

自律移動マイクロロボット群制御のための機械学習によるロボスト自己位置推定

代表研究者 水上 雅人 室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授

1 はじめに

高度経済成長時代に構築された道路、橋梁等のインフラ設備の老朽化が顕著となり、設備点検を迅速かつ効率的に行うことが急務となっている[1]。インフラ点検では屋外で危険を伴う作業が多く、熟練者を必要とするが、少子高齢化により、作業不足が深刻な社会課題となっている[2]。プラント設備の配管は広大な敷地内を縦横無尽に敷設されていること、通信設備におけるトンネル内等では壁面との間が非常に狭い空間(図1)であることなどから、未だ人手による点検が主流であり、ロボットによる自動化が求められている。この課題に対して、我々は、ロボット自体を小型化したマイクロロボットを用いて、それらを群制御することにより、狭隘空間での作業や広大な場所の劣化点検作業を効率化する研究を進めてきた。このようなマイクロロボットを用いて、狭隘空間でしかも広大な範囲で、点検作業をさせるには、自律型群制御が必要となり、ロボット同士の通信技術及びそれぞれのロボットが自分でどの位置にいるかを知るという自己位置推定が重要なキー技術となる。

本研究では、ロボット群間通信により自律作業を行わせる際に必要となる、移動ロボットの自己位置推定技術の確立を狙いとした。カメラ撮影動画によるビジュアルオドメトリによる高精度な推定実現のため、機械学習を用いた路面状態推定を行い、照明や移動速度など動作条件の最適化手法について検討した。

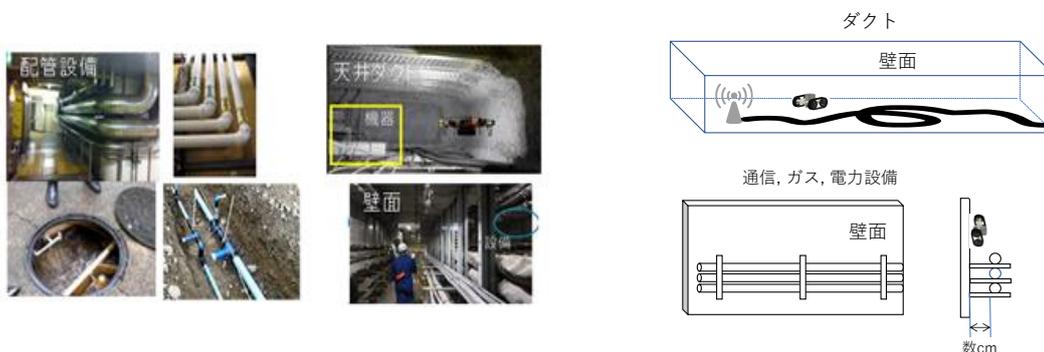


図1 インフラ設備例

2 移動ロボットのビジュアルオドメトリによる自己位置推定技術

点検作業の効率化を検討するためには、ロボット自身が自分の位置を知り、ロボット群間で位置情報を通信し、伝達することが必要となる。そのためには、まず自律移動ロボットが自己位置を精度良く推定することが必須となる。先行研究でインフラ点検用移動ロボット[3-5]、ロボット間通信[6-7]、移動ロボットの自己位置推定の研究[8-9]を推進し、ロボット小型化機構設計や無線通信に関する研究を進めてきた。ロボットの機構設計・制御の研究開発では、従来実用化されている点検用ロボットでは作業が困難であった、配管内や設備と壁面間の距離が非常に狭い狭隘空間での移動を可能にする直径65mm管内用マイクロロボットや小型壁面吸着マイクロロボットを実現した。また、群ロボット間の通信技術に関して、ロボットが複雑な管路を移動する際に障害となる配線を無くす無線技術の適用を検討し、管路壁を媒体とするマイクロ波通信の基本原理を実証した。

地下埋設インフラ構造物点検では、現状、手押し式測定台車型の移動機構に地中レーダを搭載したものが用いられる。地中レーダを用いた埋設物調査では、地面に描いた側線に沿って測定台車を移動させながら計

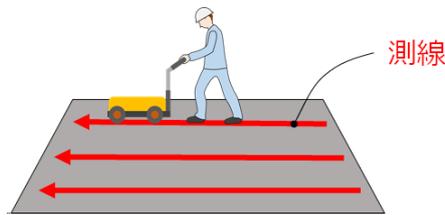


図2 人手作業による地中レーダ探査イメージ

測を行う(図2)。あらかじめ側線の位置を計測しておき、台車に取り付けられたロータリーエンコーダによって測定台車の移動量を測定し、測定台車の位置と地中レーダの計測データと対応付けることで、側線に沿った地中断面の様子が計測できる。この工程において、地中レーダを搭載した車輪移動型ロボットを導入する際には、2次元平面内において、ある基準点に対するロボット自体が置かれている相対位置を正確に知る必要があり、自己位置推定技術が重要となる。昨今のデジタルツイン実現の観点からはデジタルマップ上での設備位置を正確に記述するために、従手法と同程度以下であるセンチメートルオーダー以下の埋設物の位置検出が求められる。地下埋設物探査用レーダ搭載移動ロボットの実現を狙いとして、GNSSが使えない屋内や電波遮蔽物がある屋外でも移動ロボットの自己位置推定を可能とする路面動画像情報を用いた移動量推定に基づくビジュアルオドメトリの研究開発を進め、2次元自己位置推定がセンチメートルオーダーで実現可能となる見通しを得た。一方でビジュアルオドメトリに用いる特徴量数、状態によって、推定精度が大きく左右されることも分かった。特徴量抽出は精度向上に向けたキー技術となるが、特徴量抽出は、路面状態や移動速度、照明などの複合要因に影響される。特徴量抽出には複数の条件が関わっており、解析的に条件を算出するのは困難であるが、これらの複合条件を最適化する手法の確立は避けて通れない課題となる。特徴量算出に大きく影響すると考えられる、路面状態や移動速度、照明などの複合条件に関し、各種条件下で移動量推定ロバスト化を狙いに、機械学習技術を用いた特徴量抽出の最適化に関する検討を行った。本研究で想定した特徴量抽出の最適化手法イメージを図3に示す。

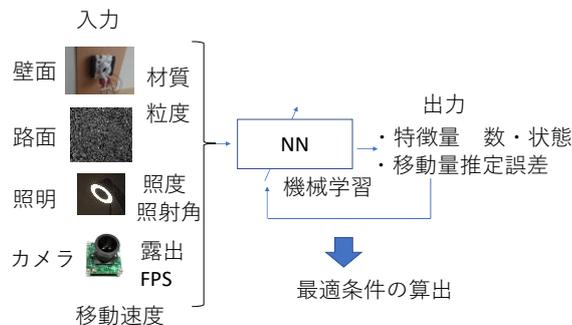


図3 最適化手法イメージ

路面状態に関しては、材質、粒度、表面の反射(乾燥、濡れ)などを、照明に関しては輝度、照射角度、カメラ撮影条件としてフレームレート、露出設定値などをパラメータとして、それぞれの特徴量及び推定精度誤差を測定する。その入出力データを基に機械学習により、最適条件を探索することを考えた。特徴量抽出には複数の条件が関わっているため、どの条件が最も関連性が高いかを機械学習手法を用いる際には明らかにする必要がある。最終的には、フィールド検証により、機械学習により最適化したパラメータが未学習のデータに対してどの程度有効となるかを検証し、実用化検討に向けたデータを蓄積するとともに、本手法の有用性について明らかにすることが目標である。

3 ビジュアルオドメトリによる自己位置推定

本研究でベースとなるビジュアルオドメトリは、移動ロボットの床面に設置したカメラを用いて、路面動画画像を取得し、取得フレーム間の特徴点画素移動量と床面距離情報から直接移動量を算出することにより、2次元平面内の自己位置推定を行う手法である(図4)。先行研究において、異なる2フレーム間の画像における特徴点検出を行い、各々の特徴点のペアを求めて、2フレーム間の移動量算出を行うアルゴリズムを提案し、累積誤差低減アルゴリズムを用いた場合の移動速度の影響を評価し、1軸自動ステージ実験により検証を行い、最適化等により0.6%程度の精度が得られることを確認してきた。本ビジュアルオドメトリ手法では、一定数以上の特徴点数算出と移動ベクトル算出の際のマッチングが重要となる。路面動画画像を用いた本自己位置推定方法のキーポイントはいかに特徴点を抽出するかと、移動量推定に用いる各フレーム間での特徴点ペアの最適抽出ということになり、RGB-Dカメラの撮影条件が推定精度に大きく影響を与えることが分かっている。路面に対するRGB-Dカメラの各種パラメータに関する撮影条件が自己位置推定精度に与える影響検討が、機械学習による撮影パラメータ最適化には必須となる。

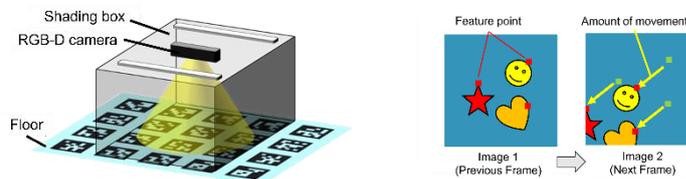


図4 路面動画画像を用いたビジュアルオドメトリ原理

4 撮影パラメータが特徴点算出に与える影響評価

まず始めに、機械学習を行うには、いわゆる「正解」「不正解」のデータを極力多く集める必要がある。正解として、撮影パラメータを変化させた時に得られる特徴点数に着目し、特徴点数が多く取得できた場合とした。この検証では、撮影パラメータが特徴点算出数にどう影響するかの検証が必要となった。そこでその影響を評価するため、図5に示す評価実験系を構築した。実験系は、輝度、設置位置可変可能なLED照明を設置した遮光ボックス(図6)をアルミフレーム、3Dプリンタ製作樹脂部品など用いて製作した。RGB-Dカメラ(Intel Realsense d455)を遮光ボックス内に実装し、動画画像情報を実験用計算機で取得可能とした。実験用計算機は、大量の動画画像を処理可能とするため、マルチコアCPUとGPUグラフィックボードを搭載したワークステーションを使用した。 μm オーダで位置決め制御可能な1軸自動ステージを使用し、自動ステージにRGB-Dカメラを取付けて、上部からアスファルトサンプル路面を撮影する構成とした。gain, brightness, contrast, gamma, sharpness, hue等の撮影パラメータに関して、各々のパラメータが特徴点数増減に与える影響を検証した。図7にこの実験系を用いて、特徴点を算出した結果例を示す。

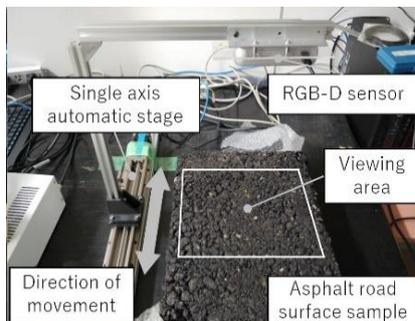


図5 評価実験系

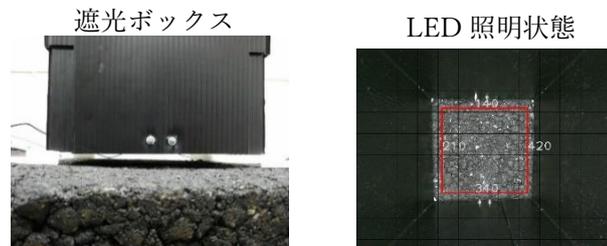


図6 遮光ボックス

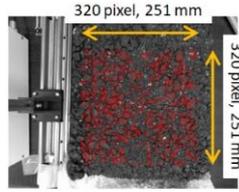


図7 特徴点算出結果

まず、露光条件について考察した。撮影画像がブレていると、カラー画像においては特徴点数減少、特徴点位置の信頼度低下が考えられ、深度画像においては深度精度の減少が考えられる。画像のブレは移動速度に対して露光時間が長いことで起こるため、露光時間当たりの移動速度ピクセル数が小さくなるように設定すればよく、0.5 以下にすることでブレが低減できると考える。露光時間を e [s]、移動速度を v [mm/s]、画素数の幅 w [pixel]、撮影範囲の幅 W [mm] とすると、1 [s] あたりの移動ピクセル数は $v \cdot w / W$ [pixel] である。 e [s] あたりの移動ピクセル数を 0.5 以下にすればよいので、 $e \leq \frac{W}{2vw}$ で露光時間を定めればよいと考えられる。また、深度分解能を向上させることで、姿勢角の誤差が抑えられることが確認されている。深度分解能の向上で、アスファルトの凹凸をより正確に読み取ることができ、各特徴点の移動ベクトルを pixel 単位から mm 単位に変換する際の誤差を減らすことができ、より精度よく mm 単位の移動ベクトルを得ることが出来たことから姿勢角の誤差が小さくなったと考えられる。同様に、深度分解能を向上させると位置の精度も向上すると考えられるため、深度分解能を出来る限り高めることとした。

ステージ実験系でのアスファルト路面サンプルからは特徴点が 700 点程検出されたが、屋外実験では同じ閾値で特徴点が 300 点程であり半分以下であった。原因として、カメラのピントやブレ等が考えられる。ステージ実験系では室内の照明によりアスファルト路面サンプルを照らしたが、一方、屋外実験系ではカメラは遮光ボックス内に取り付けられ、遮光ボックス内部の側面に張り付けた LED テープを用いて遮光ボックス内を照らした。この条件の違いにより、屋外実験ではピントが合った撮影が出来なかったと考えられる。対策として、遮光ボックス内の光量を増やす、撮影パラメータを変更する、画像処理を行うことが考えられる。撮影パラメータとしては露光時間を下げる、画像処理はガンマ補正やコントラスト調整を行う検討が必要なが分かった。

初期検討として、一つのパラメータを変化させて、特徴点数の変化を記録し、撮影パラメータが特徴点数に与える影響を1つずつ検証することとした。このとき、特徴点の検出しきい値を高い値に設定することで“特徴的な”特徴点のみが検出できるように設定した。変更を検証するパラメータとして、gain, brightness, contrast, gamma, sharpness について検証を行った。遮光ボックスを 12mm 程度路面から浮かせた状態とし、カメラ-路面間の距離を 330mm に設定した。

各パラメータを可変設定した場合の実験結果を図8～図13に示す。gain=128 のときに、最大の特徴点数が得られた。contrast が 60 で特徴点数が減少しているが contrast 大で画像が暗くなっていることに起因している。gain 大などと組み合わせることで特徴点数増加が見込める可能性がある (50→60 で特徴点数が増加している)。結果として contrast=100 に固定して、gain を変化させて、gain の変化のみではなく、contrast を高くした方が特徴点数を多くとれることがわかるため、contrast と gain のバランスが重要であることが確認された。

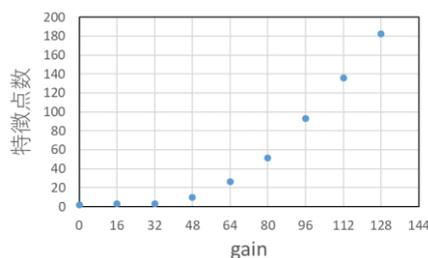


図8 gain パラメータ

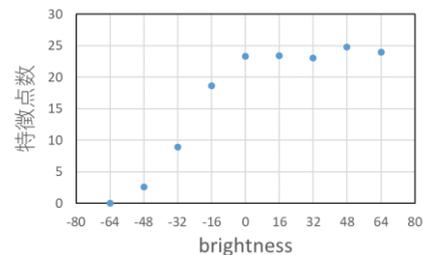


図9 brightness パラメータ

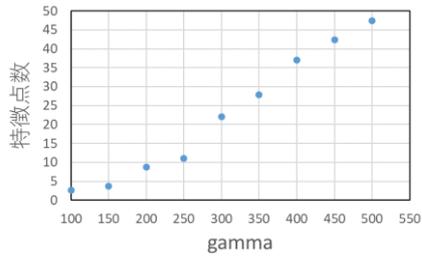


図 1 0 gamma パラメータ

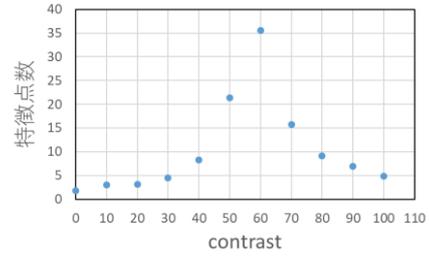


図 1 1 contrast パラメータ

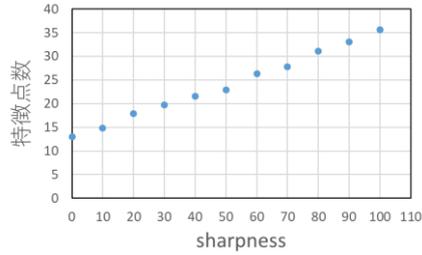


図 1 2 sharpness パラメータ

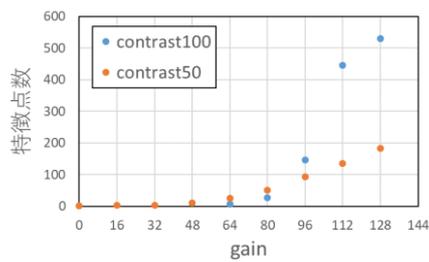


図 1 3 contrast パラメータ
2 水準での gain パラメータ

実験系の動作検証と各種撮影パラメータ間の因果関係を確認するために、以下の検討を進めた。動画の各種パラメータについて、どのパラメータが推定精度に大きく影響を与えるか、またそれぞれのパラメータの複合的要因も影響を考慮する必要がある。これら撮影条件を検証するために、多数パラメータを変化させた時に撮影を自動で行うプログラムとビジュアルオドメトリによる特徴点数を解析して得たデータを整理・統合する自動処理プログラムを作成した。実験系の動作確認のため、変化させる値を hue のみに絞り、一定間隔で値を変更したときの特徴点数の推移について評価した。この操作を 3 回行い、実験系が正常に機能すること、hue と特徴点数の関係を調査した。以下に hue と特徴点の関係の実験結果を散布図 (図 1 4) と箱ひげ図 (図 1 5) で示す。さらに表 1 に実験回数と特徴点数の関係を示す。

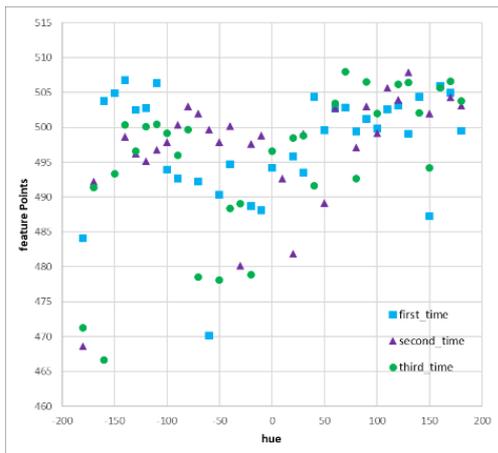


図 1 4 hue と特徴点の関係 (散布図)

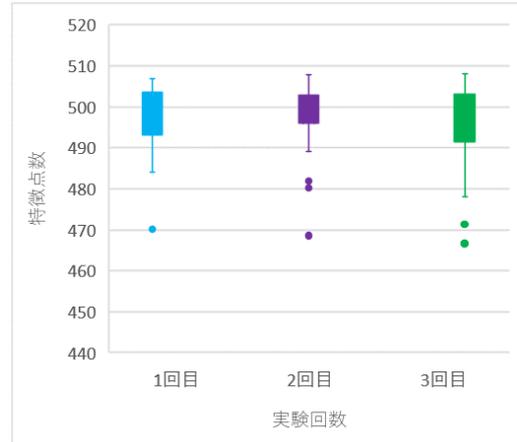


図 1 5 hue と特徴点の関係 (箱ひげ図)

表 1 実験回数と特徴点数の関係

実験回数	平均点数	標準偏差
1 回目	497.64	7.85
2 回目	497.23	8.08
3 回目	495.34	10.46

実験では、特徴点抽出数として、以下の結果が得られた。

- ・特徴点数は、496～505 付近でまとまっている。
- ・特徴点数と hue には正及び負の相関は見られない。
- ・いずれも最高特徴点数は 508 付近である。
- ・いずれの平均点も 495～500 の内である。
- ・1 回目は 1 個、2 回目は 2 個、3 回目は 3 個の外れ値が、いずれも最小値よりも下に確認された。

特徴点数は、496～505 付近でまとまっている。特徴点数と hue には正及び負の相関は見られない。いずれも最高特徴点数は 508 付近である。いずれの平均点も 495～500 の内である。1 回目は 1 個、2 回目は 2 個、3 回目は 3 個の外れ値が、いずれも最小値よりも下に確認された。本実験では、色相が特徴点数に与える影響は見られなかった。すなわち、色相は多目的最適化検討においては排除してもよさそうなパラメータであることが確認できた。今回は hue のみを 1 軸的に変化させたが、他の 7 パラメータも同時に、つまり 7 軸的にパラメータを変化させた場合に相互影響を受け、hue も特徴点数に対して影響を与える可能性があることから、相互相関に関する検討が必要となった。

5 撮影パラメータ間の相関関係検討

ここでは、各種パラメータの相関関係について実験により検証することとした。ビジュアルオドメトリによる自己位置推定の精度決定要因として、特徴点の取得数と特徴点の誤マッチングがあり、前者は、より多く、後者は、より少ないほどビジュアルオドメトリが高精度化できることになる。よって、本検討課題としては、特徴点数と誤マッチング数の多目的最適化を行う必要がある。

まずは特徴点数に着目し、各パラメータと特徴点数の相関関係を求め、パラメータの探索範囲を限定した後、後者を用いて、照明や路面状態の影響を考慮した撮影条件の多目的最適化を行い、精度向上を図ることとした。特徴点に関し、グリッドサーチによるパラメータ探索と目標パラメータ以外の条件均一化により、相互影響を含めた各パラメータと特徴点数の相関関係を検証した。図 1 6 に示すフローチャートにより、4 回のパラメータ設定範囲を変化させた実験結果を表 2 に示す。最低特徴点数が上昇し、特徴点数の安定取得が可能であることを確認した。表 2 の実験結果をもとに、特徴点数が多く取得できるパラメータの組み合わせを用いて、カメラ移動させ、ビジュアルオドメトリによる移動量推定実験を行った。1 軸自動ステージを片道 100[mm]、移動速度 50[mm/s] で移動させて、真値とビジュアルオドメトリによる推定結果を比較した。

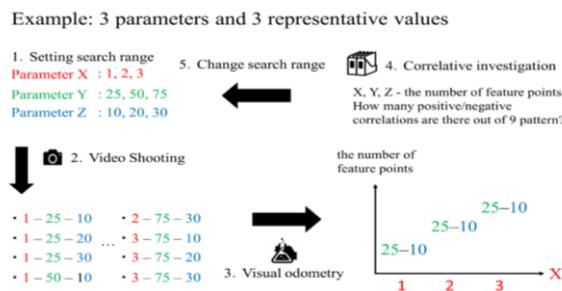


図 1 6 相関関係取得実験におけるフローチャート

表2 パラメータ設定範囲変更実験結果

Initial Parameter pattern		Result Parameter pattern	
Gain	32, 64, 96	Gain	80, 100, 120
Brightness	32, 0, 32	Brightness	10, 20, 30
Contrast	25, 50, 75	Contrast	50, 65, 80
Gamma	100, 200, 300	Gamma	300, 330, 360
Hue	90, 0, 90	Hue	0
Saturation	25, 50, 75	Saturation	0, 10, 20
Sharpness	25, 50, 75	Sharpness	50, 60, 70
Feature points (MIN, MAX)	12.06, 810.53	Feature point (MIN, MAX)	535.67, 789.56

表3 探索範囲内で最も誤差が小さい場合のパラメータと誤差率

Gain	Brightness	Contrast	Gamma	Hue	Saturation	Sharpness	Error (%)
100	10	65	330	0	0	50	1.32

探索範囲内で最も誤差が小さい場合のパラメータとそのときの誤差率を表3に示す。誤差は1.32%であり、先行研究での誤差よりは大きくなった。原因としては、特徴点数の増加を優先したため、その分、誤マッチングが増加したためであると推察される。誤差率に対する高評価サンプル抽出の繰り返し等で精度を上げていくことが必要と考えられる。

6 おわりに

本研究では、特徴量算出に大きく影響すると考えられる、路面状態や移動速度、照明などの複数の条件に関し、各種条件下で移動量推定をロバスト化するための機械学習技術を用いた特徴量抽出の最適化を狙いとして、膨大なパラメータから、最適化検討に必要なパラメータを見極めるため、まずは動画像の各種パラメータについて、どのパラメータが推定精度に大きく影響を与えるかについて検証を進めた。その結果、最適化検討において、特徴点数算出への影響が少なく、考慮する必要がなさそうなパラメータを導き出すことができ、実験の負荷を大きく下げられそうな見通しを得た。さらに、各種パラメータの相関関係を実験により検証した。特徴点の安定取得を可能にするパラメータ設定範囲を明らかにした。しかしながら、今回の実験ではビジュアルオドメトリによる移動量推定誤差の改善までは確認できなかった。

今後は、特徴点数と誤マッチングの関係を検証し、照明条件や路面状態の影響を考慮した機械学習手法等を多目的最適化に適用する検討を進めていく。

【参考文献】

- [1] 国土交通省:II-2-2-1 社会資本の老朽化の現状, 令和元年版 国土交通白書, p. 110, 2020
- [2] 国立社会保障・人口問題研究所: “日本の将来推計人口”, 人口問題研究資料第 336 号, 2017
- [3] 水上, 原田, 花島, 藤平, “全方位移動機構型細径管路内点検用ロボットの移動制御方法の検討”, 精密工学会誌, Vol.86, No.11, pp.898-903 2020
- [4] S.Mikami, M.Mizukami, N.Hanajima and Y.Fujihira, ”Miniaturized omni-directional mobile mechanism for pipe inspection robots operating in a small and narrow space, Proc. of the 8th ASPEN, C200021, 2019
- [5] 水上,高橋,小野瀬,花島,藤平, “小型壁面移動機構の設計と実験評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.119, No.84, pp.7-12, 2019
- [6] 水上, 山口, 村田, 枚田, ”インフラ点検用小型管内走行ロボットの管路壁を媒体とした通信制御の検討”, 日本ロボット学会学術講演会 2022 講演論文集, 3G2-04, 2022

- [7] 水上,村田,枚田, “小型管内走行ロボット間の管路壁を媒体としたマイクロ波通信に関する基礎的検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD2022-8, pp.21-26, 2022
- [8] 蝦名,小坂井,水上,望月, “路面動画像を用いたインフラ点検用移動ロボットの 2 次元相対測位アルゴリズム”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2I3-07, 2022
- [9] 蝦名,安田,水上,花島,藤平, “路面動画像情報を用いた屋外移動ロボットの 2 次元移動量推定”, ROBOMECH'21 講演論文集, 1A1-G14, 2021

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
地下埋設物点検用移動ロボットの路面動画像センシングによる自己位置推定検討	電子情報通信学会信学技報, EMD2023-28, pp. 83-88 (2023) 電子情報通信学会	2023 年 8 月
屋外移動ロボットの自己位置推定におけるビジュアルオドメトリ撮影条件の最適化検討	電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12B-20 (2024)	2024 年 3 月