nexys Pro	58	22	16	19	29
Gexcel Heron Twin Color	1235	27	32	29	388
GreenValley LiGrip H300	157	19	48	34	67
Faro Orbis	32	17	43	30	23
NavVis VLX3	55	15	18	17	27
Z&F 5015 TLS	21	7	5	6	10
Faro Focus	62	8	12	10	24

5.6.4 水平断面比較結果の考察

図 15 と図 16 は、コーナー断面と柱断面が同じような場所であったため、同じようなパターンを示しています。垂直断面に比べてスキャナー間のばらつきが少なく、全体的にグラウンド・トゥルースからのズレは垂直断面よりも小さくなっています。

2 つの TLS スキャナーは、全体的に最も良い結果を示しました(全 6 箇所の平均偏差は、Z&F が 6mm、Faro Focus が 10mm)。Hovermap は、SLAM ベースのスキャナーの中で最も良い結果を

示しました(全 6 箇所の平均偏差は 13mm)。2 位と 3 位は NavVis VLX3 と Exyn Nexys Pro (平均偏差はそれぞれ 17mm と 19mm)。

断面図の結果とセクション 5.4 の精度の結果には食い違いがあります。絶対位置精度の評価の方が断面精度の評価よりもスキャナーの性能が優れている場合もあれば(例えば、GCP を使用した Hovermap 標準スキャンの平均精度誤差は 8.5mm でしたが、平均断面誤差は 15mm でした)、逆の傾向のスキャナーもあります(例えば、Z&F の平均精度誤差は 21.3mm でしたが、平均断面誤差は 10mm でした)。ほとんどの場合(Hovermap と GreenValley を除く)、断面誤差は絶対位置誤差よりも優れていました。これは、GCP 位置に対する断面の位置によるものと思われます。GCP は基準となる Riegl スキャンにスキャンを合わせるために使用されたので、GCP の近傍が最もフィットすると予想されます。断面は GCP と同じ位置でキャプチャーされたわけではないので、結果に多少のずれが生じることが予想されます。

6 結論

本稿では Hovermap のような SLAM ベースの LiDAR マッピングシステムによって生成されるデータの品質に影響を与える様々な要因を紹介しました。いくつかの要因は Hovermap に特有のものではありませんが (LiDAR パックの回転など)、多くの要因は Hovermap に特有のもので (Emesent の SLAM 実装など)。これらすべての要素を統合することで、Hovermap は (精度と再現性だけでなく、ローカルおよびグローバルな正確度においても) 高品質のデータを生成することができます。また、Hovermap がロバスト性の高い SLAM ベースのソリューションであり、SLAM ベースのシステムにとって伝統的に困難な環境であっても、様々な環境、様々なキャプチャー技術で高品質の結果を生成できることを保証しています。

データ品質の主張を定量化するために、我々は第三者 (USIBD) が企画・運営する LiDAR スキャナー評価イベントの結果を発表しました。Hovermap によって同じ環境で撮影された 3 つの異なるスキャンの結果を比較することで、Hovermap が Riegl VZ-600i TLS スキャナーによって撮影された基準スキャンに対して良好なパフォーマンスを示すことを示しました。Emesent の Aura ソフトウェアで 2 つの Hovermap データ処理ワークフロー (半自動 GCP 機能あり、なし) の結果を比較することにより、GCP ワークフローが Hovermap の結果の精度を向上させることを示しました。

GCP を使用せずに、Hovermap による標準的なスキャン (歩行速度、ループ閉合、ある地点で開始と終了) を実行した結果、平均グローバル正確度は $17.3\text{mm} \pm 6.4\text{mm}$ 、平均 2 点間距離誤差は $10.3\text{mm} \pm 6.6\text{mm}$ でした。GCP ワークフローを使用した場合、これらの結果は、グローバル正確度が $8.5\text{mm} \pm 4.6\text{mm}$ 、対距離 (ペアワイズ距離) 誤差が $4.4\text{mm} \pm 3.1\text{mm}$ に改善されました。

驚くべきことに、Hovermap でジョギングしながらオープンループ・スキャン (開始位置と終了位置が異なる) を行うと、さらに良い結果が得られました。GCP を使用した高速スキャンでは、平均 $15.9\text{mm} \pm 3.0\text{mm}$ のグローバル正確度が得られ、GCP を使用しない場合の平均 2 点間距離誤差は $10.2\text{mm} \pm 6.2\text{mm}$ でした。GCP ワークフローを使用した場合、これらの結果は、グローバル正確度が $6.1\text{mm} \pm 2.2\text{mm}$ 、1 対の距離誤差が $4.2\text{mm} \pm 3.0\text{mm}$ に改善されました。

の中心がうまく検出されなかったため、評価から 110 番の GCP を削除した後)、よりループを閉じてより長いスキャンを行うことで、最良の結果が得られました。この結果、GCP なしでの平均グローバル正確度は $13.5\text{mm} \pm 4.3\text{mm}$ 、平均ペアワイズ距離誤差は $6.8\text{mm} \pm 4.1\text{mm}$ となりました。GCP ワークフローを使用した場合、これらの結果は、グローバル正確度が $8.5\text{mm} \pm 5.6\text{mm}$ 、対距離誤差が $3.9\text{mm} \pm 2.1\text{mm}$ に改善された。

異なる方法でキャプチャーされたこれらの結果が類似していることは、Hovermap スキャンの再現性を証明しています。キャプチャー速度やループ閉合の程度が異なっても、このタイプや規模の環境では結果にほとんど影響しません。GCP ワークフローを使用した場合、3 つのスキャンすべてにおいて、グローバル正確度が 10mm 未満、対距離誤差が 5mm 未満であったことは、この種の環境において Hovermap に期待できる精度を示しています。

他のスキャナーの評価から、SLAM ベースのシステムには大きな性能差があり得ること、そして SLAM ベースのシステムは TLS システムと比べてグローバル正確度の点で優れた性能を発揮できることが示されました。実際、ループを閉じずに Hovermap でジョギングした場合でも、2 つの TLS システムよりも優れたグローバル正確度と対距離誤差が小さいという結果が得られました。

この評価の限界は、イベント参加者のスキャンのうち 1 つをグラウンド・トゥルースとして使用したことです (Riegl のスキャン)。独立したグラウンド・トゥルースのデータがあればより良かったのですが、Riegl VZ-600i はこのような環境でも十分に正確な結果を出すことができます。もし Riegl スキャンに大きな誤差があれば、他のすべての結果に一貫した悪い結果となって表れていたと思われる。そのようなことはなかったため、Riegl スキャンは評価のための有効なグラウンド・トゥルースを生成したと考えられます。

更なる限界は、他のメーカー (NavVis、Faro) から提供されたスキャンの一部をジオリファレンスする必要があったことです。一貫性のある正確なジオリファレンスが行われるよう最善の努力を払いましたが、その結果、これらのメーカーが管理していない変数が発生しました。これは絶対位置精度と断面評価の結果に影響を与えたかもしれませんが、(ジオリファレンスに依存しないため) 対距離誤差評価には影響しなかったといえます。

これらの限界にもかかわらず、我々はこの分析から引き出される貴重で有効な洞察があると信じており、この評価は、セクション 3 に列挙された要因が、Hovermap が実際に質の高い結果を生み出すという主張を支持する証拠を提供しています。

7 参考文献

- Hudson, N., Talbot, F., Cox, M., Williams, J., Hines, T., Pitt, A., . . . Catt. (2021). Heterogeneous Ground and Air Platforms, Homogeneous Sensing: Team CSIRO Data61's Approach to the DARPA Subterranean Challenge.
- Orion Spatial Solutions. (2024, July 1). Wacol Emesent MLS Range - Results Summary. Retrieved from <https://4999118.hs-sites.com/en/knowledge/vehicle-rtk-accuracyreport-orion-spatial-solutions>

- Ramezani, M., Catt, G., Khosoussi, K., Pauling, F., & Moghadam, P. (n.d.). CSIRO-Wildcat: HILIT SLAM CHALLENGE 2022. 2022.
- Ramezani, M., Khosoussi, K., Catt, G., Moghadam, P., Williams, J., Borges, P., . . . Kottege, N. (2022). Wildcat: Online Continuous-Time 3D Lidar-Inertial SLAM.



Hovermap 精度レポート

お問い合わせ先：

株式会社シーズプロジェクト

〒422-8054

静岡県静岡市駿河区南安倍3丁目13-5

mail ; y.otaka@seeds-pro.co.jp

HP URL ; <http://www.seeds-pro.co.jp/>

Emesent について

オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) における 10 年にわたる先駆的な研究を基盤に、エメセント社は特に GPS が使えない厳しい環境向けに設計された最先端の自律 SLAM ベースの LiDAR マッピングとデータ分析ソリューションを提供しています。

For more information visit: <https://emesent.com>