プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発

機械システム科　主任研究員　　小　楠　進　一

増設業務を行う際にプラントの図面が必要となるが、図面が現状のプラント形状を示していないことがたびたび起こる。測定工具を用いて寸法を測定し、作図することは手間なので、レーザースキャナーが販売されているが、高価であることなどの理由から県内企業に普及していない。そこで、本研究では、代替システムである「既存設備モデリングシステム」を開発し、これを評価した。さらに、増設モデルの寸法を調整する「ホログラム合わせ」を提案し、これを評価した。

１．緒言

長崎県は、溶接・製缶を得意としており、プラントの増設業務を取り扱う企業が多い。増設業務を行う際にプラントの図面が必要となるが、増築や廃棄によって図面が現状のプラント形状を示していないことがたびたび起こる。このとき、スケールやノギスなどの測定工具を用いて寸法を測定し、作図するが、測定誤差が生じやすく、とても面倒な作業となる。

これらの問題を解決するため、設置した位置から長距離用レーザーを周囲に飛ばしてプラント形状を測定するレーザースキャナーが販売されている。しかし、(a)死角が多い室内では、設置作業が増え手間になること、(b)高所や不安定な場所および狭所では、設置自体が難しいこと、(c)レーザースキャナーが高価であることなどの理由から、県内企業に普及していない。

そこで、本研究では、上記問題の解決に向けて、図１に示す「既存設備モデリングシステム」を開発した。既存設備モデリングシステムの「移動計測式スキャンシステム」では、測定範囲は狭いが安価な RGBD　カメラを用いてプラント形状の一部を測定し、いくつかのプラント形状の一部を合成することで数十メートルのプラント形状を取得する。その後、MeshLab [1]を用いて、数十メートルのプラント形状をスケール補正する。

また、既存設備モデリングシステムは、形状合成を使用するので、１ショットで測定するレーザースキャナーと比べて生成したプラント形状の誤差が大きい。そこで、MR を活用して「ホログラム合わせ」を行い、プラント形状を用いて作成した増設モデルの誤差を軽減することにした。なお、「ホログラム合わせ」については、以下の章で詳細を説明する。

本報では、試作した「既存設備モデリングシステム」の評価結果及び「ホログラム合わせ」の評価結果を報告する。

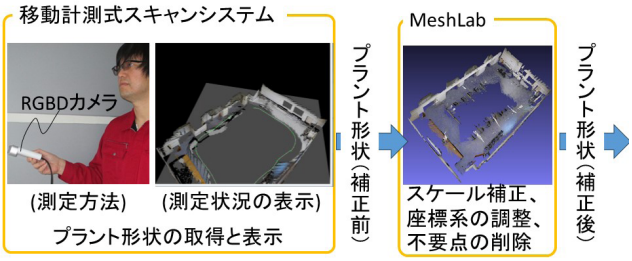

図１　既存設備モデリングシステム

２．既存設備モデリングシステム

２．１　移動計測式スキャンシステム

図２に試作した移動計測式スキャンシステムを示す。

３次元形状を測定する RGBD カメラとして、AzureKinectDK（ToF 法）、RealSenceD455（アクティブステレオ法）、ZED2（パッシブステレオ法）などが考えられるが、距離精度を求めて AzureKinectDK（ToF 法）を選択した。さらに、AzureKinectDK において、長距離測定ができ、RGB カメラとのオーバーラップ性がよい NFoV モードを選択し、ノイズを減らすために２×２ビニングを行うこととした。なお、２×２ビニングとは、個々のピクセルで読み取るのではなく、隣接するピクセルを組み合わせて一緒に読み取る手法であり、解像度を犠牲にしてノイズを減らす手法のことである。

また、形状合成ソフトウェアは、これまでに、Kinect for Windows SDK 2.0 [2]や PCL [3]を活用し、ICP（Iterative Closest Point）[4]による形状合成を行うものを試作してきた。しかし、幅７m×高さ２.６ mの壁の測定において、合成結果が歪むことがあった[5]。そこで、今回は、Qt [6]やrtabmap[7]などを活用し、グラフ最適化[8]による形状合成を行うものを試作した。図３に試作した形状合成ソフトウェアのフローチャートを示す。

図２　移動計測式スキャンシステム

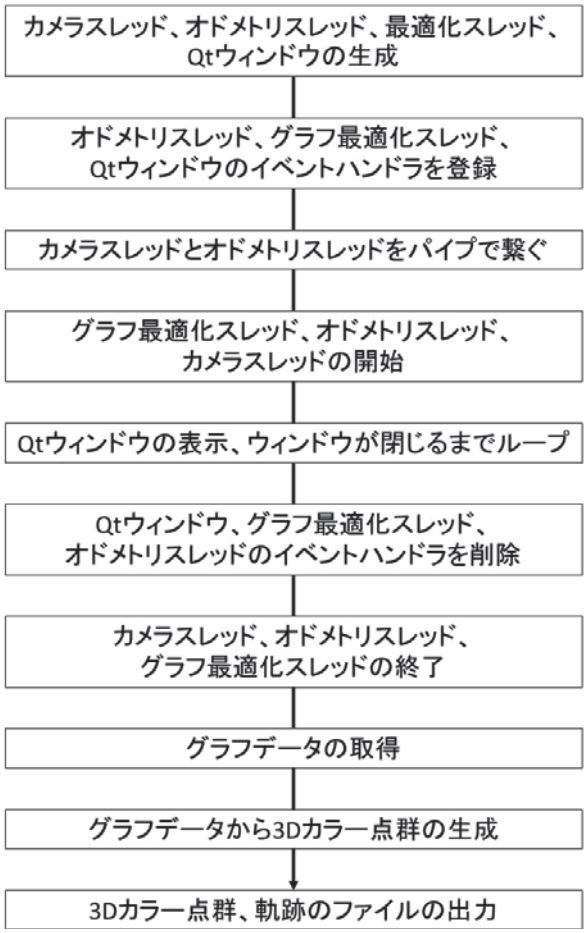

図３　形状合成ソフトウェアのフローチャート

２．２　評価方法

移動計測式スキャンシステムを評価するため、図４に示す会議室に４枚の緑色のマーカーを貼り、移動計測式スキャンシステムを用いて会議室の形状を 10 回測定し、この結果から縦方向の２点間距離 H と横方向の２点間距離 W を抽出して、校正値とするレーザー距離計の結果と比較して測定誤差を算出した。

移動計測式スキャンシステムを用いた測定にあたっては、図５に示すとおり、RGBD カメラと PC を高さ 660 mm の台車にのせ、RGBD カメラを進行方向に対して斜め 45 度に向け、図６に示す移動経路を通って測定した。

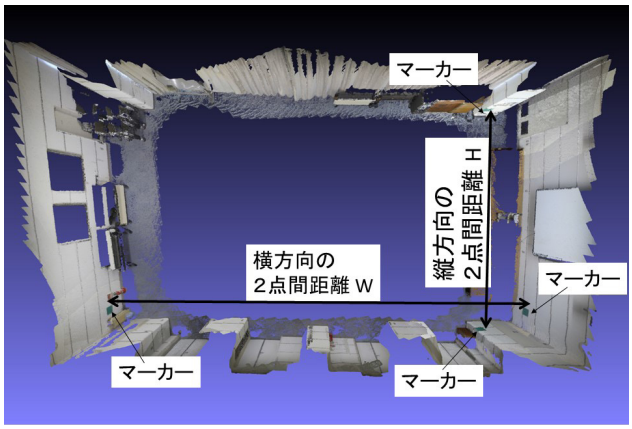

図４　移動計測式スキャンシステムが得た会議室の形状

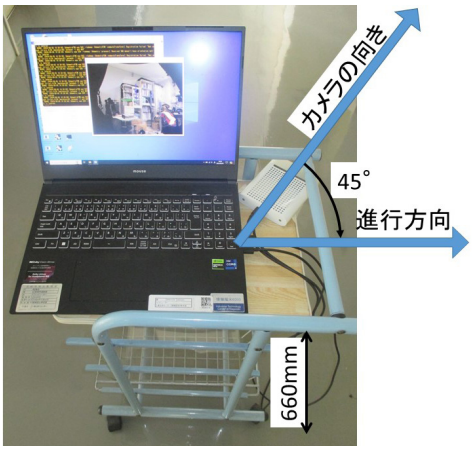

図５　カメラと PC を乗せた台車

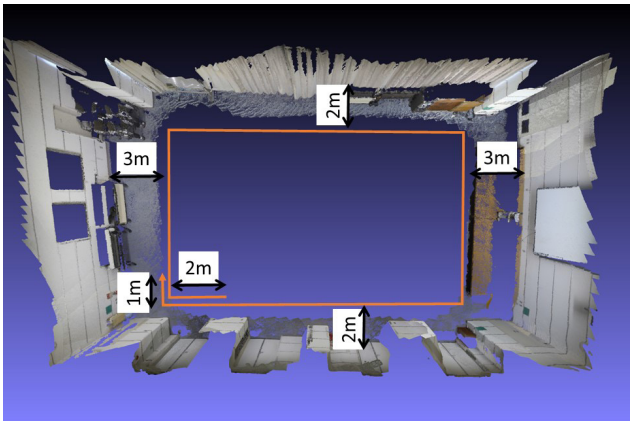

図６　台車の移動経路

なお、図６の左下の場所は、移動経路の始点と終点が重なるため、形状合成においてばらつきが大きく生じやすいと考えられる。そこで、横方向の２点間距離のばらつきを大きくするため、あえて横方向の２点間距離の１点をこの場所に選んだ。

また、既存設備モデリングシステムでは、図１に示すとおり、移動計測式スキャンシステムを用いてプラント形状を測定した後、 MeshLab を用いてプラント形状のスケールを補正する。そこで、本研究では、既存設備モデリングシステムを評価するため、レーザー距離計で得た２点間距離を用いて、移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、スケール補正に使用していない２点間距離の測定誤差を取得した。

２．３　評価結果

移動計測式スキャンシステムを用いて、縦方向の２点間距離の測定誤差と横方向の２点間距離の測定誤差を取得した結果を図７に示す。縦方向の２点間距離の最大測定誤差は　306 mm　であり、平均測定誤差は 273 mm　であり、標準偏差は 24.5 mm であった。また、横方向の２点間距離の最大測定誤差は　577 mm　であり、平均測定誤差は　463 mm　であり、標準偏差は 50.9 mm であった。

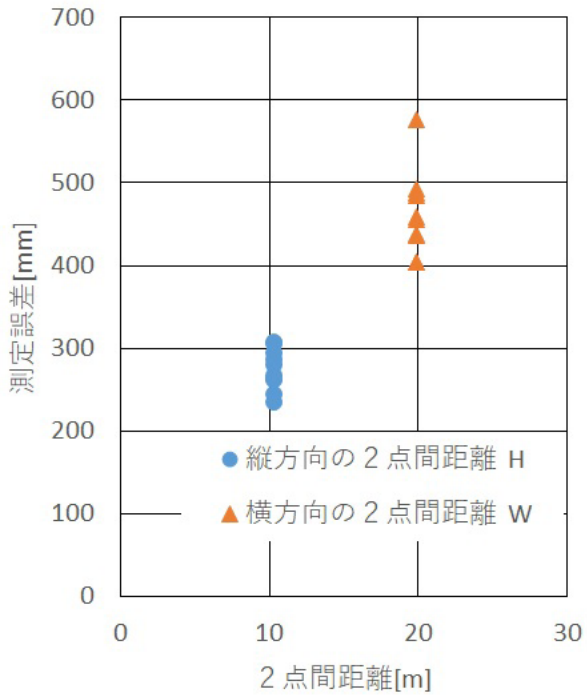

図７　移動計測式スキャンシステムの測定誤差

なお、レーザー距離計を用いて、縦方向の２点間距離 H と横方向の２点間距離 W を３回測定した結果、縦方向の２点間距離は H=10.398±0.001 m であり、横方向の２点間距離は W=19.880±0.001 m であった。

また、レーザー距離計で得た横方向の２点間距離を用いて移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、縦方向の２点間距離の測定誤差を取得した結果と、レーザー距離計で得た縦方向の２点間距離を用いて移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、横方向の２点間距離の測定誤差を取得した結果を図８に示す。

縦方向の２点間距離の最大測定誤差は 80.0 mm　であり、平均測定誤差は　29.8 mm　であり、標準偏差は 34.7 mm であった。また、横方向の２点間距離の最大測定誤差は　－151 mm であり、平均測定誤差は －56.7 mm であり、標準偏差は 66.1 mm であった。

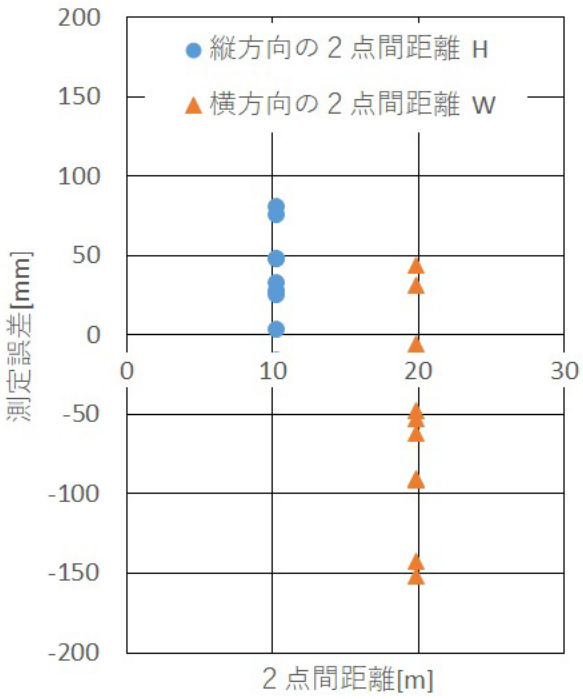

図８　既存設備モデリングシステムの測定誤差

２．４　RGBD カメラ

２．４．１　評価方法

RGBD カメラの選択と設定を評価するために、移動計測式スキャンシステムを用いて１ショットの測定を行い、JIS B7441 非接触座標測定機の受入検査及び定期検査に従って球間距離測定誤差を評価した。

評価に使用する球間距離測定用標準器は、直径 70 mm の鋼球を鉄板に接着することで作製し、球間距

離測定用標準器の校正値は、球間距離測定用標準器を十分に20±1℃の測定室に置いたうえで、㈱ミツトヨ製三次元測定機 LEGEX9106を用いて3回測定して校正値とした。

また、移動計測式スキャナーを用いた球間距離測定の際も、球間距離測定用標準器を十分に20±1℃の測定室に置き、球間距離測定用標準器に光沢消し用スプレーをかけ、測定を行った。

なお、RGBD カメラの測定位置は、図９に示す球間距離測定用標準器に対する角度θ、球間距離測定用標準器までの距離D、球間距離測定用標準器に対する高さH を変え、８地点から測定を行った。これらの水準を表１に示す。

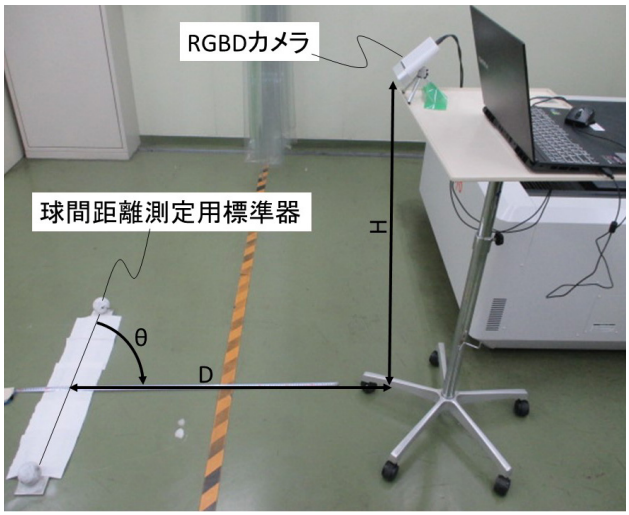

図９　RGBD カメラの測定位置を説明する図

表１　RGBD カメラの位置を示すパラメータ

項目	水準	
角度　θ［°］	90	150
距離　D［mm］	500	1,000
高さ　H［mm］	900	1,200

２．４．２　評価結果

JIS B7441　非接触座標測定機の受入検査及び定期検査に従って球間距離測定誤差を評価した結果を図１０に示す。球間距離最大誤差は 7.123 mm であり、平均誤差は 5.492 mm であり、標準偏差は1.075 mm であった。また、㈱ミツトヨ製三次元測定機 LEGEX9106 を用いて得た球間距離測定用標準器の校正値は 830.535 ±0.001mm であった。

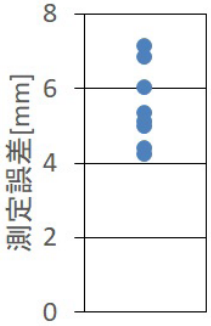

図１０　RGBD カメラの評価結果

２．５　考察

２．３節では、スケール補正により縦方向の２点間距離の最大測定誤差を 73.8%、横方向の２点間距離の最大測定誤差を 73.8%小さくできた。スケール補正が有効に働くには、どの２点間距離も同様に拡大・縮小している必要があり、①距離精度を求めて AzureKinectDK（ToF 法）を選択し、ノイズを減らすために２×２ビニングを行ったので、２．４．２項に示すとおり、１ショットの測定バラつき（標準偏差）を 1.075 mm とかなり小さくできたこと、②グラフ最適化による合成を行ったので、空間的なバラつきを抑えられたことが、スケール補正が有効に働く原因になったと考えている。なお、２×２ビニングによるノイズの減少は、図１１に示す金属円筒面の測定動画を目視評価したことにより確認できている。

なお、既存設備モデリングシステムの縦方向の２点間距離の測定精度が 0.800% であり、横方向の２点間距離の測定精度が 0.755% であるため、目標とする最低限の精度１%以下を満たすことはできた。次章では、さらなる精度向上のため、「ホログラム合わせ」による増設モデルの調整を検討した。

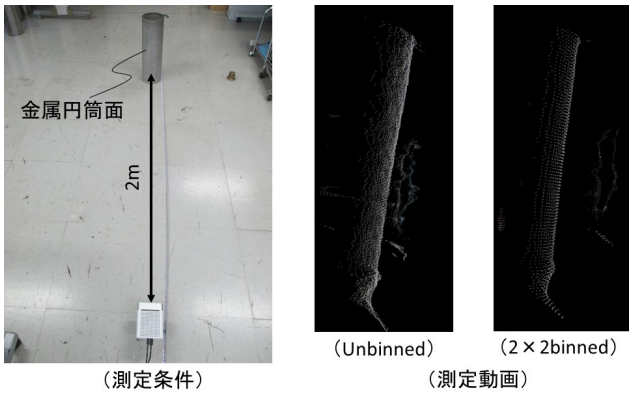

図１１　2X２ビニングの目視評価

３．ホログラム合わせ

３．１　MRを活用したホログラム合わせとは

MR とは、Mixed Reality の略であり、MR ゴーグルのディスプレイにホログラムを投影して現実空間上にホログラムを表示し、MR ゴーグルが現実空間の手の動きや環境を認識して現実空間上のホログラムに影響を与える技術のことである。この MR は、様々な活用が検討されている[9]。

本研究では、図１２に示すとおり、この MR を活用して設計した増設モデルのホログラムを生成し、現実空間でこのホログラムを用いて嵌め合わせ等を行い、増設モデルの寸法を調整することを試みた。なお、この手法を「ホログラム合わせ」と呼ぶことにする。

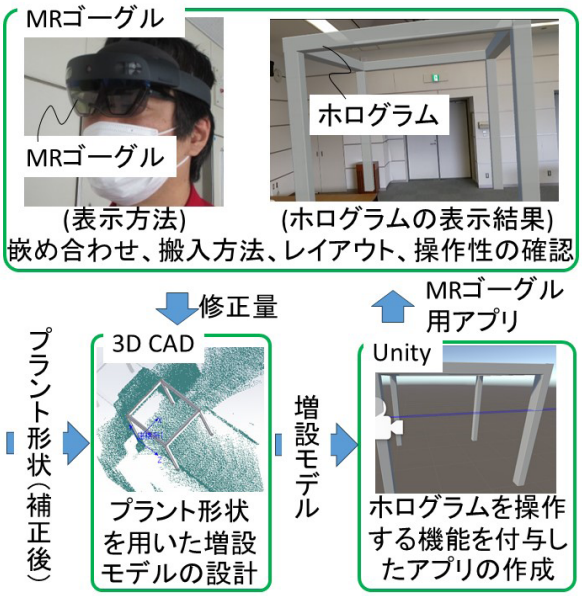

図１２　ホログラム合わせ

３．２　評価方法

「ホログラム合わせ」では、入力値どおりにホログラムを正確に表示することが課題となる。そこで、ホログラムの表示誤差を評価するために、図１３に示す直方体のホログラムを表示する MR ゴーグル用アプリを作成し、この MR ゴーグル用アプリを用いて実空間に直方体のホログラムを表示して、メジャーでホログラムの長手方向の寸法を測定することにした。

なお、MR ゴーグルは、マイクロソフトコーポレーション製Hololens2 を使用し、作成した MR ゴーグル用アプリは、長手方向の寸法（入力値）が５ｍ、10ｍ、20ｍ、30ｍ である直方体を表示し、観測者と同じ位置に直方体の端を配置し、観測者の前方に長手方向を向けるアプリにした。

また、ホログラムの表示の際は、毎回、事前にMR ゴーグルにおいて「近くのホログラムを削除」コマンドを用いて前回のホログラムを削除し、少し立ち位置を変えてホログラムを表示した。さらに、メジャーを用いた寸法測定の際は、自分に近い直方体の端にメジャーの ０ 点を置き、もう片方の端まで移動した後、片目をつぶってメジャーの目盛りを読んだ。これらの作業を各直方体に対して 13 回ずつ行い、ホログラムの表示誤差を評価した。

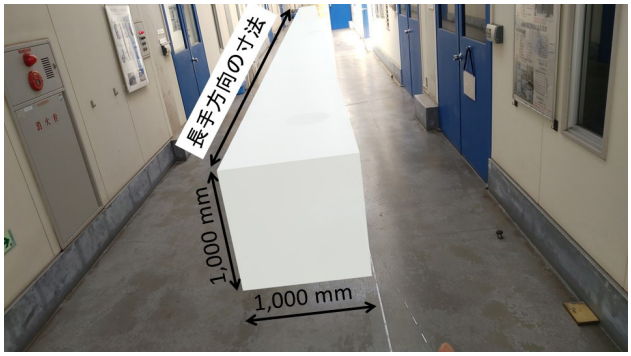

図１３　直方体のホログラム

３．３　評価結果

入力値に対するホログラムの表示誤差は、図１４のとおりであった。なお、入力値　５ｍ　の最大誤差は 14 mm であり、入力値　10ｍ の最大誤差は 28 mm　であり、入力値　20ｍ の最大誤差は　154 mm　であり、入力値　30ｍ の最大誤差は　188 mm　であった。

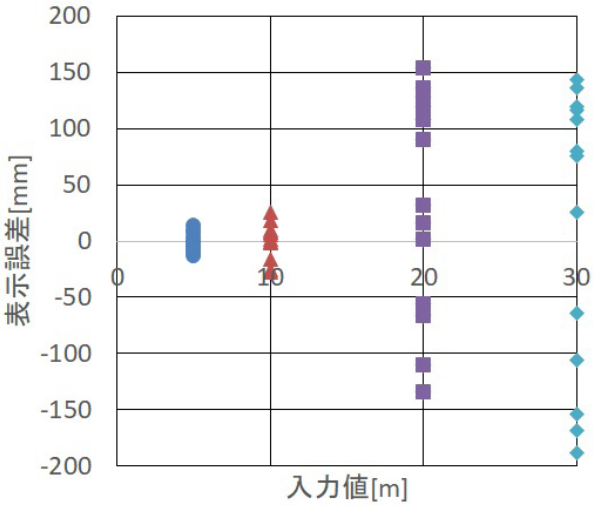

図１４　ホログラムの表示誤差

３．４　考察

３．３節のホログラムの表示誤差の結果から、10 m の最大表示誤差は 28 mm であり、２．３節の既存設備モデリングシステムの最大測定誤差が 80.0 mm であることから、10 m 以下の増設モデルに対してホログラム合わせは有効利用できると考えられるが、20 m の最大表示誤差は 154 mm と急激に大きくなっており、既存設備モデリングシステムの最大測定誤差が 151 mm であるため、20 m 以上の増設モデルに対してホログラム合わせは有効利用が難しいと考えられる。

また、一度ホログラムを測定し、この結果をもとに補正することが考えられるが、図１４に示すとおり、20 m、30 m の表示誤差の平均値は０に近く、バラつきが大きいため、補正は難しいと考えられる。

４．結言

本報では、試作した「既存設備モデリングシステム」を評価し、提案する「ホログラム合わせ」を評価した。この結果を以下にまとめる。

① RGBD カメラで得た形状をグラフ最適化によって合成し、この合成結果をリファレンスで補正する「既存設備モデリングシステム」を評価した。この結果、測定精度は0.800％であり、目標とする測定精度１％を満足することができた。

② 提案する「ホログラム合わせ」を評価した結果、10 m 以下のホログラムの場合、表示誤差は 0.28％で「既存設備モデリングシステム」の測定精度より小さいため、「既存設備モデリングシステム」の後工程として「ホログラム合わせ」を活用できそうである。しかし、20 m 以上のホログラムの場合、表示誤差が 0.77 ％と跳ね上がり、活用は難しい。

③ 今後は、開発したシステムを県内企業に提供し、各県内企業の事業に適用できるか実証試験を行う。

参考文献

[1] https://www.meshlab.net/, Acccessed 2023.

[2] R. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. Davison, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, A. Fitzgibbon, “KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking”, 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2011, Basel, Switzerland, October 26-29, 2011.

[3] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins, “3D is here: Point Cloud Library (PCL)”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 9-13, 2011.

[4] Szymon.R and Marc.L, “Efficient Variants of the ICP Algorithm”, Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, QC, Canada, pp.145-152, 28 May 2001 - 01 June 2001.

[5] 小楠進一：プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発、長崎県工業技術センター研究報告書、No.52, pp.10-12, 2023.

[6] https://github.com/qt, Acccessed 2023.

[7] https://github.com/introlab/rtabmap, Acccessed 2023.

[8] Rainer Kuemmerle, Giorgio Grisetti, Hauke Strasdat, Kurt Konolige, and Wolfram Burgard, “g2o: A General Framework for Graph Optimization”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 09-13, 2011.

[9] https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/industry-manufacturing, Acccessed 2023.