

デプスカメラを用いた TLS 点群内未計測領域の点群補完手法の開発

北海道大学 ○角 太樹, 伊達 宏昭, 金井 理

要旨

大規模環境の計測点群に存在する未計測領域は、モデリングやシミュレーションといった点群利用アプリケーションに悪影響を与える。そこで本研究は、軽量かつ持ち運びが容易なデプスカメラを用いて、TLS 点群内の未計測領域を補完する手法の開発を目的とする。本報では、点群を基準平面（地面）へ投影して得られる点群投影画像を用いた、TLS 点群とデプスカメラ計測点群の高速なレジストレーション手法を提案する。

1. はじめに

近年、地上設置型のスキャナである TLS (Terrestrial Laser Scanner) がプラント、建築、土木、測量、法廷問題などの幅広い分野で利用されつつある。モデリングなどの点群アプリケーションにおいては、環境や物体表面全体を計測した完全な点群が取得できている事が望ましいが、レーザ計測では遮蔽が原因となりスキャナから可視な領域しか計測できないため、完全な点群を得るためには複数箇所から計測した点群を統合する必要がある。しかしながら、複雑環境においては TLS による計測が困難であったり、計測そのものが不可能な箇所（煩雑な箇所、狭隘部）が存在するため、これらの箇所を容易に計測でき、TLS 点群の未計測部を補完できる計測技術が必要である。そこで本研究では、軽量かつ持ち運びが容易なデプスカメラ (DC) を用いた、TLS 点群の未計測領域の補完技術の開発を目的とする。本報では、点群を基準平面（地面）へ投影して得られる点群投影画像[1]を用いた、TLS 点群とデプスカメラ計測点群の高速な自動レジストレーション手法を提案する。

2. デプスカメラによる TLS 未計測領域の補完手法

2.1 提案手法概要

本研究で提案するデプスカメラを用いた TLS 点群の未計測領域の補完手法の概要を図 1 に示す。まず、環境を複数の位置から TLS で計測し (A1)、複数の TLS 点群を取得する。次に、取得した TLS 点群に対して、点群投影画像を用いたラフレジストレーション[1]と ICP の反復による精密レジストレーション[2]を行い、統合 TLS 点群を作成する (A2)。DC による TLS 点群の未計測領域の補完では、統合 TLS 点群に存在する未計測領域を点群表示ソフト上で目視で確認し、該当箇所を後述の MDC (マルチデプスカメラ) で計測する (A4)。計測した MDC 点群は、点群投影画像を用いた手法の拡張法により統合 TLS 点群に自動でレジストレーションする (A5)。A4・A5 の手順を未計測領域が無くなるか利用上十分な計測点群が得られるまで繰り返す。

2.2 複数 TLS 点群のレジストレーション

本節ではまず、点群間のラフレジストレーションの基礎となる点群投影画像を用いたペアレジストレーション法について述べ、その後、複数点群のラフレジストレーション法と精密レジストレーション法について述べる。

ペアレジストレーションでは、2つの点群中（ソース、ターゲット）から基準平面（地面）抽出を行い、2点群の基準平面を一致させる座標変換を行う。次に、各点群において、指定された投影区間（地面から一定高さの範囲）にある点集合を基準平面へ投影（図 2 (a)）して点群投影画像を作成し、画像中の図形の角点と端点を特徴点として抽出する（図 2(b)）。そして、ソース点群投影画像からランダムに特徴点対 S を選択し、 S と等しい点間距離を持つターゲット点群投影画像内の特徴点対 T を抽出する。その後、 T と S が一致するようにソース点群投影画像を座標変換し、画像上で重なった特徴点の個数を合致度として求める。以上の処理を一定回数反復し、合致度が最大となる座標変換行列をソース点群に適用する。

複数点群のラフレジストレーションでは、点群集合からターゲットを1つ選択し、他の全点群（ソース）とターゲットとのペアレジストレーションを実施し、合致度が最大のソースをターゲットと統合する。同時に、両点群の点群投影画像を合成し、

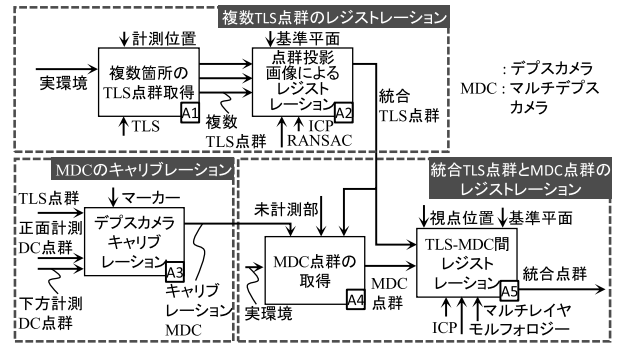


図 1 提案手法概要

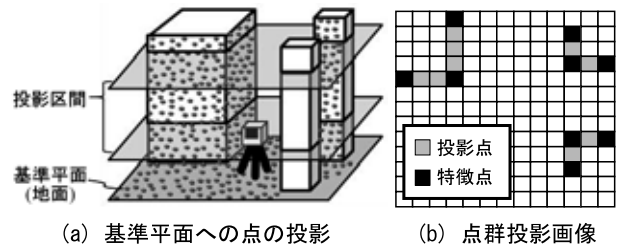


図 2 点群投影画像の生成



図 3 MDC とキャリブレーション

新たなターゲット点群投影画像とする。以上の処理を全点群が統合されるまで繰り返す。最後に、オーバーラップ率の高い点群対に対して繰り返し ICP を実行する手法[2]を用いて精密レジストレーションを行う。

2.3 マルチデプスカメラの作成とキャリブレーション

次に、2.2 節で得た統合 TLS 点群の未計測領域を DC で計測した点群を取得し、統合 TLS 点群と DC 点群間でレジストレーションを行う。本研究では、このレジストレーションにおいても 2.2 節で述べた点群投影画像に基づく手法を用いる。この手法は、基準平面（地面）を必要とするが、画角の狭い DC では計測対象領域と基準平面を同時に得る事が難しい。そのため本研究では、正面計測用と下方計測用の 2 台の DC を接続した MDC (図 3 (a)) を作成し、計測対象と基準平面を同時に計測することを可能とした。また、2 台の DC で取得した点群は座標系が異なるため（図 3 (b)）、壁面に設置したマーカーを TLS と 2 台の DC で測定し、マーカーの座標値から DC 間の相対的な位置と姿勢を求めキャリブレーションを行った（図 3 (c)）。

2.4 統合 TLS 点群と MDC 点群のレジストレーション

2.4.1 従来手法[1]の問題点

MDC 点群の点群投影画像は、計測範囲が狭くレジストレーションの評価(合致度計算)に十分な数の特徴点が得られない、または、統合 TLS 点群に比べて小規模であるため未計測領域以外でも大きな合致度を与える可能性が高く、誤ったレジストレーション結果をもたらすという問題がある。また、統合 TLS 点群においても、投影画像の解像度に起因する不正確な輪郭抽出(例:近接した物体表面の接続)が行われる場合がある。これらの問題を解決するため、本研究では点群投影画像のマルチレイヤ化、視野を利用したレジストレーション処理範囲の絞込み、モルフォロジーを用いた投影画像の補完によるロバスト性の改善を行った。

2.4.2 点群投影画像のマルチレイヤ化

本手法では、合致度計算に用いる特徴点の数を増加させるため、点群投影画像のマルチレイヤ化を行う。まず、2.2 節で示した投影区間を複数設定し、統合 TLS 点群と MDC 点群から複数のレイヤを持った点群投影画像群を作成する(図4)。次に、座標変換導出用の点群投影画像を新たに生成し、2.2 節の手法により座標変換の候補を求める。最後に、この座標変換を全レイヤに対して適用し、全レイヤの合致度の合計値を用いてレジストレーションの評価を行う。

2.4.3 視野を利用したレジストレーション処理範囲の絞込み

本研究では、MDC を用いて未計測領域を計測する際は、点群表示ソフトウェア上で統合 TLS 点群の未計測領域を目視で確認し、その位置を MDC を用いて計測するという手順を取る。そのため、MDC 点群がレジストレーションされるべき位置は、点群表示ソフトウェア上の現視野内に含まれているはずである。この前提を利用しレジストレーション処理範囲の絞込みを行う。まず、図5(a)のような点群投影画像に対して、点群表示ソフトウェア上の視点・注視点位置を点群投影画像上に投影する。次に、透視投影のパラメータから視野角を計算し、点群投影画像上の視野を図5(b)のように求める。レジストレーション処理では、この視野内に存在する特徴点のみを用いる。

2.4.4 モルフォロジーによる投影画像の補完

点群投影画像中では、近接した異なる物体表面が接続されてしまうなど、画像内の図形が実際の物体の表面形状を正確に表しておらず、大量の不適切な特徴点が生じる問題がある(図6(a))。そのため、投影画像に対してモルフォロジー演算(膨張・収縮処理)を用いる事で画素の補完を行い(図6(b))、信頼度の高い特徴点を抽出した。

3. レジストレーション結果と評価

提案手法を複数の TLS 点群と MDC 点群に対して適用した。TLS 点群は大学研究室内を FARO FOCUS 3D を用いて 11 か所から計測して取得した。各 TLS 点群は約 280 万点であった。また、MDC として Xtion Pro Live を 2 台使用し、一度の計測で得られる MDC 点群は約 60 万点であった。

図7(a)に示す統合 TLS 点群に存在する未計測領域の周辺を MDC で計測し得られた図7(b)の MDC 点群を、統合 TLS 点群とレジストレーションした結果を図7(c)に示す。結果より、TLS 点群に存在していた未計測領域が、MDC 点群によって適切に補完されていることが分かる。ラフレジストレーションの処理時間は 4.64s であった。なお、本実験では、合致度評価に 0.9 ~ 1.6m の範囲の 0.1m 間隔を投影区間とする 7 つの点群投影画像を用い、座標変換の候補の計算に 0.8 ~ 1.6m を投影区間とする 1 つの点群投影画像を用いた。図7(d)に、元々の統合 TLS 点群の投影画像と、視点による処理範囲の絞込みを行った後の投影画像を示す。

大学研究室内の統合 TLS 点群の未計測領域 13 箇所を MDC で計測して得られた計 33 個の点群の、統合 TLS 点群とのレジストレーションを行ったところ、その成功率は 55% (18/33) であった。結果を図7(e)に示す。レジストレーションに失敗した主な原因として、投影画像内におけるレジストレーションに有用な特徴点の不足が挙げられる。また、同点群に対する従来手法[1]による成功率は 0% であり、本研究による手法拡張によ

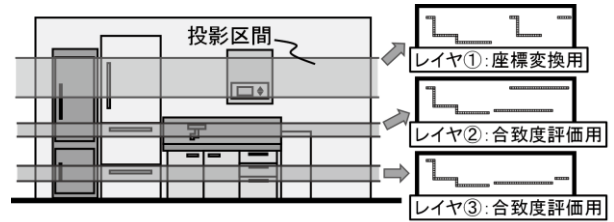


図4 投影画像のマルチレイヤ化



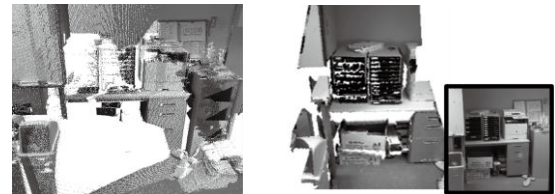
(a) 視野利用前投影画像 (b) 視野利用後投影画像

図5 視野を利用したレジストレーション位置の絞込み



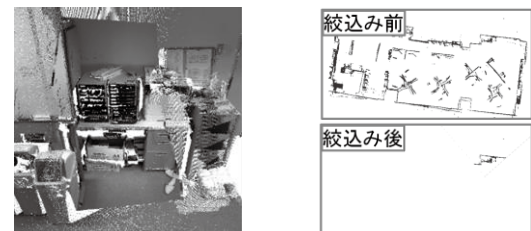
(a) モルフォロジー前 (b) モルフォロジー後

図6 モルフォロジーによる投影画像の補完



(a) TLS 点群未計測領域

(b) MDC 点群



(c) TLS 点群+MDC 点群

(d) 点群投影画像



(e) レジストレーション結果

図7 統合 TLS 点群と MDC 点群のレジストレーション結果

りレジストレーションのロバスト性が大きく向上した。さらに、統合 TLS 点群と MDC 点群に対して ICP を用いた精密レジストレーションを行った結果、レジストレーション誤差(ICP 終了時の対応点間距離の平均値)は 12mm であった。

4. 結論

TLS 点群の未計測領域をデブスカメラを用いて補完するための TLS 点群と MDC 点群のレジストレーション手法を開発し、その有効性を確認した。

参考文献

- [1]松山他, 大規模環境統合点群モデルの自動生成(第三報) -点群ベア位置合せとマッチ判定による複数点群の完全自動位置合せ-, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.391-392, (2014)
- [2]K.Pulli, Multiview registration for large data sets, *Proceedings of IEEE, Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.160-168, (1999)