

令和 6 年 9 月 5 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12008

研究課題名（和文）自己診断型地図を基盤とする次世代SLAM技術「メンテナンスフリーSLAM」の実現

研究課題名（英文）The realization of next-generation SLAM technique based on self-diagnosis map: maintenance-free SLAM

研究代表者

田中 完爾 (tanaka, kanji)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：30325899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットカーやパトロールロボットのように、長期間に渡り活動することのできる知能移動ロボットの実現に向けて、自己診断機能を有する、新しいSLAM（自己位置と地図の同時推定）技術を研究開発した。具体的には、機械学習分野において長年に渡り発展してきた故障診断技術を、SLAM分野に応用することを目的とし、新たな実世界情報処理技術の研究開発・性能検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットカーやパトロールロボットのように、長期間に渡り活動することのできる知能移動ロボットの実現に向けて、自己診断機能を有する、新しいSLAM（自己位置と地図の同時推定）技術を研究開発した。具体的には、機械学習分野において長年に渡り発展してきた故障診断技術を、SLAM分野に応用することを目的とし、新たな実世界情報処理技術の研究開発・性能検証を行った。本研究の成果は、審査の厳しい国際会議プロシーディングや雑誌に掲載された。

研究成果の概要（英文）：We have researched and developed a new SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) technology equipped with self-diagnosis functions, aiming to realize intelligent mobile robots capable of long-term operations, such as robot cars and patrol robots. Specifically, our goal was to apply fault diagnosis techniques, which have been developed over many years in the field of machine learning, to the SLAM domain. We conducted research, development, and performance verification of this new real-world information processing technology.

研究分野：SLAM

キーワード：移動ロボット SLAM 故障診断 変化検出 自己位置推定 地図生成

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットカーやパトロールロボットのように、長期間に渡り活動することのできる知能移動ロボットの実現に向けて、自己診断機能を有する、新しい SLAM (自己位置と地図の同時推定) 技術が求められている。

## 2. 研究の目的

機械学習分野において長年に渡り発展してきた故障診断技術を、SLAM 分野に応用することを目的とし、新たな実世界情報処理技術の研究開発・性能検証を行った。

## 3. 研究の方法

主に下記の3つのアプローチをおこなう。

SLAM 技術: 自己位置推定および地図作成に関する技術の進展として、ループクロージャ、変化検出、クロスドメイン位置推定、ポール状ランドマークや深層学習を用いた長期ナビゲーション技術を研究開発する。

故障診断技術: 異常検知やスケール可変な故障診断アプローチに基づき、SLAM システム内での不整合やドメイン間の違いを利用した故障診断のための技術を研究開発する。

実証実験: 実環境での検証として、視覚欠陥検出や車両自己位置推定、交差点分類など、SLAM や故障診断の応用技術を多様な環境下で評価する取り組みを行う。

## 4. 研究成果

具体的に、下記の(1)~(15)の研究成果を得た。

(1) 定位による検出 (Detection-by-Localization): メンテナンス不要の物体変化検出器  
近年の研究では、自己位置推定性能が変化検出における有用な指標であることが示されています。本論文では、この「定位による検出」手法を物体レベルの変化検出という新たな課題で研究しています。提案フレームワークでは、クエリ画像を物体レベルのサブ画像に分割し、それを定位による検出手法でピクセル単位の LoC マップに変換します。我々のアプローチは関連性スコアを使わず、参照画像リストを出力するランキング関数として自己位置推定システムをモデル化します。この新設定により、広範な自己位置推定システムに一般化できます。ランキングベースのモデルは、MMR 分野からの教師なしランク融合を用いて、異なるモダリティの結果を統合します。

### (2) 一人称視点と三人称視点の利用による深層交差点分類

単眼オンボード受動視覚を用いた交差点分類を探索し、道路トポロジーに基づいて交通シーンを分類します。既存のアプローチは、入力データタイプに基づいて二つのカテゴリに分けられます: (a) 一人称視点 (FPV) は交差点通過時の自己中心ビューシーケンスを使用し、(b) 三人称視点 (TPV) は交差点入場直前の単一ビューを使用します。FPV と TPV それぞれに利点と欠点があるため、両者を統合した深層学習フレームワークを提案します。実験結果は、FPV-TPV 方式が従来の方法より優れ、最小限の FPV/TPV 測定で済むことを示しています。

### (3) ループクロージャと変化した物体の同時検出

大規模な非静止環境でのループロージャータ検出 (LCD) は、vSLAM において重要な課題です。計算および知覚の複雑さを軽減するために、vSLAM システムが画像変化検出 (ICD) を行う能力が有益です。従来の ICD はオフラインバックグラウンドモデリングに依存していますが、時間に敏感な vSLAM アプリケーションではこれが難しいです。そこで、バックグラウンドモデリング不要の ICD フレームワークを提案します。具体的には、LCD を ICD の主要プロセスとして最小限の追加コストで利用できることを示します。この概念に基づき、LCD と ICD を同時に行う新しい vSLAM コンポーネントを開発しました。過酷なクロスシーズン LCD シナリオでの ICD 実験により、提案手法の有効性が確認されました。

#### (4) 再帰型知識蒸留による長期車両位置推定

現在の CS-VPR フレームワークは、特定の単一シーズンへのドメイン適応 (DA) に焦点を当てていますが、長期的な CS-VPR にはスケーラブルではありません。本研究では、長期連続マルチドメイン CS-VPR (SMD-VPR) のために、一定コストで再訓練可能な新しい長期アンサンブル学習 (LEL) フレームワークを開発します。このフレームワークは、少数の深層 CNN を記憶し、各シーズンの CNN アンサンブルを少量の時間/空間コストで再訓練します。我々のタスクは、過去のシーズンの知識を現在の CNN アンサンブルに圧縮する MTMS-KD として構築され、教師-学生の割り当て (TSA) 問題に対処します。SMD-VPR タスクに関する実験結果は、提案手法の有効性を示しています。

#### (5) 深層 3D ニューラルコードを用いたスケーラブルな変化検出

オンボード 3D イメージングシステム向けに、新しいスケーラブルな ICD フレームワークを提案します。従来の ICD システムは、クエリ画像を参照画像座標に整合させるのに時間がかかりますが、私たちは不変座標系 (ICS) を利用してこれをオフラインの前処理に置き換えます。主要な貢献は、従来の画像比較ベースの ICD タスクを画像検索 (IR) タスクに拡張することです。具体的には、(1) 画像モデリング、(2) 画像整合、(3) 画像差分の各コンポーネントを、BoW IR パラダイムからの効率的なバリエーションに置き換えます。また、教師なし Siamese ネットワークと自動収集トレーニングデータを用いて深層 3D 特徴抽出器を訓練します。クロスシーズン ICD タスクのデータセットを用いた実験で、提案手法の有効性を確認しました。

#### (6) 再帰型オートエンコーダを用いた場所特有の背景モデリング

オンボード単眼視覚システムで車両前方の変化した物体を場所特有の背景モデルで検出するのは、IV における基本的な問題です。すべての場所に対して背景モデルを訓練するのは空間/時間効率の面で困難です。そこで、AE ベースの異常検知 (AD) と画像圧縮 (IC) の利点を組み合わせた新しい AE ベースの ICD フレームワークを提案します。この手法では、AE 再構成エラーを単一の測定値として用い、最小限の場所特有 AE セットで訓練し、検出精度を保ちます。効率的な逐次的再帰型 AE (rAE) 訓練フレームワークを導入し、大量の背景画像を AE セットに再帰的に要約します。クロスシーズン ICD タスクのデータセットを用いた実験により、提案手法の有効性が確認されました。

#### (7) 視覚場所分類器のための最小地図片の発掘

VPR において、地図セグメンテーション (MS) はビューシーケンス地図を場所クラス (地図片) に分割し、VPC のための良好な訓練画像を提供します。従来の MS アプローチは地図片のサイズ

や均衡を前提としていますが、最近の VPR システムでは、小さな重要な地図片（最小地図片）が VPC に十分であり、残りは破棄すべきとされています。本研究では、大規模なビューシーケンス地図から最小地図片を発掘する新しい MS アルゴリズムを提案し、MS をビデオセグメンテーション問題として定式化し、点軌跡に基づく効率的なパラダイムを使用します。提案する地図表現は、深層 CNN、Bag-of-Words、オブジェクトクラス検出器の三種類の VPC で実装され、各 VPC はトポメトリック VPR フレームワーク内の MCL アルゴリズムに統合されました。NCLT データセットでの実験により、MS の VPR 性能向上が確認されました。

#### （ 8 ） 変化検出のためのスケール可変な故障診断 SLAM

本論文では、サブモジュール間の不整合から変化を検出する新しい FD ベースのアプローチを提案します。従来の変化検出アプローチ（PC や AD）とは異なり、この FD アプローチでは、各マップ画像の記憶や最新の場所特有異常検知器の維持が不要です。SLAM サブモジュールを FD に組み込む際の課題は、変化した物体のスケールの違いに対応することです。この問題に対処するために、自己位置推定と変化検出における最近の進展を活用し、Bag-of-Words（BoW）画像表現を再考します。BoW 画像表現の利点として、元の BoW 画像をクロッピングすることで、異なるスケールリングに再編成できる点があります。また、自己位置推定モジュールを強力（strong）および弱力（weak）の BoW 特徴と組み合わせ、これらの不整合を変化の指標として扱います。FD の有効性は、AD や PC の有無にかかわらず実験的に検証されました。

#### （ 9 ） ドメイン不変 NBV 計画器による能動型クロスドメイン自己位置推定

ポール状ランドマークは、異なるドメイン（季節、昼夜、天候）での視覚ロボット自己位置推定において注目されていますが、受動観察者には非定義的で、多くの視点がポール状ランドマークビューを提供しません。本研究では、能動型観察者を考慮し、「ドメイン不変」最良ビュー（NBV）プランナーを提案し、異なるドメインで一貫した性能を実現します。このアプローチはデータ収集や再訓練の高コストを不要とし、一貫した性能を維持します。マルチエンコーダ深層 CNN でポール状ランドマークを検出し、モデルフリーの深層強化学習に基づく NBV プランナーに入力します。また、疎な不変ランドマークと密な識別ランドマークを用いた能動型自己位置推定システムを開発し、実験で提案手法の効率的なランドマーク検出と識別性能が確認されました。

#### （ 10 ） 高混合低量産の非凸円筒金属物体に対するドメイン適応視覚欠陥検出器

高混合低量産の非凸金属物体（例：高圧円筒パイプ継手部品（VDD-HPPPs））の視覚欠陥検出（VDD）は、金属物体、イメージングデバイス、視点、照明などのドメインの違いが鏡面反射特性に大きく影響するため、困難です。本論文では、この問題に対処するために、新しいドメイン適応型のテイラーメイド VDD フレームワークを導入します。具体的には、適応タスクを強化学習を用いたネットワークアーキテクチャ探索（NAS）問題として定式化します。工場のケーススタディとして VDD-HPPPs タスクを用い、提案フレームワークの有効性を実証します。実験結果は、非凸 HPPPs のドメインシフトに対して、異なる訓練/テストドメインのデータでベースライン法よりも高い欠陥検出精度を達成したことを示しています。

#### （ 11 ） ランキングベースのシーン記述子を用いた能動型ランドマークベース自己位置推定

ランドマークベースの自己位置推定は、異なるドメイン（時間帯、天候、季節）での視覚場所認識（VPR）に注目されていますが、受動観察者には困難です。本研究では、強化学習（RL）ベ-

スの次最良ビュー (NBV) プランナーを提案し、能動型自己位置推定を考慮します。主な貢献は：(1) SIMBAD ベースの VPR：ランドマークベースのシーン記述を SIMBAD (類似性ベースのパターン認識) として定式化し、深層学習拡張を提案。(2) VPR から NBV への知識移転：VPR の状態認識能力を NBV に移転し、RL 課題に対応。(3) NNQL ベースの NBV：VPR を経験データベースとして利用し、Q 学習の最近傍近似 (NNQL) に適応。これにより、VPR と NBV を逐次的反転インデックスに圧縮するデータ構造を得ました。NCLT データセットで実験し、有効性を確認しました。

#### (12) 視覚交差点分類のための自己注意探索

ロボットビジョンにおいて、自己注意は非局所コンテキストを効果的に捉える技術として注目されています。本研究では、交差点認識に自己注意メカニズムを導入し、シーンの非局所コンテキストを探求します。提案するシステムは、第一人称視点 (FPV) モジュールと第三人称視点 (TPV) モジュールから成ります。FPV モジュールは交差点通過時の自己中心ビューを、TPV モジュールは交差点直前の単一ビューを使用します。自己注意メカニズムは、局所パターンが類似するため、TPV モジュールにおいて特に有効です。主な貢献は、TPV を用いた自己注意ベースのアプローチの提案、FPV と TPV の組み合わせによる性能向上、及び KITTI データセットでの実験による優位性の確認です。

#### (13) 自己中心マップと世界中心マップを用いた能動型ドメイン不変自己位置推定

視覚場所認識 (VPR) の次最良ビュー (NBV) プランナーの訓練は自律ロボットナビゲーションにおいて重要ですが、ターゲットドメインでの視覚経験収集は高コストです。本研究では、「ドメイン不変」NBV プランナーを提案し、CNN に基づく VPR サブシステムの状態認識能力を訓練に活用します。CNN モデルから得られる視覚キューを出力層キュー (OLC) と中間層キュー (ILC) に分類し、OLC は世界中心ビュー、ILC は自己中心ビューに利用します。ILC と OLC を状態ベクトルにマッピングし、深層強化学習でマルチビュー NBV プランナーを訓練します。NCLT データセットでの実験により、提案手法の有効性が確認されました。

#### (14) 相対属性埋め込みを用いた圧縮自己位置推定

本論文では、従来の絶対属性 (例：色、形状、テキスト) ベースの画像埋め込み手法とは異なり、ドメイン適応型のコンパクト画像記述子として相対属性 (例：美しい、安全、便利) ベースの画像埋め込みの利用を探求します。相対属性は、画像の主観的な評価や特性を反映するため、より柔軟で適応性の高い自己位置推定が可能となります。このアプローチでは、相対属性を用いて画像を圧縮し、自己位置推定の精度と効率を向上させることを目指します。

#### (15) 単一モーダル視覚場所分類へのマルチモーダルアプローチ

第一人称視点の単眼 RGB 画像による視覚場所分類は重要ですが、RGB 画像分類器は季節、天候、照明の変化によるドメインシフトに脆弱です。この問題に対処するため、RGB 画像と深度情報 (例：LIDAR、レーダー) を組み合わせたマルチセンサーフュージョンが提案されています。本研究では、最近の「ドメイン不変」単眼深度推定技術を利用し、擬似深度を追加モダリティとして活用することで、単一モーダル RGB 分類を擬似マルチモーダル RGB-D 分類に再構築します。RGB 画像と擬似深度データを自己監督方式で訓練し、これらを適切に処理、融合、分類するフレームワークを提案します。NCLT データセットによるクロスドメインシナリオでの実験で、提案フレームワークの有効性が確認されました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kanji Tanaka, Kousuke Yamaguchi, Takuma Sugimoto	4. 巻 26
2. 論文標題 Simultaneous Detection of Loop-Closures and Changed Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics	6. 最初と最後の頁 247-255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jaciii.2022.p0247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mitsuki Yoshida, Kanji Tanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Diagnosing Deep SLAM for Domain-Shift Localization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 724-729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII52469.2022.9708872	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koji Takeda, Kanji Tanaka, Yoshimasa Nakamura	4. 巻 1
2. 論文標題 Domain Invariant Siamese Attention Mask for Small Object Change Detection via Everyday Indoor Robot Navigation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	6. 最初と最後の頁 247-255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRoS47612.2022.9982196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazushi Aiba, Kanji Tanaka, Ryogo Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Detecting Landmark Misrecognition in Pose-Graph SLAM via Minimum Cost Multicuts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE 9th International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CIVEMSA53371.2022.9853684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanji Tanaka, Kousuke Yamaguchi, Takuma Sugimoto	4. 巻 26
2. 論文標題 Simultaneous Detection of Loop-Closures and Changed Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 247-255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jaciii.2022.p0247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morishita Yuudai, Hiroki Tomoe, Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Multi-query Diagnosis of Deep Self-localization Network via Reciprocal Rank Fusion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 627-632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Mitsuki, Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Diagnosing Deep SLAM for Domain-Shift Localization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 724-729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Deep SIMBAD: Landmark Ranking-based Scene Descriptor for Highly Compressive Self-localization Across Domains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Active Cross-domain Self-localization Using Pole-like Landmarks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 1188-1194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Active map-matching: Teacher-to-student knowledge transfer from visual-place-recognition model to next-best-view planner for active cross-domain self-localization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koji Takeda, Kanji Tanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Boosting Self-localization with Graph Convolutional Neural Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications	6. 最初と最後の頁 861-868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0010212908610868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuma Sugimoto, Yamaguchi Kousuke, Zhongshan Bao, Minying Ye, Hiroki Tomoe, Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Fault-Diagnosing Monocular-SLAM for Scale-Aware Change Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 276-283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEECONF49454.2021.9382715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Diagnosing Deep Self-localization Network for Domain-shift Localization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 298-303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEECONF49454.2021.9382702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kurauchi Kanya, Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Deep Next-Best-View Planner for Cross-Season Visual Route Classification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 25th International Conference on Pattern Recognition	6. 最初と最後の頁 497-502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICPR48806.2021.9412043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Kanji	4. 巻 1
2. 論文標題 Self-Supervised Map-Segmentation by Mining Minimal-Map-Segments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium	6. 最初と最後の頁 637-644
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IV47402.2020.9304724	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------