

測距センサを使用した環境知能化による 振動ローラの転圧作業の自動化

菊地一徳^{*1}, 永谷圭司^{*2}, 小松智広^{*1*3}, 桐林星河^{*4}, 浅野公隆^{*5},
柴田幸則^{*6}, 大野和則^{*1}, 鈴木高宏^{*1}, 平田泰久^{*1}

Autonomous surface compression work by vibration roller using environment-installed laser range finders

Kazunori KIKUCHI^{*1} and Keiji NAGATANI^{*2}, Tomohiro KOMATSU^{*1*3},
Seiga KIRIBAYASHI^{*4}, Kimitaka ASANO^{*5}, Yukinori SHIBATA^{*6},
Kazunori OHNO^{*1}, Takahiro SUZUKI^{*1}, Yasuhisa HIRATA^{*1}

^{*1}Tohoku University, 6-6-10, Aramaki-Aoba, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{*2}The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

^{*3}Kowatech Co., Ltd., 5-18-18, Samukawa-Ichinomiya, Kozagun, Kanagawa 253-0111, Japan

^{*4}SEQSENSE Inc., 2-2-3 Uchisaiwaichou, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0011, Japan

^{*5}Sanyo-Technics Co., Ltd., 3-1-40, Nigatake, Miyagino-ku, Sendai, Miyagi 983-0036, Japan

^{*6}Sato Koumuten Co., Ltd., 69, Kami-Nagadan, Kamigun, Miyagi 981-4337, Japan

In the construction industry of Japan, the number of labors, particularly experienced labors, is decreasing by decreasing birthrate and aging population. In addition, the number of death in the construction industry is one-third of the number in all industries. To resolve the above problems, autonomous construction system has been researched by various companies and research institutes. In this research, we aim at the realization of autonomous surface compression work by vibration roller with environment-installed sensors. Our approach is to install plural LiDARs (Light Detection and Ranging) in the work field and estimate the position of vibration roller. In this paper, we propose a position estimation method based on the environment-installed LiDARs, path planning for a vibration roller, and path tracking control of it. Furthermore, we conducted indoor experiments to confirm the proposed system using the original 1/10 vibration roller model and outdoor experiments to confirm the accuracy of position estimation method in real-time using an actual vibration roller.

Key Words : Autonomous Construction Work, Vibration Roller, Environmental Intelligence

1. 緒 言

日本の産業は、少子高齢化による労働力不足や熟練者不足が問題となっている。特に建設業における労働者不足は深刻で、高齢化も進んでいる。さらに、建設業においては、死亡者数が日本の産業全体の3割以上を占め、安全性の確保が重要な課題となっている。建設機械に対する安全管理や教育は義務付けられているが、近年、死傷者数は減らないのが現状である。

これらを解決する手段として、IoT (Internet of Things) 技術を活用した安全性を高める技術が提案されている。例えば、車両と作業員の接近が検知されると、車両内のディスプレイやブザーで警告するシステムがある⁽¹⁾。しかし、判断は作業員に委ねられている上、特定の作業員のみでの安全確保しかできない。一方、大手建設会社や建設機械メーカーは、建設作業の自動化の研究開発に取り組んでいる⁽²⁾。これらの技術は、作業現場全体で自動化システムを導入し、人を立ち入らせないことで安全性を確保している。しかし、建設業全体の9割以上を占める中小企業においては、全自動化システムの導入は、莫大な費用がかかる上、完全無人化の作業現場を作ることは難しい。

これらを踏まえ、近年、一般の建設機械の、後付け装置による自動化に関する研究開発が進んでいる。著者らの研究グループでは、脱着可能な簡易装着機器に

^{*1} 東北大学 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-10) kazunori@frl.mech.tohoku.ac.jp

^{*2} 東京大学 (〒 113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1) keiji@i-con.t.u-tokyo.ac.jp

^{*3} コーワテック株式会社 (〒 253-0111 神奈川県高座郡寒川町一之宮 5-18-18) komatsu@kowatech.co.jp

^{*4} SEQSENSE 株式会社 (〒 100-0011 東京都千代田区内幸町 2 丁目 2-3) seiga@ieee.org

^{*5} 三洋テクニクス株式会社 (〒 983-0036 仙台市宮城野区苦竹 3 丁目 1-40) kimitaka.asano@sanyo-tec.co.jp

^{*6} 株式会社 佐藤工務店 (〒 981-4337 宮城県加美郡加美町字長檀 69) shibata@satokoumuten-1977.co.jp

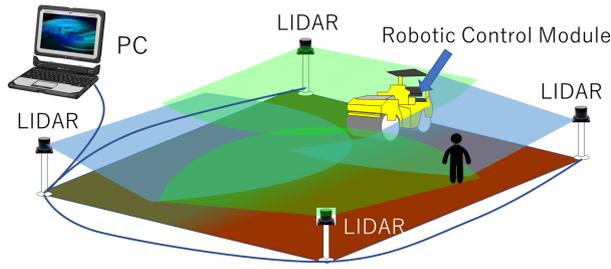


Fig. 1 Concept of automated system

よる六輪ダンプトラックの自動化を行ってきた⁽³⁾. この技術に応用することにより, 建設作業に必須とされる振動ローラの自動化も期待できる. 振動ローラとは, 決められた作業領域で, 盛土した地面の締め固めを行う建設機械である. この振動ローラの作業は, 前後進を繰り返すため, 後進時に操縦者の視野が大きく妨げられ, 作業員との接触事故が少ない. 一方, 振動ローラの自動化においては, 普通自動車や建設機械の自動化⁽⁴⁾⁽²⁾で一般的に利用される GNSS (Global Navigation Satellite System) を使用した自己位置推定がこれまで行われてきた⁽⁵⁾. しかし, GNSS は, 建設作業が行われるような山間部や橋の下などでは, 衛星を十分に取得できないことや, 崖の近傍におけるマルチパスによる精度低下などが懸念される. さらに, 振動ローラにおいては, 作業時にローラを大きく振動させるため, 搭載センサの故障が誘発される恐れがある.

以上より, 本研究では, 後付けによる一般の振動ローラの無人操縦化を行い, GNSS を使用せずに, 環境知能化, 具体的には環境中に配置したセンサを用いることにより, 自己位置推定を行うことで, 振動ローラの自動化を目指す. 本研究が実現を目指すシステムの構成図を図 1 に示す.

2. 後付け装置による振動ローラの自動化の提案

振動ローラの転圧作業は, 決まった領域内で行われるため, 領域内に測距センサを設置することで, 振動ローラの自己位置推定ができると考えられる. また, 設置した LiDAR により振動ローラ周囲の環境認識を行い, 人や他の建設機械の接近を検知し, 振動ローラの動作を制御することで, 衝突に対する安全性が確保できると考えられる. 測距センサは, 振動ローラの作業領域全体での距離情報を高精度で取得できる LiDAR (Light Detection and Ranging) を使用する.

本研究における振動ローラの自動化は, 大きく以下の 4 つの項目により実現を目指す.

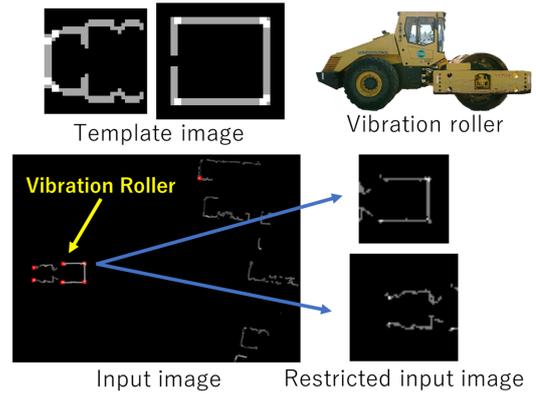


Fig. 2 Template image and Input image

1. 振動ローラの無人操縦化
2. 複数測距センサによる振動ローラの自己位置推定
3. 振動ローラ作業経路生成と経路追従制御
4. 測距センサによる振動ローラ周囲の環境認識

本稿では, 以上の項目の中で, これまでに完了している 2 の自己位置推定と, 3 の経路生成・経路追従手法について述べる. なお, 位置推定の精度目標は, 振動ローラの転圧面の重なりを表すラップ幅を参考に, 自己位置推定で $\pm 0.1\text{m}$, 経路追従を含め最大 $\pm 0.3\text{m}$ と設定した. また, 自動化実現を目指す振動ローラの設定作業領域は, 平均的な工事と同程度の $50\text{m} \times 30\text{m}$ に設定する. 加えて, 本稿において自動化を対象とする振動ローラは BOMAG BW225D-3 とする.

3. 複数 LiDAR による自己位置推定手法

3.1 テンプレートマッチングによる自己位置推定

振動ローラの自己位置推定は, 対象領域の端に設置した LiDAR が取得する距離情報を利用した, テンプレートマッチングによる手法を基に行う⁽⁶⁾. テンプレートマッチングとは, 探索したい対象をテンプレート画像として作成し, 入力画像の中から探索する手法である. 本研究では, テンプレートマッチングの手法である式 (1) で表される NCC (Normalized Cross Correlation)⁽⁷⁾ を使用し, 振動ローラの自己位置推定を行う.

$$S = \frac{\sum_{x',y'} (T(x,y) \cdot I(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x,y)^2 \cdot I(x+x',y+y')^2}} \quad (1)$$

ここで, S は類似度, T はテンプレート画像, I は入力画像, x,y は探索位置, x',y' は探索開始位置を表す.

振動ローラの自己位置推定においては, 振動ローラが, 前部と後部が屈折するアーティキュレート型であるため, 振動ローラの位置と屈曲角度を推定する必要がある. そこで, 図 2 に示すように, テンプレート画像を振動ローラの前部と後部, 別々に作成する. テ

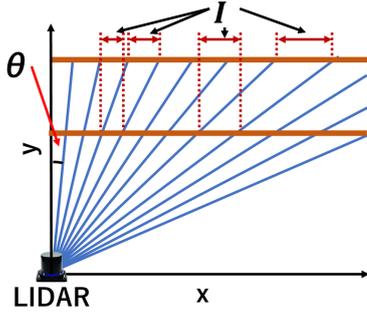


Fig. 3 Interval of laser spot of LiDAR

ンプレート画像は、回転させながら探索することで、振動ローラの位置と、前部と後部それぞれの傾きを推定し、その差から屈曲角度を推定する。なお、テンプレート画像と入力画像は、0.1mの解像度と設定した。加えて、テンプレート画像の回転分解能は、LiDARの測距情報誤差による限界を考慮し、0.017radとする。

テンプレートマッチングによる自己位置推定において、本研究では、リアルタイムでの自己位置推定が求められる。しかし、一般にテンプレートマッチングは計算量が多いため、いくつかの探索時間の削減手法が提案されている⁽⁸⁾。本研究では、LiDARによる測距時に高い反射強度を得られる再帰反射テープを振動ローラに貼付し、その位置を参考にしたテンプレートマッチングの探索領域の制限を行うこととした。図2に示すように、入力画像から赤点で表した高反射強度点を参考に、前部・後部それぞれで探索範囲を制限している。これにより、テンプレートマッチングの探索時間を短縮し、リアルタイムでの振動ローラの自己位置推定が期待できる。また本稿では、高反射強度点を、テンプレート画像と入力画像にも使用し、3値画像でのテンプレートマッチングを行うこととした。高反射強度点は、通常の測距点よりも確実に取得できるため、測距情報の変動に対してもマッチングの向上が期待できる。

3.2 LiDARの配置・台数と選定 前述した自己位置推定手法が実現可能な、LiDARの配置と台数、使用するLiDARの性能を検討する。なお、この設置場所は安全性を考慮し、振動ローラの作業経路の途中や振動ローラの進行方向への設置を避ける。また、LiDARの台数は、作業領域全体で対称性を保つように、偶数台として検討する。

LiDARは、図3に示すように、レーザと振動ローラ間の距離拡大及び、レーザと振動ローラのなす角 θ の拡大によって測距間隔 I が拡大する。これにより、LiDARから得られる測距情報の密度が低下し、振動ローラの形状が十分に取得できなくなる可能性がある。

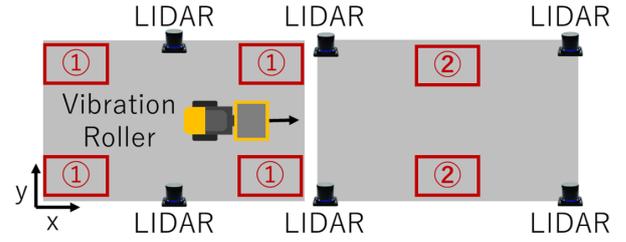


Fig. 4 Position of LiDARs

これらを踏まえ、

1. LiDARの距離情報精度

2. LiDARの測距間隔に対する角度分解能

の2項目によりLiDARの選定ならびに、配置と台数について検討する。

LiDARの距離情報精度は、LiDAR固有に定まる測距可能距離と距離精度によって決まる。自己位置推定を実現するためには、振動ローラが測距可能な距離にあり、かつ求める距離精度が得られる必要がある。本研究においては、目標とする最大50mの位置で、目標精度の $\pm 0.1m$ 以下が得られるLiDARが必要である。

一方、LiDARの測距間隔に対する角度分解能は、LiDAR固有に定まる角度分解能によって決まる。センサからの振動ローラへの照射点に対する測距間隔は、式(2)で表す。

$$I = \frac{y}{\tan(\tan^{-1} \frac{y}{x} - \frac{\theta}{2})} - \frac{y}{\tan(\tan^{-1} \frac{y}{x} + \frac{\theta}{2})} \quad (2)$$

ここで、 I は測距間隔、 x 、 y は照射点の直角座標系の位置、 θ はLiDARの角度分解能である。式(2)を角度分解能 θ について解くと、式(3)で表せる。

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-y(x^2 + y^2) + y \sqrt{(x^2 + y^2)^2 + x^2 I^2}}{x^2 I} \right) \quad (3)$$

式(3)より、作業領域内でテンプレートマッチングの類似度が最も低下する位置と、その位置での任意の最低測距間隔 I を設定することで、必要なLiDARの角度分解能が得られる。

本研究の設定作業領域において、LiDARの配置と台数を検討する。検討は、LiDARの台数が2台の場合と4台場合の2パターンで行う。なお、LiDARと振動ローラは図4の y 方向に少なくとも1mのマージンを取るとする。

まず、LiDARの台数が2台の場合を検討すると、作業領域全体で最も振動ローラの形状が取得しやすい配置は、図4のような、上下端の中央の位置である。この配置において、類似度が最も低下するのは図4の①に示す位置であり、理論値で必要十分な類似度を出せ

る測距間隔を 0.3m とすると、角度分解能は式 (3) より、 $0.479 \times 10^{-3} \text{rad}$ となる。なお、この角度分解能は LiDAR の限界値に近いので、2 台の場合はこの配置のみが有効であると考えられる。

次に、LiDAR の台数が 4 台の場合を検討すると、作業領域全体で最も振動ローラの形状が取得しやすい配置は、図 4 のような、領域の角の位置である。この位置において、類似度が最も低下するのは、図 4 の②に示す位置であり、理論値で必要十分な類似度を出せる測距間隔を 0.8m とすると、角度分解能は式 (3) より、 $1.278 \times 10^{-3} \text{rad}$ となる。

以上により、ここで計算された性能以上の LiDAR を選定し、適切な配置・台数とすることで、設定作業領域での自己位置推定が実現できる。

4. 作業経路生成と経路追従制御手法

4.1 経路追従制御手法 振動ローラの経路追従は、前述した手法により推定した自己位置を用いて行う。経路追従においては、目標経路へ追従させる振動ローラ的位置 (追従点) を決定する必要がある。振動ローラの走行では、前後進を繰り返してローラ部分で転圧を行うため、ローラ部分の走行経路が重要である。このことから、前進に対しては、振動ローラ前部のローラ中心を追従点とする。一方で後進時は、振動ローラは後部が 2 輪のアーティキュレート型であるため、前部を追従点として追従させることが難しい。そこで、後進時は、追従点を後部中心に変えて追従を行うこととする。

振動ローラは、後部に二輪の駆動輪と、前部と後部を繋ぎ屈曲する関節を持ち、操縦席の前後進レバーにより走行速度を、ステアリングハンドルにより屈曲角度を操作することができる。このことから、追従制御は、振動ローラの走行速度と、屈曲角度に対して行う。実際の現場では、振動ローラの平均速度が約 2km/h と低速であることから、走行制御は、比例制御のみとし、目標速度を定数とする。ステアリング制御は、以下の式 (4) で行う⁽⁹⁾。

$$(\sigma(t + \Delta t))^{ref} = \sigma(t) - (k_\omega \omega + \frac{v}{L} k_\theta \theta + k_\eta \eta) \Delta t \quad (4)$$

ここで、 σ は屈曲角度、 ω は角速度、 θ は経路の向きと振動ローラの向きの差、 η は経路と振動ローラの自己位置、 $k_\omega, k_\theta, k_\eta$ はそれぞれのゲインを示す。 t は現在の時間、 Δt は時間間隔を示す。また、 v は振動ローラ速度、 L はホイールベースである。

4.2 経路生成手法 振動ローラの経路は、決められた回数、作業領域を一様に転圧する経路となる。実際の作業において、これを実現する走行は、直線の

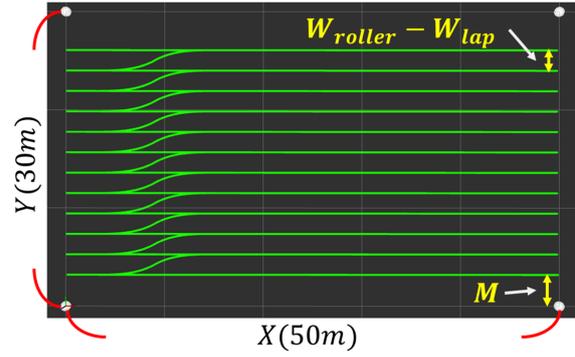


Fig. 5 Generated path

前後往復走行と経路移行走行である。

直線の前後走行経路は、作業領域、マージン (M)、振動ローラのローラ幅 (W_{roller})、転圧面の重なりを示すラップ幅 (W_{lap}) を基に、式 (5) から直線の前後往復本数 N を算出することで、作業領域を一様に満たす直線経路を生成する。

$$N = \frac{L_{ver} - M * 2}{W_{roller} - W_{lap}} \quad (5)$$

ここで L_{ver} は、振動ローラ進行方向に対しての垂直方向の作業領域の長さである。また、直線経路の生成では、前後進で追従点が異なるため、別の経路を生成する必要がある。したがって、前進と後進でホイールベースだけずらした経路となり、ローラ中心と後部中心がそれぞれ指定した作業領域内に収まるように経路生成する。

直線乗り換えを行う際の経路移行曲線は、式 (6) で表されるクロソイド曲線により生成する。

$$X_c = A\sqrt{2\tau} \int_0^\tau \cos t^2 dt, \quad Y_c = A\sqrt{2\tau} \int_0^\tau \sin t^2 dt \quad (6)$$

クロソイド曲線は、曲率が線形に変化し滑らかな軌道となるため、移動物体ではクロソイド曲線を使用した曲線経路が提案されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。本研究では、複雑な通過点は指定せず、直線からクロソイド曲線に入り最小旋回半径に達する曲率 R まで生成する ($0 < R < R_{max}$)。次に、その地点から 180 度回転した同じクロソイド曲線を生成し ($R_{max} > R > 0$)、次の直線に移行する経路を生成する。式 (7) は、 X, Y が生成経路を表し、 ϕ がクロソイド曲線の向き (0 or π)、 X_s, Y_s はクロソイド曲線のスタート位置である。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

図 5 に、生成した経路例を示す。パラメータは、作業領域を 50m x 30m、マージン 2m、振動ローラの幅

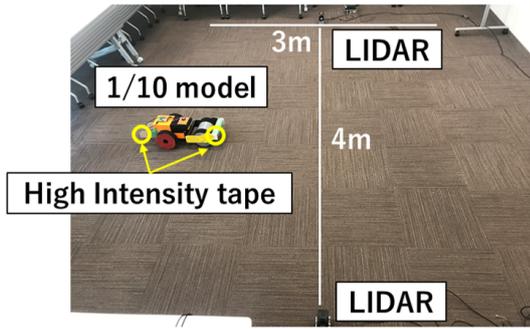


Fig. 6 Experimental Environment for 1/10 model

2.38m, ラップ幅 0.3m と設定した. また経路の最小旋回半径は, 振動ローラの実際の走行時の屈曲角度から, 式 (8) により幾何学的に求めた最小旋回半径を基に決定する.

$$R = \sqrt{\frac{l_1^2 + 2l_1l_2 \cos \theta + l_2^2}{\sin^2 \theta}} \quad (8)$$

ここで, R は旋回半径, θ は屈曲角度, l_1, l_2 は前部中心及び後部中心からステアリング中心までの長さである. 算出された旋回半径から, 振動ローラの転圧走行は, 屈曲角度が機械限界に達することが多くあった. このことから, 経路の最小旋回半径は, 機械限界が適切であると考えられ, 対象振動ローラの機械限界 5.6m とした.

5. 検証実験

前章にて, 提案した手法を実装し, 検証実験を行った. 走行制御に関する検証実験は, 著者らが開発した実機の振動ローラの 1/10 サイズのモデル (1/10 振動ローラ) を用いて行った. また, リアルタイム自己位置推定については, 実機の振動ローラによる精度評価実験を行った. 2つの実験において, 位置推定ならびに走行制御の実装は, ROS (Robot Operating System) を使用し, 1/10 振動ローラと実機振動ローラは, スケールとテンプレート画像のみが異なる同一の手法・実装とする. なお, 自己位置推定の真値を計測する方法として, 1/10 振動ローラと実機の振動ローラ共に, トータルステーションにより測定可能な, 振動ローラ前部に設置したプリズムの位置を使用する.

5.1 1/10 振動ローラによる検証

5.1.1 実験環境 1/10 振動ローラは, RaspberryPi3 を搭載し, ROS を介して, 後部の 2 輪の Dynamixel MX-28, ステアリング部分の Dynamixel MX-64 を制御することができるものである. 実験は, 図 6 のように 3m×4m の領域で 2 台の LiDAR を用いて行った. また, 1/10 振動ローラには, 図 6 に示した位

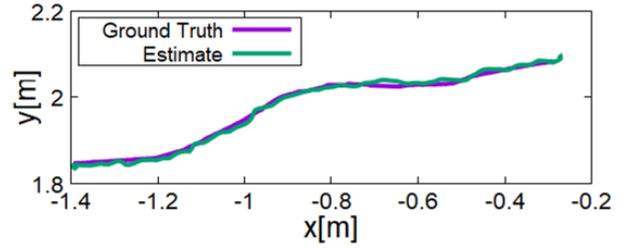


Fig. 7 Position estimation for 1/10 model

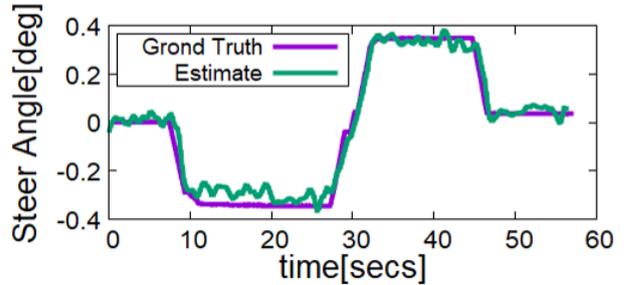


Fig. 8 Steering angle estimation for 1/10 model

置に, 再帰反射テープを貼付する. LiDAR は, 北陽電機株式会社の 2 次元測距センサ UTM-30LX (TopURG) を使用することとした. 2 台の TopURG は, 図 6 に示すように, 距離を約 4m 離して設置し, レーザの投光部の高さ and 振動ローラの前部の面の高さを合わせた. TopURG の位置については, 2 次元座標系の位置とヨー方向の回転角を算出するキャリブレーションを行った. キャリブレーションは, 2 台の LiDAR から見える 2 つ以上のキャリブレーション対象点の位置が, 1 つの座標系上で一致するようにした. 自己位置推定ならびに経路生成・追従の処理は, Toughtbook CF-33 で行い, LiDAR は USB を介して接続する. 算出された制御信号は, 無線通信を介して 1/10 振動ローラに送信される.

5.1.2 自己位置推定の検証 図 7 に, 1/10 振動ローラの経路移行走行時の, 真値と推定値の走行軌跡を示す. また, 図 8 には, ステアリングを最大まで左右交互に切った時の, 真値となるアクチュエータから得た屈曲角度と推定値の角度を示す.

位置推定では誤差が, 3σ の標準偏差で, x 軸方向 0.023m, Y 軸方向 0.019m と, 高い精度で推定できることを確認した. 誤差の要因としては, LiDAR の測距精度 ± 0.03 m, テンプレートマッチングの解像度 0.01m が大きく影響したと考えられる.

屈曲角度推定では誤差が, 平均で左右それぞれ, -0.043 rad, 0.005 rad と, 大きくなった. 誤差の要因としては, LiDAR の測距精度 ± 0.03 m が大きく影響し

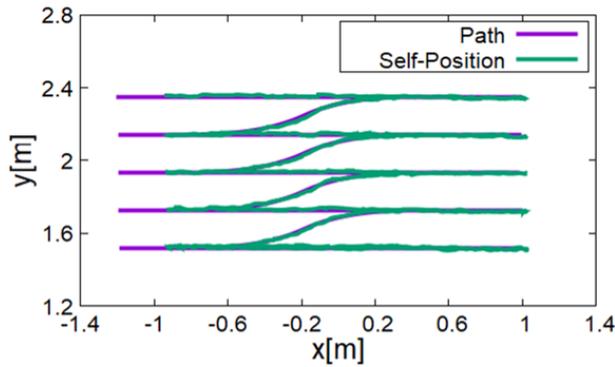


Fig. 9 Path tracking result

たとえられる。例えば、振動ローラの前部側面の線分で考えると、線分が水平であっても、垂直方向にLiDARの測距情報が $\pm 0.03\text{m}$ ずれると、線分の傾きは、最大で約 0.115rad 誤差が生じる。これにより、屈曲角度推定の精度が低下すると予想される。ただし、実機の振動ローラでは、この要因による誤差は小さくなるため、高い精度での推定が期待できる。

5.1.3 経路追従制御の検証 図9は、生成した経路と提案手法による振動ローラのローラ中心の自己位置推定値の走行軌跡を示す。経路は、 $2.2\text{m} \times 1.5\text{m}$ の領域を指定し、ローラ幅 0.238m 、ラップ幅 0.03m 、マージン 0.2m 、最小旋回半径 0.78m (1/10振動ローラの機械限界)として生成した。振動ローラにおいては、ローラが指定作業領域全体を転圧したかが重要であるため、精度評価はローラ中心で行う。したがって、図9の約 $x=-1\text{m}$ 以下の経路は、後部中心が走行する経路のため、ローラ中心は通過しない。

走行試験の結果、生成経路と自己位置の誤差は、 3σ の標準偏差で、 0.014m と高い精度で推定できることを確認した。誤差の要因としては、1/10スケールでは屈曲角度推定の誤差が大きいことや、直線往復経路の終端での停止誤差が考えられる。この結果より、実機においても自己位置推定の精度と合わせ、ラップ幅 $\pm 0.3\text{m}$ 以内の結果が期待できる。

5.2 実機振動ローラによる検証

5.2.1 実験環境 実機の振動ローラは、本稿で対称とするBOMAGのBW225D-3を使用する。実験は、図10に示すように、設定作業領域の3分の1の $17\text{m} \times 30\text{m}$ で、2台のLiDARを設置し実験を行った。また、振動ローラには、図10に示すように、再帰反射テープを振動ローラ前部の各面に2枚ずつ合計6枚貼り、後部には4枚貼付する。LiDARは、Quanergy社製のM8を使用した。M8は、上下方向に角度の違う8本のレーザを照射することができるため、3次元の測距データを取得することができる。ただし本実験では、

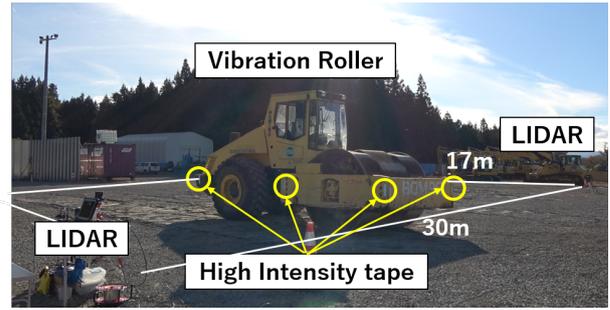


Fig. 10 Target experimental environment

自己位置推定に必要な水平方向のレーザのみを利用する。2台のLiDARは、図10に示すように、約 30m の距離を離して設置し、レーザの投光部と振動ローラに貼付した再帰反射テープの高さに合わせた。なお、実験フィールドは、屋内と異なり水平ではないため、地面の傾きと同じになるようにLiDARの設置角度を調節した。LiDARの位置は、1/10振動ローラによる実験と同様の方法でキャリブレーションを行った。自己位置推定は、Toghtbook CF-33で処理し、LiDARはPOEを介して接続する。

5.2.2 自己位置推定の検証 図11に、実際の振動ローラの走行を模して往復走行をさせたときの真値と推定値の走行軌跡を示す。また、図12には、ステアリングを最大まで左右それぞれに切った時の、真値と推定値の角度を示す。なお、この時の屈曲角度の真値は、実機振動ローラでは直接屈曲角度を得られないため、ステアリングを最大に切りながら走行したときの円軌道から算出した。

位置推定の結果、誤差が、 3σ の標準偏差で、x軸方向 0.099m 、Y軸方向 0.096m と、目標の 0.1m を達成する高い精度で推定できることを確認した。誤差の要因としては、LiDARの測距精度 $\pm 0.03\text{m}$ 、テンプレートマッチングの解像度 0.1m が大きく影響したと考えられる。また、1/10振動ローラよりも精度が低下した要因については、LiDARの測距精度の影響が小さくなるのに対し、テンプレートマッチングの解像度 0.1m が大きく影響したと考えられる。さらに、実験フィールドは凸凹が多くあり、真値としたトータルステーションの追尾対象であるプリズムの位置変動も誤差に影響したと考えられる。

角度誤差は、平均の差が左右それぞれ、 -0.013rad 、 0.018rad となり、テンプレート画像の回転分解能として定めた角度と同程度の差である。この誤差について、LiDARの測距精度 $\pm 0.03\text{m}$ を、1/10振動ローラと同様に考えると、前部側面の線分の傾きは、最大 0.011rad

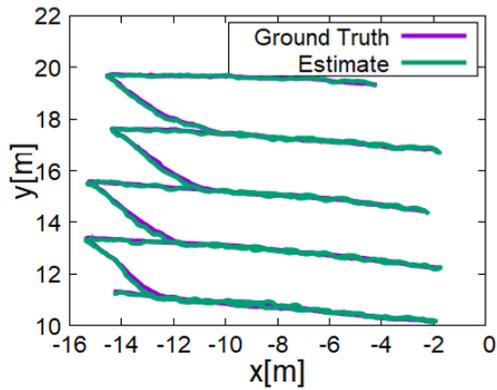


Fig. 11 Position estimation result of real roller

の誤差が生じる。振動ローラ前部と後部のそれぞれで、この誤差が生じると、屈曲角度の誤差はLiDARによる自己位置推定の最小限であると言える。1/10振動ローラよりも屈曲角度の誤差が小さくなったため、実機による経路追従制御においても、目標となるラップ幅 $\pm 0.3\text{m}$ 以内の結果が期待できる。

これらの結果から、リアルタイムで目標とする精度で、自己位置推定が可能であることを確認できた。

6. 結 言

本研究では、振動ローラの転圧作業において、GNSSを使用せずに環境知能化による自動化を目指し、振動ローラの自己位置推定と経路生成、追従制御手法について提案した。また、2台のLiDARを使用し、1/10振動ローラと実機振動ローラによる提案手法の検証実験を行った。自己位置推定では、リアルタイムでの自己位置推定を実現し、実機の振動ローラで目標とする精度が得られることを示した。さらに、経路生成・追従においては、1/10振動ローラで提案・実装した手法を確認し、実機の振動ローラでも目標とする精度が期待できる結果を示した。

今後は、簡易装着機器による振動ローラの無人操縦化を行い、経路追従制御について、実機の振動ローラでの検証を行う。また、振動ローラの作業領域に設置したLiDARによる環境認識を行い、人や移動物体に対する衝突回避を担保できる自動化システムの実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) Riad Kanan, Obaidallah Elhassan, Rofaida Bensalem, "An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies", *Automation in Construction*, Vol.88 (2018), pp73-86
- (2) Satoru Miura, Izuru Kuronuma, and Kenniti Hamamoto, "Next generation construction production system: On

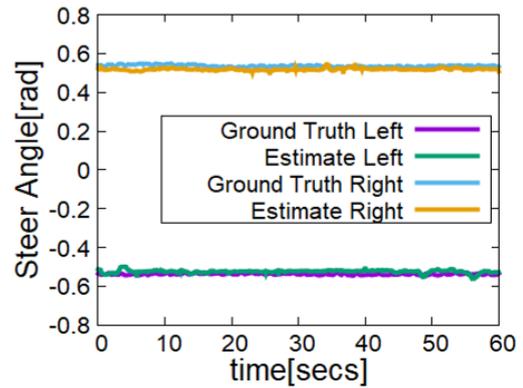


Fig. 12 Steering angle estimation result of real roller

automated construction machinery", *Civil Engineering Conference in the Asian Region*(2016)

- (3) Komatsu T, Konno Y, Kiribayashi S, Nagatani K, Suzuki T, Ohno K, Suzuki T, Miyamoto N, Shibata Y and Asano K (2019), "Autonomous Driving of Six-Wheeled Dump Truck with Retrofitted Robot", In *Preprints of the 12th International Conference on Field and Service Robotics*(2019), pp.11
- (4) Kichun Jo, Junsoo Kim, Dongchul Kim, Chulhoon Jang, Myoungho Sunwoo, "Development of Autonomous Car -Part II: A Case Study on the Implementation of an Autonomous Driving System Based on Distributed Architecture", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.62, No.8(2015), pp.5119-5132
- (5) 片山三郎, 石井稔之, "自律制御型振動ローラによる盛土転圧作業", *日本ロボット学会誌*, Vol.34 No.9(2016), pp.605-606
- (6) 菊地一徳, 桐林星河, 永谷圭司, 小松智広, 浅野公隆, 柴田幸則, 大野和則, 鈴木高宏, "外部設置測距センサによる振動ローラの自動化を目指した自己位置推定", *日本機械学会ロボットメカトロニクス部門* (2019), pp.1P2-E04
- (7) Luigi Di Stefano, Stefano Mattoccia, "Fast template matching using bounded partial correlation", *Maschine Vision and Applications*, Vol.13 No.4(2003), pp213-221
- (8) 出村公成, 中村祐, "全方位カメラを用いたテンプレートマッチングに基づくモンテカルロ位置同定法", *日本ロボット学会誌*, Vol.27 No.2(2009), pp.249-257
- (9) S.Iida, S.Yuta, "Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots", In *Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems*(1991), pp.212-217
- (10) Dennis Sabelhaus, Frank Roben Ro, Lars Peter Meyer zu Helligen, Peter Schulze Lammers, "Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres", *Biosystems Engineering*, Vol.116, No.4(2013), pp.399-409
- (11) 山本真, 西山修二, "多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案 (第3報:車線変更への適用)", *日本機械学会論文集*, Vol.85, No.875(2019), pp.18-00468