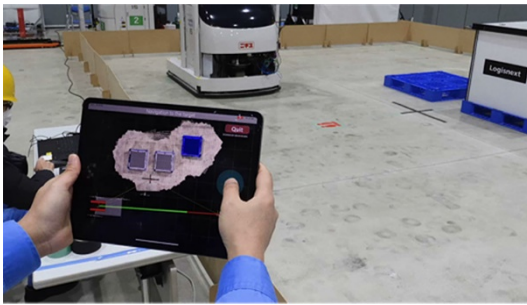


人-機械協調による無人車両の精密ナビゲーション技術

Highly Accurate Navigation Technology for Unmanned Vehicles through Human-Machine Cooperation



木内 裕介*1
Yusuke Kinouchi

北島 克将*2
Katsumasa Kitajima

亀尾 成寿*2
Naruhisa Kameo

杉本 喜一*3
Kiichi Sugimoto

田崎 勇一*4
Yuichi Tazaki

横小路 泰義*5
Yasuyoshi Yokokohji

無人フォークリフト(AGF:Automated Guided Forklift)やプラント巡回点検ロボット等の当社無人車両製品のフレキシビリティを向上させ、更なる現場適用を進めていくためには、任意の場所に配置された物体に対して無人車両を精密誘導するためのナビゲーション技術が必要となる。そこで当社は、作業者が携帯するタブレット端末と無人車両センサで対象物体を協調的に測位し、その測位情報に基づき無人車両を精密誘導する人-機械協調型の精密ナビゲーション技術を神戸大学と共同で開発した。本技術を活用し、当社グループ事業のモビリティ領域の知能化・高度化に貢献していく予定である。

1. はじめに

工場や倉庫の一区画で見られる荷物の置き場のように、現場作業者の判断で物体が任意の場所に配置される環境では無人車両の導入が難しい。このような環境では区画内の物体の数や位置・姿勢が不定であり、物体の配置によっては無人車両センサの死角が多く生じるため、無人車両に対象物体の位置を高精度に認識させ、精密誘導することが困難となる。そこで、[図1](#)で示すように人が携帯するタブレット端末(以下、“人端末”)と無人車両センサで対象物体を協調的に測位し、その測位情報に基づき無人車両を精密誘導する、人-機械協調型の精密ナビゲーション技術を開発した。

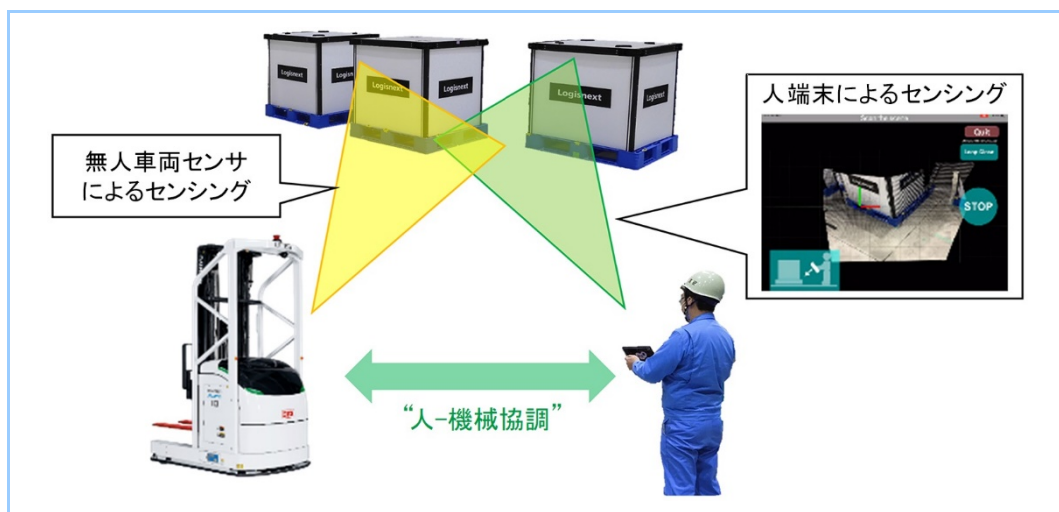


図1 AGF 活用時における人-機械協調技術の適用イメージ

*1 デジタルイノベーション本部 CIS 部 技術士(機械部門) *2 デジタルイノベーション本部 CIS 部
*3 デジタルイノベーション本部 CIS 部 主幹技師 技術士(情報工学部門)
*4 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 准教授 工博
*5 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 教授 工博

本技術の適用に当たっては、無人車両に特別なセンサを追設する必要はなく、監視カメラ等のインフラセンサも不要であるため、低コストでシステムを構築できる。また無人車両を人が直接制御する従来型の遠隔操作とは異なり、本技術では必要最小限の人の介入により無人車両の自律行動を支援する。よって本技術では無人車両の特別な操縦技能は不要であり、誰でも容易に扱うことができる。また無人車両の操作で作業者を長時間拘束する必要もないため、現場の負担が少ないソリューションを提供できる。

本報では、開発した人-機械協調技術の概要及び AGF 実機を用いて構築した試作システムの有効性評価結果について述べる。

2. 人-機械協調技術

2.1 人-機械協調センシング及びナビゲーション

今回開発した人端末と無人車両センサによる協調センシング技術では、対象物体の3次元形状を3次元空間の点の集まりとして表現する3次元点群データ(以下、“人端末地図”)が、人端末のセンサ(3D LiDAR:Light Detection And Ranging)によって得られることを前提とする。また無人車両センサは、AGF 等の産業車両の車体下部に設置される衝突防止用の 2D LiDAR を想定する。すなわち、対象物体をスキャン平面で輪切りにしたときの輪郭形状を2次元平面の点の集まりとして表現する2次元点群データ(以下、“無人車両地図”)が、無人車両センサによって得られることを前提とする。

1章で述べたように、人の判断で物体が任意の場所に配置される環境で無人車両に対象物体の位置を高精度に認識させることは難しい。特に、物体の配置によって無人車両センサの死角が生じると、死角領域内の物体は無人車両からは全く認識できなくなる。そこで、無人車両センサの死角領域を人端末によるセンシング結果で補うことによって、無人車両センサで直接観測できない物体であっても、その位置・姿勢を無人車両に認識させることができる人-機械協調センシング技術を開発した。

図2に示すように、今回開発した技術を適用すれば、無人車両センサの死角を人端末地図で“補完”することができる。具体的には、無人車両地図と人端末地図のそれぞれで物体検出を行い、無人車両地図で検出できない物体(死角に存在する物体)の情報は、人端末地図の物体検出結果で代用する。ただし、この手法を実現するためには、無人車両地図と人端末地図を重ね合わせるための座標変換を正確に求める必要がある。

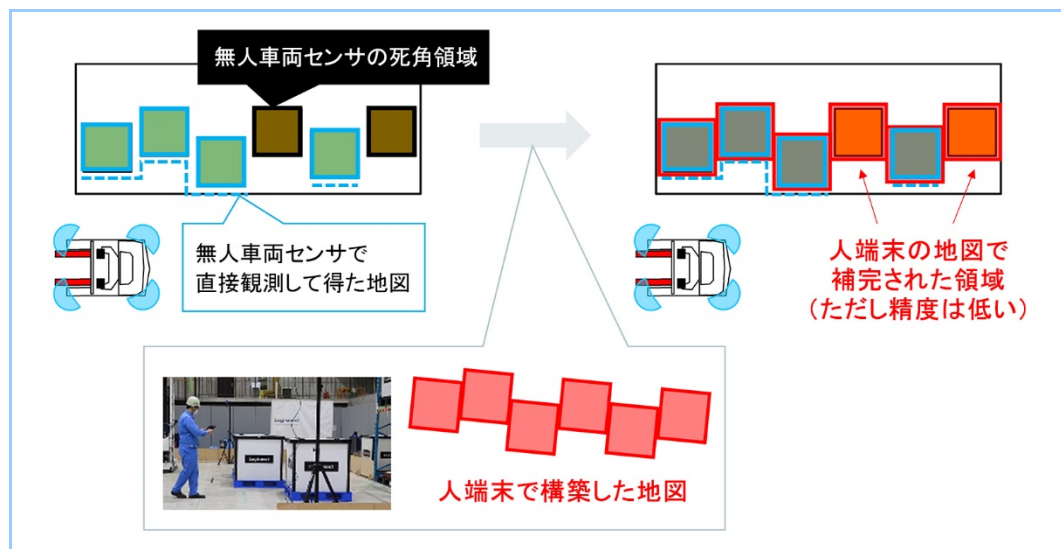


図2 人-機械協調センシング

無人車両センサの死角を人端末地図で補完できたとしても、産業用途ではない人端末センサの測距精度には限界があるため、対象物体の位置・姿勢を無人車両の精密誘導で求められる精

度で推定することは難しい。開発したナビゲーション技術では、人端末の地図情報は無人車両センサでより精密なセンシングを行うための参考とする領域(以下では、“参考領域”)として扱い、人端末の地図誤差が無人車両の誘導精度に直接影響しないよう工夫した。具体的には、人端末による参考領域を手掛かりに無人車両を対象物体の近傍まで自律移動させ、無人車両センサで参考領域内を直接観測できるようになった段階で対象物体の高精度な測位を改めて実行し、その測位結果に基づいて対象物体への最終的なアプローチ経路を計画した。

2.2 地図結合

(1) 概要

無人車両センサ死角領域を人端末地図で補完するため、無人車両地図と人端末地図を正確に重ね合わせるための座標変換を求める地図結合技術を開発した。

地図結合の基本的なアイデアは、無人車両地図と人端末地図の重複領域を見つけ、重複領域同士ができるだけ一致するような座標変換を最適化計算によって逆推定するというものである。しかし今回は、無人車両と人端末で、センサの視点、計測データの次元、測距特性等が大きく異なるため、地図の生データを扱うと、各地図の重複領域を見つけることや、重複領域同士を正確に一致させるための計算が難しい。

そこで今回開発した技術では、各地図に含まれる形状が既知の物体を、地図結合のための参照物体として活用した(図3)。今回は物流現場を想定し、形状が規格化されたパレットを参照物体として利用した。参照物体を利用することにより、無人車両と人端末のセンサの違いに対してロバストに各地図を重ね合わせるための座標変換を求めることが可能となる。

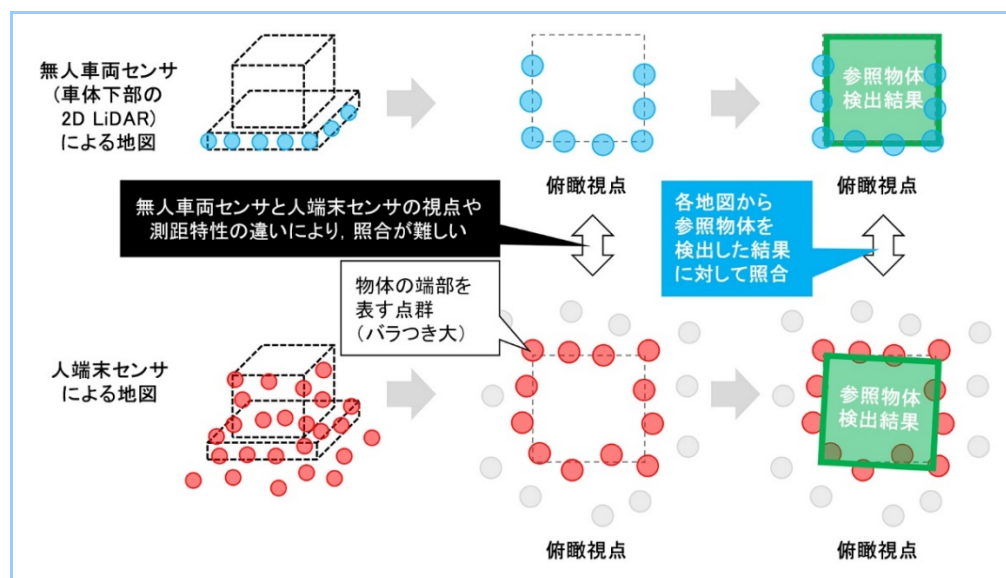


図3 地図結合における参照物体の活用

(2) 地図結合の処理手順

参照物体(パレット)の活用による地図結合技術の処理手順を以下に示す。

① パレット検出

人端末地図(3次元点群)と無人車両地図(2次元点群)のそれぞれから、点群処理によりパレットを検出。人端末地図からのパレット検出では、近接点⁽¹⁾を活用した。近接点とは、センサが観測した点群の中で、観測点(センサ原点)への距離が極小である(近傍点群の中で最小である)点である。近接点を用いることで、パレット検出で重要となるパレット角部の点群を多く抽出することができる。

② パレット地図生成

人端末地図と無人車両地図のそれぞれで、パレットの2次元的な配置データ(以下、“パレット地図”)を生成。

③ パレット地図の照合

地図座標変換のための初期値 $T_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を用いて、人端末のパレット地図を座標変換。無人車両地図座標基準で2つのパレット地図を照合し、最近傍のパレット同士を紐づけ(図4)。

④ パレット地図の結合

紐づけられたパレット間の位置・姿勢誤差が最小となるような座標変換 $T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を最適化計算によって導出。人端末のパレット地図を T で座標変換した結果を用いて無人車両のパレット地図の欠損部を補完。

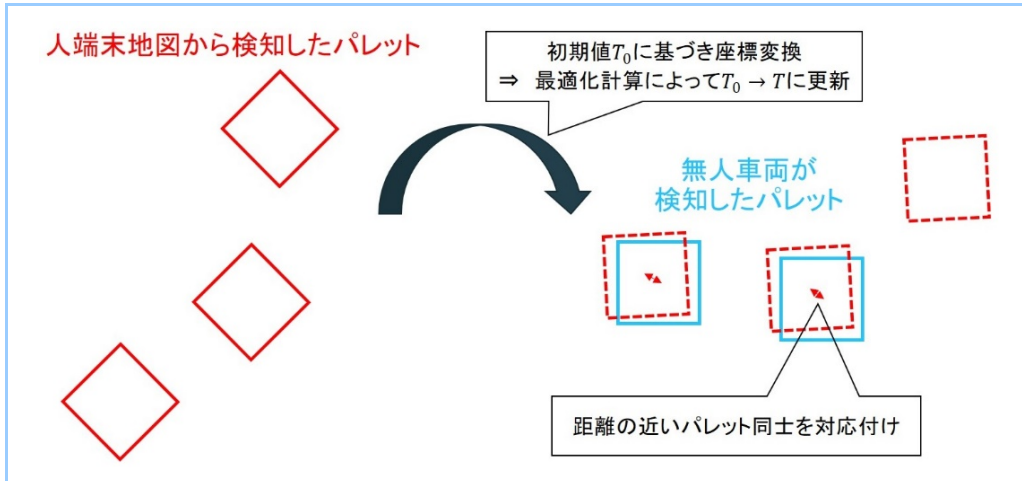


図4 参照物体の照合

(3) 最適化計算手法

上記手順④の最適化計算による座標変換 T の導出方法について述べる。無人車両地図から検出した参照物体の位置・姿勢をそれぞれ $q_i, \psi_i (i = 1, \dots, N)$ 、人端末地図から検出した参照物体の位置・姿勢をそれぞれ $p_i, \phi_i (i = 1, \dots, N)$ とする。

このとき、 T を以下の最適化計算によって求める(w は位置・姿勢誤差の重み係数)。

$$T = \operatorname{argmin}_T E \quad \text{where } E = \frac{1}{2} \sum_i (\|Tq_i - p_i\|_2^2 + w(\theta + \psi_i - \phi_i)^2) \quad \#(1)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x \\ \sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

と表すことにすると(2次元平面の同次変換行列)、評価関数 E を最小化する x, y, θ が求まればよい。評価関数を最小にする点では偏微分がゼロとなることから、求める解が満たすべき連立方程式は以下のように立式できる。ただし、「 $\bar{\cdot}$ 」は平均を表す。

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} x = -\bar{q}_x \cos \theta + \bar{q}_y \sin \theta + \bar{p}_x \\ y = -\bar{q}_x \sin \theta - \bar{q}_y \cos \theta + \bar{p}_y \\ f(\theta) = 0 \end{cases}$$

$$\text{where } \begin{cases} f(\theta) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin\left(\theta + \arctan \frac{\alpha}{\beta}\right) + \frac{w}{N} \sum_i (\psi_i - \phi_i) + w\theta \\ \alpha = -\bar{p}_x \bar{q}_y + \frac{1}{N} \sum_i p_{ix} q_{iy} + \bar{p}_y \bar{q}_x - \frac{1}{N} \sum_i p_{iy} q_{ix} \\ \beta = -\bar{p}_x \bar{q}_x + \frac{1}{N} \sum_i p_{ix} q_{ix} - \bar{p}_y \bar{q}_y + \frac{1}{N} \sum_i p_{iy} q_{iy} \end{cases} \quad \#(2)$$

$f(\theta) = 0$ は Newton-Raphson 法を用いて数値的に求めた。その結果を上式に代入すれば x, y は直ちに求まる。以上より T を導出した。

(4) 地図座標変換の初期値 T_0 の推定方法

上記手順③の T_0 はある程度の精度で推定できればよく、様々な手法が考えられるが、後述

する試作システムでは人端末で最初に床面のマーカを撮影する手法を実装した。無人車両は自己位置推定しているため、無人車両センサで得られた地図の原点位置は既知である。したがって人端末による地図の原点位置をマーカ等で推定すれば T_0 が得られる。

3. 試作システムによる有効性評価

3.1 試作システム

図5に試作システムによる人-機械協調フローを示す。人端末の起動後、画面案内に従って人端末のカメラ画角中心に地図原点(床面のマーカ)を捉えると、地図結合処理で用いる地図座標変換の初期値 T_0 が取得される。地図原点の撮影後、人端末で対象物体が含まれる区画内をスキャンし、地図を構築する。

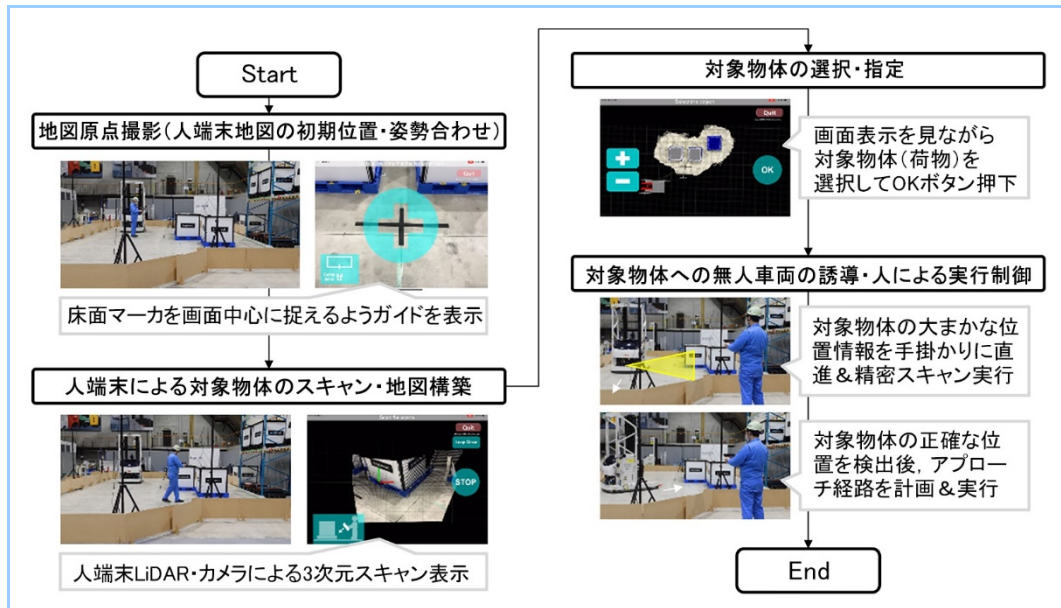


図5 試作システムの人-機械協調フロー

人端末による地図構築後は、図6に示すユーザインタフェース(UI:User Interface)を用いて、対象物体の指定及び無人車両の誘導を行う。“対象物体指定”画面では、人端末で得られた地図が俯瞰視点で表示され、ユーザはその地図表示上で無人車両を誘導する対象物体を選択する。次に“誘導”画面に遷移すると、無人車両の誘導経路が表示され、ユーザがボタンを押下している間、無人車両はその経路に沿った移動を実行し、ボタンを離せば経路上で一時停車する。

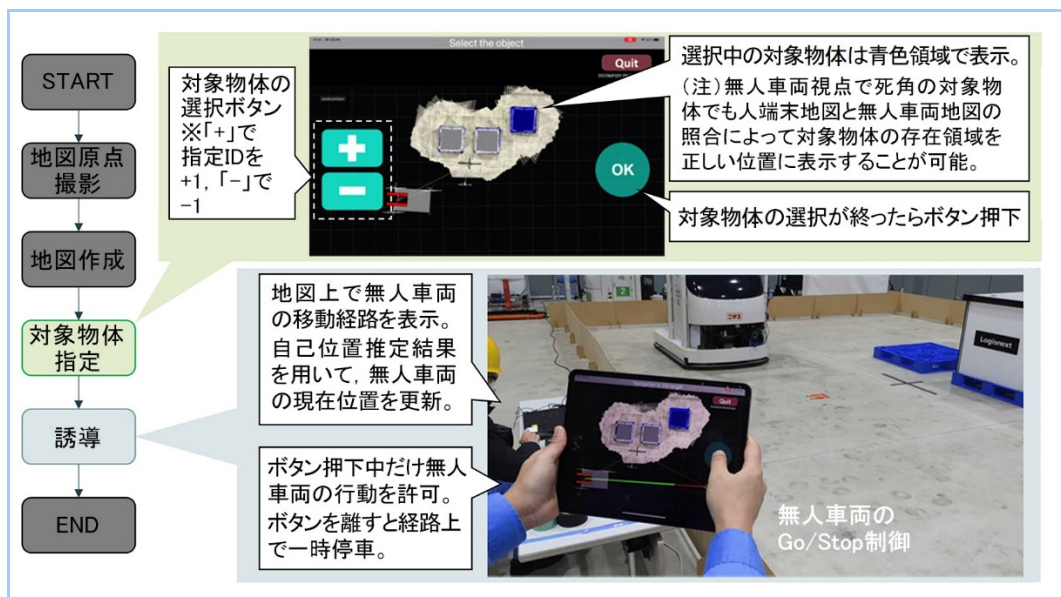


図6 試作システムのユーザインタフェース

このように本システムでは無人車両への直感的な指示を可能とするUI設計を行っており、無人車両の専門知識や特殊な操縦技能のないユーザでも容易に扱うことができる。

なお今回開発した人-機械協調技術は、ロボットソフトウェア開発のフレームワークである ROS (Robot Operating System)⁽²⁾のモジュールとして作成しており、ROS で構築した既存の無人車両システムに容易にアドオンできる。実際、本試作システムは、今回開発した人-機械協調技術と、当社自律移動ロボット技術⁽³⁾⁽⁴⁾を ROS 上でシステム統合することによって構築した。2.1 節で述べた参考領域内の対象物体の高精度な測位や、対象物体へのアプローチ経路の計画等、本試作システムの多くの機能は、ROSを用いて開発済みの技術を活用することによって、システム開発を効率化した。

3.2 有効性評価

試作システムの有効性を評価するため、実機試験を行った。図7に試験エリア及び試験車両を示す。本試験における対象物体は、パレットに積載された荷物である。対象物体への誘導精度を評価するため、試験エリアにモーションキャプチャのカメラを設置し、試験車両及び対象物体にターゲットマーカを設置した。モーションキャプチャのカメラとマーカは、今回の計測用に設置したものであり、本技術を実際に運用する際には不要である点にご注意頂きたい。

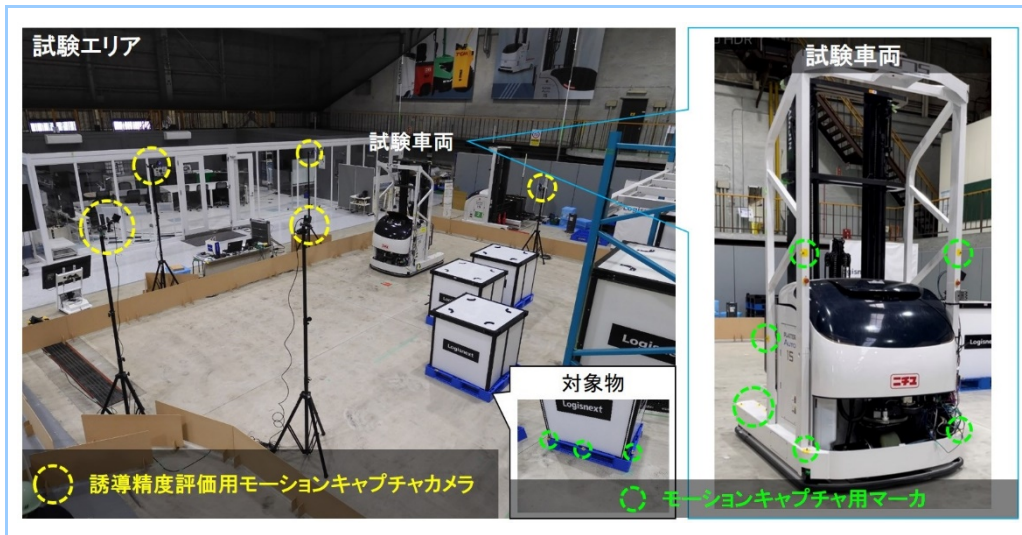


図7 試験エリアと試験車両

図8に試験内容を示す。本試験では人端末による地図構築、及びその地図を用いた無人車両センサ死角領域の対象物体への無人車両の誘導を、繰り返し3回行った。

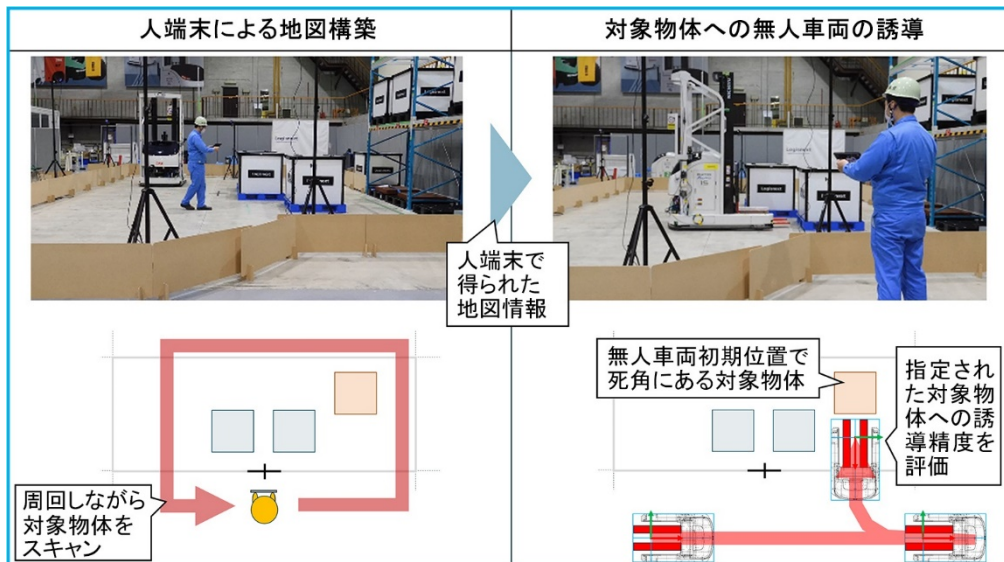


図8 試験内容

図9, 図10, 図11 に試験結果を示す。図9の緑色の枠は、結合された地図上で無人車両が認識した対象物体の位置である。図9に示すとおり、3回の試行の全てで、無人車両センサ死角領域の対象物体を無人車両に認識させることができた。ただし、図9中央図($n = 2$)のように、対象物体の検出位置の誤差が大きいケースも確認した。2.1 節で述べたとおり、人端末による対象物体の検出精度には限界があるため、この誤差に対してロバストに無人車両を誘導する必要がある。

図10は対象物体への無人車両の誘導状況であり、無人車両センサ死角領域のパレットに対して、AGFの爪が刺せる精度で誘導できることを確認した。

図11は無人車両センサ死角領域の対象物体への誘導精度をモーションキャプチャ計測値との比較によって定量評価した結果である。図11に示すとおり、3回の試行で並進誤差は最大10.3mm, 角度誤差は最大0.35degとなり、開発技術によって対象物体への無人車両の精密誘導が可能であることを確認した。特に図11の $n = 2$ は、人端末による対象物体の検出精度が最も低かった結果(図9中央図)を用いて無人車両を誘導したケースであるが、他の2ケース($n = 1, 3$)と比較して顕著な影響なく、無人車両を精密誘導できることを確認した。

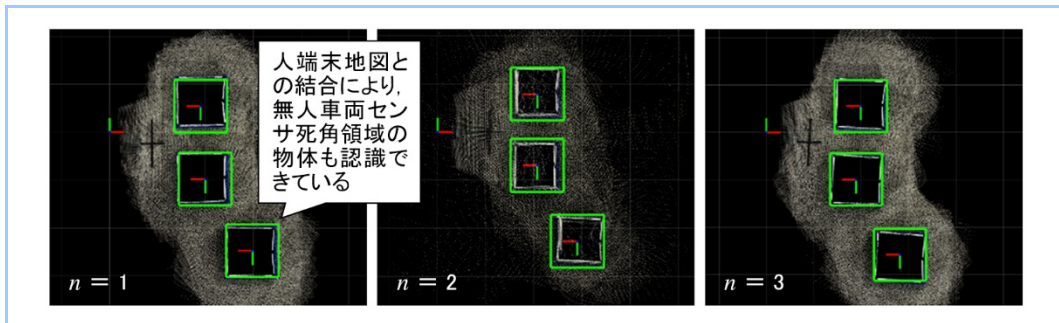


図9 結合された地図上での対象物体認識結果

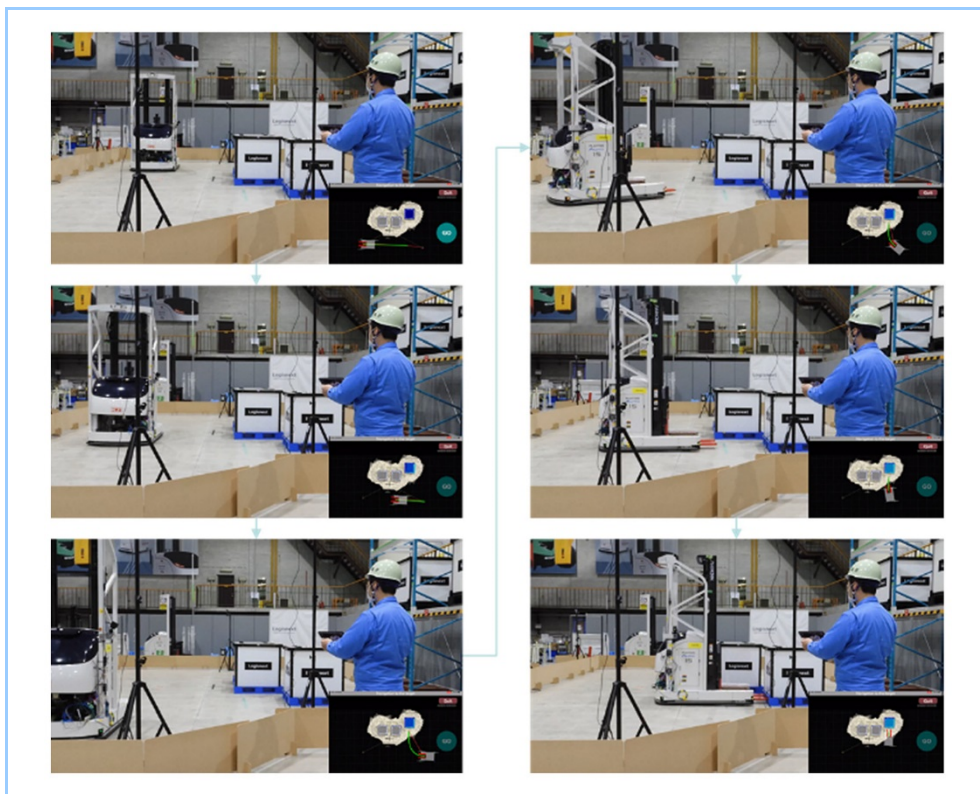


図10 対象物体への誘導状況

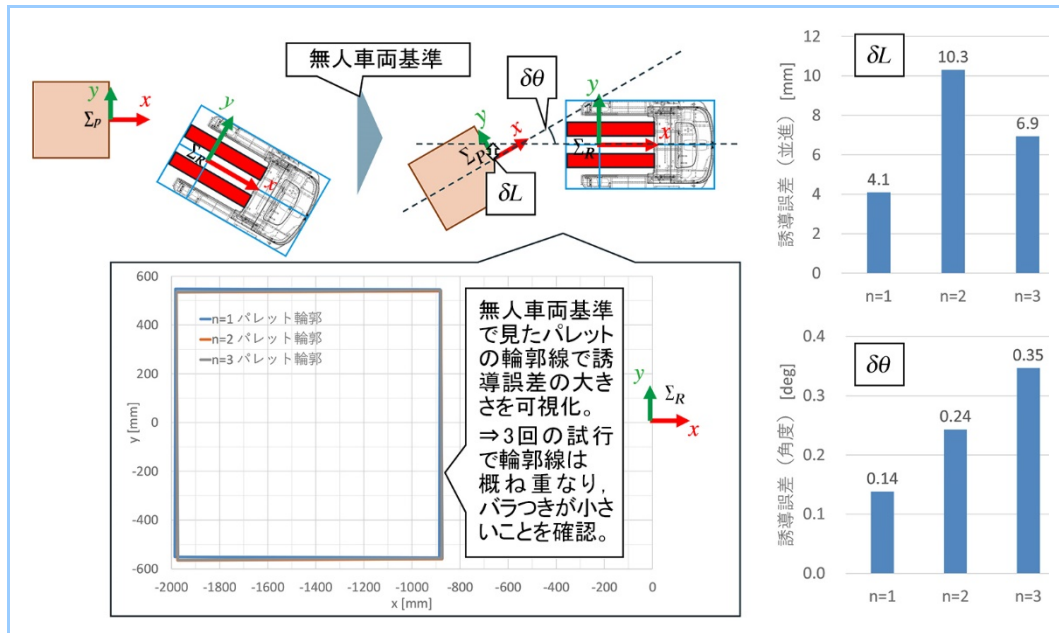


図 11 無人車両センサ死角領域の対象物体への誘導精度評価結果

4. まとめ

当社無人車両製品のフレキシビリティを向上させ、更なる現場適用を進めていくため、人-機械協調による無人車両の精密ナビゲーション技術を開発した。本技術の適用により、物流現場の仮置き場のように区画内の物体の数や位置・姿勢が不定であり、無人車両センサの死角が多い環境でも、必要最小限の人の介入で無人車両を対象物体に精密誘導することができる。AGF 実機を用いて構築した試作システムの有効性評価結果より、無人車両センサ死角領域の対象物体に対して十分な精度で無人車両を誘導できることを確認した。

今後、本技術を現場作業者との円滑な協働が求められる当社無人車両製品に適用していく。また本技術を発展させ、当社グループ事業のモビリティ領域の知能化・高度化に貢献していく予定である。

参考文献

- (1) Tazaki, Y. et al., Outdoor Autonomous Navigation Utilizing Proximity Points of 3D Pointcloud, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.32 No.6 (2020) p.1183-1192
- (2) Quigley, M. et al., ROS: an open-source Robot Operating System, ICRA. (2009)
- (3) 木内裕介ほか, 三菱重工における ROS/Gazebo を活用したロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.35 No.4 (2017), p.8-11
- (4) 和田淳ほか, フォークリフトと無人搬送車が混在する環境でのパレット荷役の実現, 三菱重工技報, Vol.58 No.2 (2021)