

# ISS特徴点抽出を用いた 3次元点群ベース室内空間認証手法の提案と評価

山田 裕晃<sup>1,a)</sup> 小谷 大祐<sup>1,b)</sup> 坪内 孝太<sup>2,c)</sup> 五味 秀仁<sup>2,d)</sup> 岡部 寿男<sup>1,e)</sup>

**概要：**室内空間認証は、モバイル端末で利用者自身が居住空間を撮影し、事前に登録しておいた空間情報を照合することで当人認証を行う試みである。従来提案されてきた手法は数万点規模のデータに対して特微量計算と位置合わせを行うため、計算コストが高いだけでなく、詳細な空間情報を保存することによるプライバシー侵害のリスクが懸念される。そこで本研究で提案する新手法では、ISS（Intrinsic Shape Signatures）アルゴリズムを用いて空間の幾何学的に顕著な特徴点を抽出し、これらの特徴点のみを用いて認証処理を行う。これにより、位置合わせに伴う計算コストを削減し、サーバーに保存するデータ量を大幅に減らすことで利用者のプライバシーを保護しながら認証を実現する。ARKitScenesを用いた評価実験では、従来手法に比べて正答率を上げながら処理時間を約20%短縮し、保存データ量を約50分の1に抑えることに成功した。この成果は、パスワードや端末に依存しない新たな本人確認手段として、アカウントリカバリや多要素認証への応用が期待される室内空間認証の実現可能性を高めるものである。

**キーワード：**室内空間認証、三次元点群、ISSアルゴリズム、プライバシー、アカウントリカバリ

## Keypoint-based 3D Point Cloud Authentication for Indoor Spaces Using ISS Feature Extraction

YUKI YAMADA<sup>1,a)</sup> DAISUKE KOTANI<sup>1,b)</sup> KOTA TSUBOUCHI<sup>2,c)</sup> HIDEHITO GOMI<sup>2,d)</sup> YASUO OKABE<sup>1,e)</sup>

**Abstract:** Indoor space authentication is an approach that performs user authentication by having users capture their living spaces with mobile devices and matching them against pre-registered spatial information. Conventional methods proposed to date perform feature calculation and registration on data scales of tens of thousands of points, resulting not only in high computational costs but also raising concerns about privacy violation risks from storing detailed spatial information. In this study, we propose a new method that uses the ISS (Intrinsic Shape Signatures) algorithm to extract geometrically salient feature points from spaces and performs authentication processing using only these feature points. This reduces the computational cost associated with registration and significantly decreases the amount of data stored on servers, thereby achieving authentication while protecting user privacy. In evaluation experiments using ARKitScenes, we successfully improved accuracy compared to conventional methods while reducing processing time by approximately 20% and decreasing stored data volume to approximately 1/50th. These results enhance the feasibility of indoor space authentication as a new identity verification method that does not depend on passwords or devices, with promising applications in account recovery and multi-factor authentication.

**Keywords:** Indoor Space Authentication, 3D Point Cloud, ISS Algorithm, Privacy, Account Recovery

<sup>1</sup> 京都大学, Kyoto University

<sup>2</sup> LINE ヤフー株式会社, LY Corporation

a) yamada@inet.media.kyoto-u.ac.jp

b) kotani@media.kyoto-u.ac.jp

c) ktsubouc@lycorp.co.jp

d) hgomi@lycorp.co.jp

e) okabe@media.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

当人認証（Authentication）はシステムやサービスを利用する人物が登録者本人であることを確認・検証するプロセスであり、情報セキュリティにおいて最も基本的かつ重要な要素の一つである。認証の目的は、正当な利用者のみにリソースへのアクセスを許可し、なりすましや不正アクセスを防ぐことにある。当人認証には、パスワードや生体認証のような日常的に利用される堅牢な手法から、秘密の質問のような信頼性の低い補助的な認証手法まで、様々なレベルのものが存在する。

しかし、現在広く利用されている認証手法には多くの課題が存在する。現在最も普及している認証手法であるパスワード認証では、セキュリティ向上のために複雑で長いパスワードが要求される一方で、人間の記憶能力の限界から同一パスワードの使い回しや推測されやすい単純なパスワードの使用が後を絶たない。指紋認証や顔認証などの生体認証は利便性の高さから急速に普及しているが、生体情報は一度漏洩すると変更が不可能であるためプライバシーの観点から慎重な取り扱いが求められ、あくまでデバイス内の認証に留めるなどの配慮が必要である。一方、補助的な認証手法として使用される秘密の質問は答えを推測されやすいため、十分なセキュリティを提供できないという問題がある。

そこで近年新たに提案されている試みとして、室内空間認証が挙げられる。室内空間認証では、利用者が個人に紐づく空間（自身の部屋など）をデバイスで撮影し、その空間情報を事前にサーバーに登録しておく。認証時には同じ空間を再度撮影し、登録済みの空間情報との類似度を計算することで本人確認を行う。この手法は、利用者が所有・管理する物理的な空間を認証要素として活用するとともに、その空間を日常的に利用しているという知識を組み合わせた認証方式である。偽造のハードルが高い物理空間を利用しながら、パスワードのように意識的に記憶する必要がないため、認知負荷を大幅に軽減しながらも、他者には容易に推測・複製できない認証要素となる点が特徴である。

室内空間認証において、空間情報は点群と呼ばれる3次元空間上の点の集合で表現される。空間情報の類似度の計算には、位置合わせと呼ばれる手法を用いて点群中の各点同士の対応を取るのが一般的である。位置合わせのためのアルゴリズムには大域的な位置合わせを行うRANSAC (Random Sample Consensus) アルゴリズム [1] や局所的な位置合わせを行うICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [2] があり、両者を組み合わせることが多い。鈴木らの研究 [3] では、iPhoneに搭載されたLiDARセンサを用いて室内空間の点群データを取得し、RANSACおよびICPによる位置合わせが成功した点の割合を点群間の類似

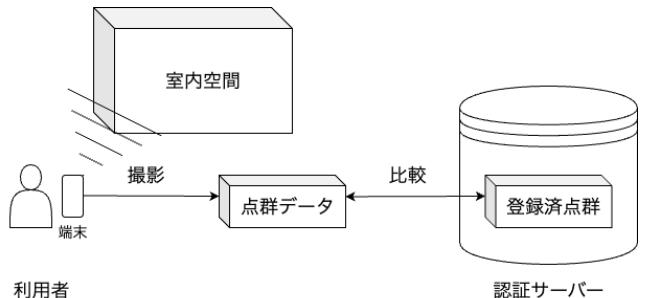


図 1 室内空間認証の概念図

Fig. 1 The Concept of Indoor Space Authentication

度とする手法を提案している。

しかしながら、これまで提案してきた手法は数万点規模の点群データに対して特微量計算と位置合わせを行うため、計算コストが高いという問題を抱えている。さらに重要な問題として、既存手法では詳細な空間情報をサーバーに保存することになるためプライバシー侵害のリスクが強く懸念される。点群データからは室内の家具配置や生活様式が推測可能であるため、これらの情報が流出するとプライバシー漏洩に繋がる危険性がある。また、ここで行われる位置合わせは壁や床などの比較的大きな物体が支配的であり、室内空間認証で行いたい「同一空間の判定」という本来の目的を十分満たせているとは言い切れない。

本研究では、これらの課題を解決する新たなアプローチとして、ISS-RegAuth (ISS-based Registration for Authentication) を提案する。ISS (Intrinsic Shape Signatures) アルゴリズム [4] によって得られる空間中の幾何学的に顕著な特徴点に注目し、この特徴点のみを用いてRANSACとICPアルゴリズムによる位置合わせを行い認証可否を決定する。これにより位置合わせの際の壁や床部分の影響が減少することで、類似度計算において空間中の物体を相対的に重視することが可能となった。また、位置合わせに必要な計算コストを大幅に削減するとともに、サーバーに保存するデータ量を大幅に抑えることで、実用的な処理速度とプライバシー保護を両立した室内空間認証が実現できる。

本研究で提案する手法の評価には、Apple社より提供されている屋内空間データセットであるARKitScenes[5]を使用する。このデータセットには居住空間を中心とした1600を超える空間が含まれており、撮影はiPad Proで行われている。同一/異なるシーンのペア100組程度に対して鈴木らの手法と本研究で提案する手法をそれぞれ適用し評価を行った結果、従来手法と比較して正答率を98%から100%に向上させながら、処理時間を約20%短縮（平均3.58秒から2.7秒）、保存データ量を約50分の1（全点群の2.2%）に削減することに成功した。

## 2. 関連研究

### 2.1 室内空間の測定方法

室内空間の3次元情報を測定する方法として、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる技術が広く利用されている。LiDARは、レーザー光や赤外線を対象物に照射し、反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで距離を算出する技術である。これにより三次元空間上の物体を点群と呼ばれる点の集合として表現し、.plyや.pcd等のフォーマットで出力する。

近年、Apple社のiPhone 12 Pro以降のモデルやiPad Proに小型化されたLiDARセンサが搭載されるようになり、一般消費者でも手軽に3次元空間の測定が可能となった。これらのデバイスは、最大5メートルの測定範囲で計測が可能である。また、慣性計測装置(IMU)との組み合わせにより、デバイスの移動に伴う点群の統合も自動的に行われ、広範囲の空間データを一度の撮影で取得することができる。

### 2.2 種々の点群処理アルゴリズム

点群とは3次元空間中の点の集合であり、各点は(x, y, z)座標で表現される。LiDARセンサやRGB-Dカメラで取得した点群データから物体や空間を認識するためには、異なる視点から取得した点群同士の対応関係を見つける「位置合わせ(Registration)」が必要となる。位置合わせとは、2つの点群間の回転行列と並進ベクトルを求め、一方の点群を他方に重ね合わせる処理である。

位置合わせ手法には様々なアプローチがあるが、最も頻繁に採用されるのは特徴量ベースの位置合わせである。特徴量ベースの手法では、まず各点の周辺形状を数値化した「局所特徴量」を計算する。次に、2つの点群間で似た特徴量を持つ点同士を対応付け、その対応関係から変換行列を推定する。

局所特徴量とは、ある点の周辺の幾何学的な形状パターンを数値ベクトルとして表現したものである。代表的な局所特徴量としてFPFH (Fast Point Feature Histograms) [6]がある。FPFHは各点の周辺点と法線の情報をヒストグラムとして記録することで、回転に対して不变な特徴を表現している。点群から各点の法線ベクトルを求める方法としてはPCA(主成分分析)ベースの手法[7]が一般的である。

RANSAC (Random Sample Consensus) は、ノイズや誤対応を含むデータから正しいモデルパラメータを推定するアルゴリズムである。対応点のペアからランダムに少數を選んで変換行列を計算し、その変換がどれだけ多くの対応点に適合するかを評価する。この処理を繰り返すことで、誤対応に影響されない頑健な位置合わせを実現する。

ICP (Iterative Closest Point) は、2つの点群を繰り返し計算により精密に位置合わせする手法である。各点に対して最近傍点を探索し、対応点間の距離を最小化する変換を求める処理を収束まで繰り返す。ICPは初期位置が大きくなっていると失敗する可能性があるため、RANSACで大まかな位置合わせを行った後、ICPで精密化するという2段階の処理が行われことが多い。

これらのアルゴリズムを組み合わせることで、ノイズを含む実環境の点群データに対しても高精度な位置合わせが可能となる。室内空間認証においては、登録時と認証時の点群の位置合わせ成功率や、対応点の一致度を類似度指標として用いることで、同一空間かどうかの判定を行う。

### 2.3 研究動向

3次元点群データを用いた室内空間認証は、LiDARセンサの普及に伴い近年研究が進展してきた。鈴木らの研究では、iPhone/iPadに搭載されたLiDARセンサを活用し、モバイルデバイスによる室内空間認証システムが提案されている。RANSACによる大域的位置合わせとICPによる局所的位置合わせを組み合わせることで高い認証精度を達成している一方で、計算コストやプライバシーへの課題が残る。

点群同士の位置合わせの手法としては、特にロボットのSLAM(自己位置推定及び地図作成)を念頭に置いて様々なアプローチが提案されているが、RANSACやICPをはじめとする特徴量ベースの位置合わせ手法が最も汎用的に採用されている。

点群の特徴点の抽出方法については、Harris3D[8]をはじめとした物体のコーナーを特徴点として検出するアルゴリズムや、各点の固有値分析によって近傍での変化の激しい点を特徴点とするISSアルゴリズムが挙げられる。ISSアルゴリズムでは非最大値抑制(ある範囲で最も顕著な点のみを採用)の近傍範囲を調整することで、点群データから抽出してくる特徴点の数をある程度制御可能である。

屋内点群データを取り扱うデータセットとしては大学構内の空間を撮影したS3DIS(Stanford Large-Scale 3D Indoor Spaces Dataset)[9]や高解像度かつ多様なシーンを揃えるScanNet++[10]、モバイル端末を用いて居住空間を中心撮影したARKitScenesなど様々なデータセットが提案されている。

## 3. ISS特徴点による室内空間認証

### 3.1 室内空間認証の定義

はじめに、本研究で実現を目指す室内空間認証について次のように定義する。

- (1) 利用者は個人に紐づく空間(自身の部屋など)をデバイスで撮影し、その空間情報を事前にサーバーに登録しておく。

- (2) 認証時には利用者が登録時と同じ空間を再度撮影し、空間情報をサーバーに送信する。
  - (3) サーバー側で受信した空間情報と登録済みの空間情報の間の類似度を計算し、その結果に基づいて認証可否を決定する。
- この定義に基づいて認証手順をステップ別に分割すると、室内空間認証は以下のように3つのステップで表すことができる。

**Step1: 室内空間情報の撮影** 利用者は認証対象としたい空間を自身の端末を用いて撮影する。この際、測定される空間情報は比較のために十分な精度であることが求められる。

**Step2: 点群データの抽象化、送信** 撮影された空間情報を認証サーバーへ送信する。この際、計算量削減及びプライバシーの保護を目的として何らかの抽象化処理が施されることが望ましい。

**Step3: 類似度計算、一致判定** 送信してきた空間情報をサーバーに予め登録されているデータと照合し、類似度を計算する。ここで求めた類似度が設定された閾値を超えるか否かで認証可否が決定される。

Step1については測定機器の性能に大きく依存するため、本研究ではStep2とStep3に当たる点群の抽象化および類似度計算の性能向上に焦点を当てて議論する。

### 3.2 ISS-RegAuth の具体的手順

本研究において提案するISS-RegAuth (ISS-based Registration for Authentication) の具体的な処理手順について説明する。

#### 3.2.1 前処理

後述する点群データの位置合わせを高速かつ正確に行うため、撮影データに対しては次に示す前処理を実行する必要がある。

**ボクセルダウンサンプリング** 位置合わせの際に対応点の決定を容易にするため、点同士の間隔を均一に調整する。

**法線推定** サンプリング後の各点の法線ベクトルを求める。

PCAベースの手法を用いるのが一般的である。

なお、これらの処理を行う前に外れ値除去アルゴリズムによって孤立点を削除しておくことが望ましい。例としては、指定半径内の近傍点数を閾値未満にするようなアルゴリズムが挙げられる。これによって撮影端末側で発生する測定ノイズの問題をある程度カバーすることができる。

#### 3.2.2 ISS 特徴点抽出

特徴点の抽出にはISS (Intrinsic Shape Signatures) アルゴリズムを使用する。このアルゴリズムでは各点の近傍における固有値解析を行い、点群の局所的な幾何学的特性を評価する。固有値の比率からその点が特徴的（角やエッジなど）かどうかを判定し、特徴点として抽出する。

#### 3.2.3 特徴量計算

抽出された特徴点に対して、事前に求めておいた法線情報からFPFH (Fast Point Feature Histograms) 特徴量を計算する。FPFHは各点の周辺形状を33次元のヒストグラムとして表現するため、回転に対して不变な特徴量を提供することができる。

#### 3.2.4 位置合わせ処理

先ほど求めたFPFH特徴量を用いて、特徴点ベースの位置合わせを以下の2段階で実行する。

**RANSACによる大域的位置合わせ** 対応点のペアからランダムに少数を選んで変換行列を計算し、その変換がどれだけ多くの対応点に適合するかを評価する。これを繰り返すことで大まかな位置合わせを得る。

**ICPによる精密位置合わせ** 各特徴点に対して最近傍点を探索し、特徴点間の距離を最小化する変換行列を反復的に求める。初期位置が大きくずれていると失敗しやすいが、RANSACで先に初期変換を求めているため安定した結果が期待される。

このように二段階で位置合わせすることで結果の初期値依存性を軽減することができる。

実例として図2に示す撮影データA、Bに対する位置合わせを実行する。両者はARKitScenesデータセットに含まれるデータであり、どちらも同じ部屋を撮影したものである。位置合わせ結果を図3に示す。緑色と赤色で表されているのがそれぞれ撮影データA、Bに前処理を施した後の点群である。黄色と青色の大きな点がこれらの点群から抽出してきたISS特徴点である。位置合わせにはISS特徴点のみが使用されており、実際にうまく位置合わせができることが見て取れる。

#### 3.2.5 類似度計算

ISS-RegAuthでは、位置合わせ後の対応点の割合を類似度として使用する。具体的には、テンプレート点群の特徴点の総数に対する対応点の割合を類似度スコアとして採用する。認証可否を決定する閾値は実験的に決定される。

### 3.3 先行研究との実装上の相違点

先行研究と本研究で提案するISS-RegAuthの実装上の主な違いは以下の通りである。

**鈴木らの手法 [3]**



図2 同一空間を撮影したデータの組

Fig. 2 A Point Cloud Pair Indicating Same Space

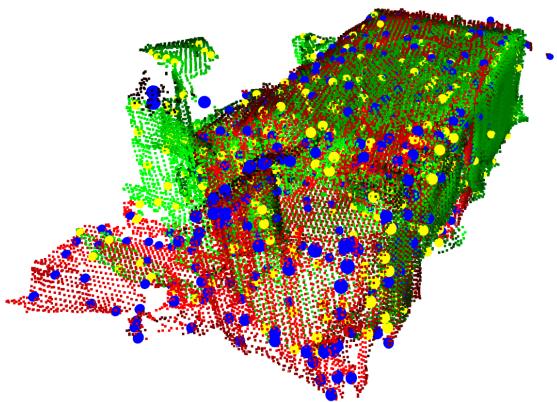


図 3 両者の位置合わせ結果  
Fig. 3 Registration Result

- 前処理後の全点群に対して FPFH 特徴量を計算
- 全点群を用いて RANSAC および ICP による位置合わせ

#### ISS-RegAuth (本研究)

- ISS 特徴点のみを抽出
- 特徴点のみに対して FPFH 特徴量を計算
- 特徴点のみを用いて RANSAC および ICP による位置合わせ

先行研究で行われてきたような全点を使った位置合わせは、ロボットの自己位置推定などで使われている手法を応用したものである。そのため、壁や床などの比較的大きな物体が位置合わせにおいて支配的であり、室内空間認証で行いたい「同一空間かどうかの判定」という本来の目的を十分満たせているとは言い切れないものであった。そこで本研究では空間の特徴を効率よく捉えている ISS 特徴点に着目し特徴点のみを使った位置合わせを行うことで、空間上に置かれている比較的小さな物体も重視しつつ、同時に効率的かつプライバシーに配慮された位置合わせを実現した。

## 4. 実験による評価

前章にて説明した ISS-RegAuth について、先行研究との比較実験を行い精度を評価する。

### 4.1 実験環境および手順

今回行う実験では、実際の室内空間認証で使われるデータセットとして ARKitScenes を使用する。このデータセットには居住空間を中心とした 1600 を超える空間が含まれており、それぞれの空間に対して複数回の撮影が行われている。また、撮影は iPad Pro で行われているため今回想定する室内空間認証のユースケースに合致している。

はじめに ARKitScenes に含まれるデータを無作為に抽出し、同一空間同士の撮影データのペアと異なる空間同士

の撮影データのペアをそれぞれ 50 組程度用意する。これらのデータに対して鈴木らの提案手法（先行研究）と本研究で提案する ISS-RegAuth を適用し、正答率/平均処理時間/使用した点の割合を比較する。また、ISS-RegAuth ではパラメータ制御によって抽出する特徴点の数をある程度制御可能であるため、今回は特徴点を 2%程度/1%程度取得する場合の 2 パターンのパラメータ設定を用意し、それについて評価を行った。

なお、今回の比較実験では「点群の特徴点を使用することによる性能の変化」に注目するため、点群の前処理（ノイズ除去・ダウンサンプリング）などのパラメータは基本的に共通のものを使用する。また、プログラムの実行には Python 3.12.10 及び Open3D 0.19.0 を使用し、実験機器には MacBook Air M3 2024, RAM 16GB を使用する。

### 4.2 Open3D のパラメータ設定

各種点群処理アルゴリズム本体の実装については、Python ライブリの Open3D が提供するものを使用する。今回の実験に使用した主要なパラメータ設定を以下に示す。

- ボクセルダウンサンプリング (voxel\_down\_sample)  
**voxel\_size:** 0.1m
- ISS アルゴリズム (compute\_iss\_keypoints)  
**salient\_radius:** 0.2m  
**non\_max\_radius:** 0.2m (特徴点 2%), 0.3m (1%)  
**gamma\_21, gamma\_32:** 0.95  
**min\_neighbors:** 5
- RANSAC (registration\_ransac)  
最大対応距離 0.2m  
収束条件 最大 100 万回の反復、信頼度 99.9%
- ICP (registration\_icp)  
最大対応距離 0.2m  
反復回数 最大 50 回

### 4.3 評価指標

今回の実験にあたっては、以下の指標で評価を行った。  
**正答率** FRR (本人拒否率) と FAR (他者受入率) が等しくなる閾値における正答率 (1-EER) を求める。認証自体の精度を評価する。

**処理時間** それぞれの点群ペアにおけるサーバー側での認証処理（点群の前処理～認証可否判定まで）にかかる平均の所要時間。計算量が実用範囲内であるかを評価する。

**プライバシー保護率** (使用しなかった点の割合) 認証に使用しなかった点（サーバー側に送信しなかった点）の数を、全点を使う場合との相対的な割合で表す。送信データ量及びプライバシー面への配慮を評価する。

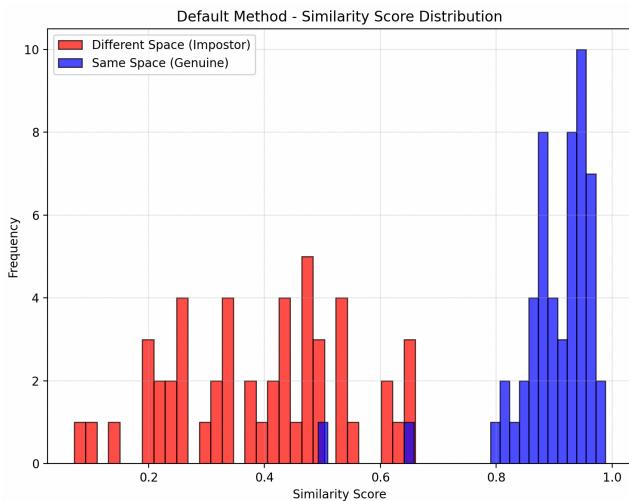


図 4 鈴木らの手法 [3] による位置合わせの類似度分布

Fig. 4 Previous study - Similarity Score Distribution

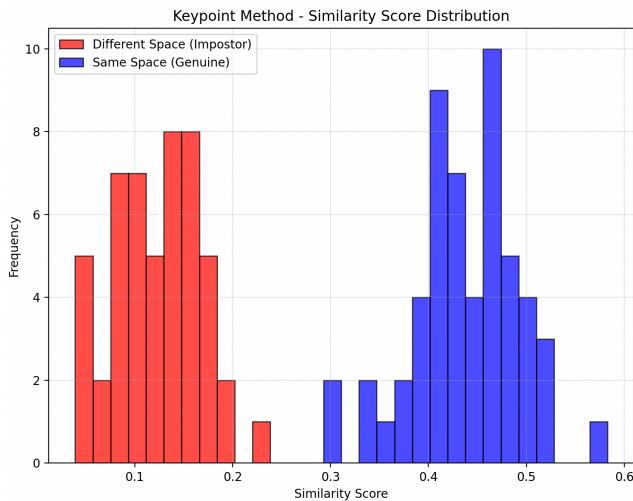


図 5 ISS-RegAuth(特徴点 2%程度) の類似度分布

Fig. 5 ISS-RegAuth (about 2%) - Similarity Score Distribution

手法	正答率	処理時間	プライバシー保護率
鈴木らの手法 [3]	98%	3.58s	0%
ISS-RegAuth (2%)	100%	2.7s	97.8%
ISS-RegAuth (1%)	93%	2.45s	98.9%

図 6 両手法の性能比較

Fig. 6 Performance Comparison of Both Methods

#### 4.4 評価結果

図 4, 5 は正解ケース/不正解ケースそれぞれについての類似度（全体における対応が取れた点の割合）の分布をヒストグラムとして表したものである。鈴木らの手法では正解ケースのほとんどにおいて類似度が 0.8 を上回る高い一致スコアが出た一方、ごく一部の正解ケースで類似度が 0.5 を下回ることとなった。

一方、ISS-RegAuth では特徴点の数によって正答率及び処理時間の変化が見られた。特徴点を全体の 2%程度抽出してきた場合、正答率は鈴木らの手法に比べて向上し、処



図 7 同一空間だが撮影範囲が大きく異なるペア

Fig. 7 Example: Same Spaces but Significantly Different Ranges

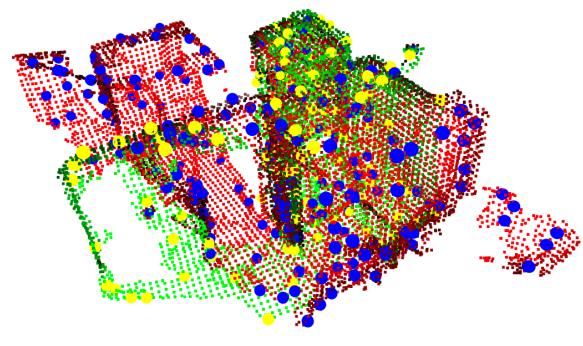


図 8 ISS-RegAuth(2%) による位置合わせ結果

Fig. 8 Registration Result by ISS-RegAuth(2%)



図 9 部屋の形状が似ているが異なる空間であるケース

Fig. 9 Example: Different Spaces but Similar Room Shapes

理時間も 20%程度向上した。特徴点の数を全体の 1%程度まで減らすと正答率は下がるもの、処理時間はさらに短縮された。

## 5. 考察

### 5.1 評価結果に対する考察

前章の評価結果に対して、具体的なケースを挙げながら両者の手法の比較を行う。

今回の実験に使用したデータには、図 7 の通り同一空間を撮影したものだが撮影範囲が大きく異なるペアが含まれていた。このペアに対して ISS-RegAuth を適用した結果が図 8 である。参考のために位置合わせに使用していない点も表示しているが、処理上は黄色と青の特徴点のみを使って位置合わせを行なっている。類似度（対応点の割合）は 0.437 となり、これは正解ケースの中では中程度の

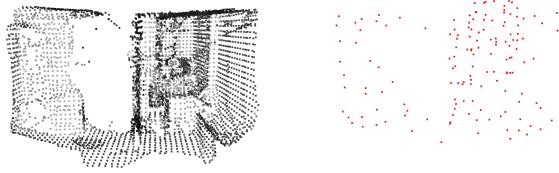


図 10 ISS-RegAuth によるプライバシー保護の例

Fig. 10 An Example of Privacy Protection by ISS-RegAuth

類似度の高さである。一方で、同じペアに対して鈴木らの手法として全点を使っても当然位置合わせはうまくいく。しかしこの手法は全点における対応点の割合を類似度とするため、撮影範囲の被りが少ない本ケースにおいて類似度は 0.492 となり、他の正解ケースに比べて大きく落ち込む結果となった。

図 9 は部屋の形状が似ているが異なる空間を指すケースについて、鈴木らの手法と ISS-RegAuth (2%) の両者で位置合わせを行った結果である。左の鈴木らの手法の場合では壁や床などの大きな物体が位置合わせにおいて支配的に働き、異なる空間を指しているが類似度は 0.660 と高い値を示していた。一方で ISS-RegAuth を適用した場合は位置合わせが収束せず、類似度は 0.119 と低い値であった。

この結果から、ISS-RegAuth では特徴点同士の対応がうまく取れているかを重視できていると考えられる。また、鈴木らの手法に比べて不正解ケースの類似度の分布が全体的に小さくなっていることからも、「異なる空間同士の一部の構造が偶然一致した」よりも「空間の重複部分がよく似ている」ケースが高く評価された結果ではないかと考えられる。

また、特徴点を全体の 1%程度になると正答率の低下が見られたが、これは使用する特徴点の数が少ないので位置合わせが収束しないことが大きな原因である。しかし、全体に対して使用する点の割合は大幅に少なく済んでいるため、例えば他要素と組み合わせた多要素認証において、利用者本人のプライバシーをより重視するような目的で特徴点の数を少なくするアプローチを採用するユースケースはありうると考えられる。

図 10 は ISS-RegAuth によってプライバシーが保護されていることを示す例である。どちらも同じ点群データ（図 7 左と同じ）から抽出されたものであり、左は鈴木らの手法で、右は ISS-RegAuth (2%) で位置合わせに使用する点を示している。左の鈴木らの手法では図中右下の特徴的な窪みなどから浴室のものであると容易に推測できるが、右の ISS-RegAuth では点群が抽象化されているため、一目でどのような部屋なのか推測することは難しい。このような例からも、ISS-RegAuth は一定のプライバシー保護効果があると考えられる。

## 5.2 アカウントリカバリへの応用可能性

本研究の成果は、アカウントリカバリのような今日議論されているセキュリティ課題に対しても応用可能であると考える。アカウントリカバリは、パスワードを忘れた場合や 2 要素認証デバイスを紛失した場合に行う手続きであり、自身が利用者本人であることを証明することでアカウントへのアクセスを回復する必要がある。しかし、現在広く採用されているリカバリ手法には構造的な脆弱性が存在する。

特に深刻な問題として、利用者本人であることを証明が外部要因に大きく依存しているという点が挙げられる。現在のリカバリシステムは、メールプロバイダや 2FA デバイス、携帯電話会社などの外部サービスに強く依存している。例えば、多くのサービスではパスワードリセット用のリンクを登録メールアドレスに送信するが、そのメールアカウント自体へのアクセスを失った場合、連鎖的に複数のサービスへのアクセスを失う可能性がある。また、SMS 認証に依存するシステムでは、SIM スワップ攻撃により携帯電話番号が乗っ取られるリスクがある。このような外部サービスへの依存は、ユーザーが制御できない要因によってアカウントへのアクセスを失うリスクを生み出し、同時に攻撃者にとって複数の攻撃経路を提供することになる。

室内空間認証は、これらの問題に対する新たな解決策となる可能性がある。室内空間、特に自宅や個人のオフィスなどのプライベート空間は、ユーザーが物理的に制御可能な認証要素である。外部サービスプロバイダに依存することなく、ユーザー自身が管理する物理空間を認証要素として利用できる点が大きな利点となる。

アカウントリカバリのシナリオにおいて、室内空間認証は以下のように機能する。ユーザーは事前に自身の部屋など複数の信頼できる空間を登録しておく。パスワードを忘れた場合やデバイスを紛失した場合、登録済みの空間からアクセスすることで本人確認を行い、アカウントへのアクセスを回復する。この手法は空間という物理的な実体に基づくためにリモートからの攻撃が困難であり、ソーシャルエンジニアリングに対しても高い耐性を持つ。

特に、本研究で提案する ISS-RegAuth によって限定的な特徴点のみをサーバーに保存することで、プライバシーを保護しながらリカバリ機能を提供できる。完全な空間情報を保存する必要がないため、データ漏洩時のリスクも最小限に抑えられる。

一方で、室内空間認証をアカウントリカバリに適用する際の課題として引っ越しや大規模な模様替えによる空間の変化への対応が挙げられる。この問題に対しては、複数の空間を登録可能にすることや、空間の環境変化に対する頑強性を高めることで対処することが考えられる。

室内空間認証を適用する場合は、既存のアカウントリカバリシステムを完全に置き換えるものではなく、追加的な

リカバリオプションとして機能することが想定される。複数のリカバリ手法を組み合わせることでセキュリティと利便性のバランスを保ちながら、外部サービスへの過度な依存を軽減し、より堅牢なアカウント管理システムの構築に貢献できると考えられる。

### 5.3 今後の課題

ISS-RegAuthによって認証精度及び処理速度について一定の改善を行うことができたが、将来的な課題点はいくつか挙げられる。

まず、プライバシーへの配慮についてより妥当な評価指標が必要である点が挙げられる。今回の評価実験では鈴木らの手法に比べて使用する点の数がどの程度減少したかをプライバシー保護率として定め、実例を交えてプライバシー保護に一定の効果があることを示したが、これだけで十分にプライバシーへの配慮を評価しきれているとは言えない。特にISS特徴点の情報から元の空間をある程度復元することは可能であると考えられるため、このような攻撃に対する耐性を評価する必要がある。

加えて、撮影環境の変化など室内空間認証特有の状況下での検証が挙げられる。今回の実験ではARKitScenesから無作為にデータを取り出して評価したが、実際のユースケースでは部屋の模様替えや時間変化に伴って室内空間の環境が変化していくことが想定される。このような状況下でも正しく同一の空間かどうか判定できるか、すなわち環境変化耐性を評価するために、実験用の室内環境を用意して実際に環境を変化させていく検証が必要である。

## 6.まとめ

本研究では、室内空間認証における計算コストの削減とプライバシー保護の両立を目指し、ISSアルゴリズムを用いた特徴点ベースの新たな認証手法としてISS-RegAuthを提案した。従来の鈴木らの手法では、数万点規模の点群データ全体に対して特微量計算と位置合わせを行うため、計算コストが高く、詳細な空間情報をサーバーに保存することによるプライバシー侵害のリスクが懸念されていた。これに対しISS-RegAuthでは、ISSアルゴリズムにより空間の幾何学的に顕著な特徴点を全体の1~2%程度に絞り込み、これらの限定的な情報を用いて認証処理を行うアプローチを採用した。

ARKitScenesを用いた評価実験では、従来手法に比べて正答率を上げながら処理時間を約20%短縮し、保存データ量を約50分の1に抑えることに成功した。この結果を通して限定的な特徴点のみをサーバーに保存することで、プライバシーを保護しながら実用的な処理速度を実現できることを実証することができた。

今後の課題としては、プライバシーが適切に保護されているかを定量的に評価するための手法の確立や、室内環境

の変化に対するロバスト性の検証などが挙げられる。これらの課題に取り組むことで、パスワードや端末に依存しない新たな本人確認手段としての室内空間認証の実現可能性を高めることができると考える。

## 参考文献

- [1] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communications of the ACM, Volume 24, Issue 6, pp. 381–395, 1981
- [2] P. J. Besl and N. D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 14, Issue 2, pp. 239–256, 1992
- [3] 鈴木芽依, 飯島涼, 小林竜之輔, 田中優奈, 大木哲史, 森達哉. Worldauth: 周辺実世界の特徴を利用した新たな認証フレームワークの提案, コンピュータセキュリティシンポジウム 2023 論文集, pp. 423–430, 2023年10月.
- [4] Y. Zhong, Intrinsic shape signatures: A shape descriptor for 3D object recognition, 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, Kyoto, Japan, 2009, pp. 689–696
- [5] Gilad Baruch, Zhuoyuan Chen, Afshin Dehghan, Tal Dimry, Yuri Feigin, Peter Fu, Thomas Gebauer, Brandon Joffe, Daniel Kurz, Arik Schwartz and Elad Shulman, ARKitScenes: A Diverse Real-World Dataset For 3D Indoor Scene Understanding Using Mobile RGB-D Data, <https://arxiv.org/abs/2111.08897>, 2021
- [6] R. B. Rusu, N. Blodow and M. Beetz, Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009, pp. 3212–3217
- [7] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchamp, John McDonald, and Werner Stuetzle, Surface reconstruction from unorganized points, 1992 SIGGRAPH Comput. Graph. 26, 2 (July 1992), 71–78.
- [8] Sipiran, I., Bustos, B., Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes., Vis Comput 27, 963–976, 2011
- [9] Armeni, I., Sener, O., Zamir, A., Jiang, H., Brilakis, I., Fischer, M., & Savarese, S., 3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1534–1543
- [10] Chandan Yeshwanth, Yueh-Cheng Liu, Matthias Nießner and Angela Dai, ScanNet++: A High-Fidelity Dataset of 3D Indoor Scenes, <https://arxiv.org/abs/2308.11417>, 2023