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

Feasibility Study of Pallet Handling in Mixed Fleet Environment

和田 淳*1 Atsushi Wada
高尾 健司*2 Kenji Takao
辻阪 龍*3 Ryo Tsujisaka
北島 克将*4 Katsumasa Kitajima
長谷川 徳之*5 Noriyuki Hasegawa
荒木 亮次*4 Ryoji Araki

無人フォークリフト(以下, AGF:Automatic Guided Forklift)は, 経路とパレット積卸し位置を与えられて荷役を行うため, フォークリフトが置いたパレットをAGFが荷取する場合は, 予め床に取り付けたパレットガイドやマークなどに合わせて, オペレータがパレットを荷置きする必要がある。そこで我々は, AGFが自らパレットの位置を認識し, 経路を自動で生成・追従することで, ガイドレスな荷役作業を可能とする技術を開発している。物流作業員の不足や負荷軽減の対応策として, さらに, AGFとフォークリフトが混在するパレット荷役の自動化を目指して開発を進めている。

1. はじめに

近年Eコマース等の物流ニーズの高まりに加え, 深刻な人手不足も重なり, 物流の自動化・無人化への期待が高まっている。一方, パレットハンドリングを行う物流現場では, フォークリフトとAGF等の無人搬送システム間の混在作業が不可欠であり, その結接点では, 無人搬送システム側に条件を合わせることが前提となっている。例えば倉庫や荷捌きエリアの床に上述のパレットガイドを設置する場合, フォークリフトの走行の妨げになること, また同じくマーク等によるパレット位置の指定の場合, 決められた位置にパレットを置く作業が必要となる。これらの課題を解決するために, フォークリフトで無造作に置かれたパレットに対して, AGF が自動的にその位置/姿勢のズレを検知し, そのズレを補正して誘導制御を行う機能の開発を行った。

2. 新誘導制御技術の概要

新誘導制御技術は, ①パレット検知技術(以下, PF:Pallet Finder)[(1)], ②アプローチパス生成技術(以下, PP:Path Planning), ③誘導技術の3項目から構成される。これらの技術を短期間で開発・検証を行うために, ROS(Robot OS)による実装を行い, 既存の AGF システム(レーザ誘導方式)に容易にアドオンで実行できるように, 既存システムと開発した ROS ノードとのインターフェースを構築した。本システムの構成図を図1に示す。

*1 三菱ロジスネクスト株式会社 技術本部 物流システムエンジニアリング部 主席技師
*2 三菱重工業株式会社 ICT ソリューション本部 CIS 部 主席技師 工博
*3 三菱ロジスネクスト株式会社 技術本部 物流システムエンジニアリング部
*4 三菱重工業株式会社 ICT ソリューション本部 CIS 部
*5 三菱重工業株式会社 総合研究所 機械研究部

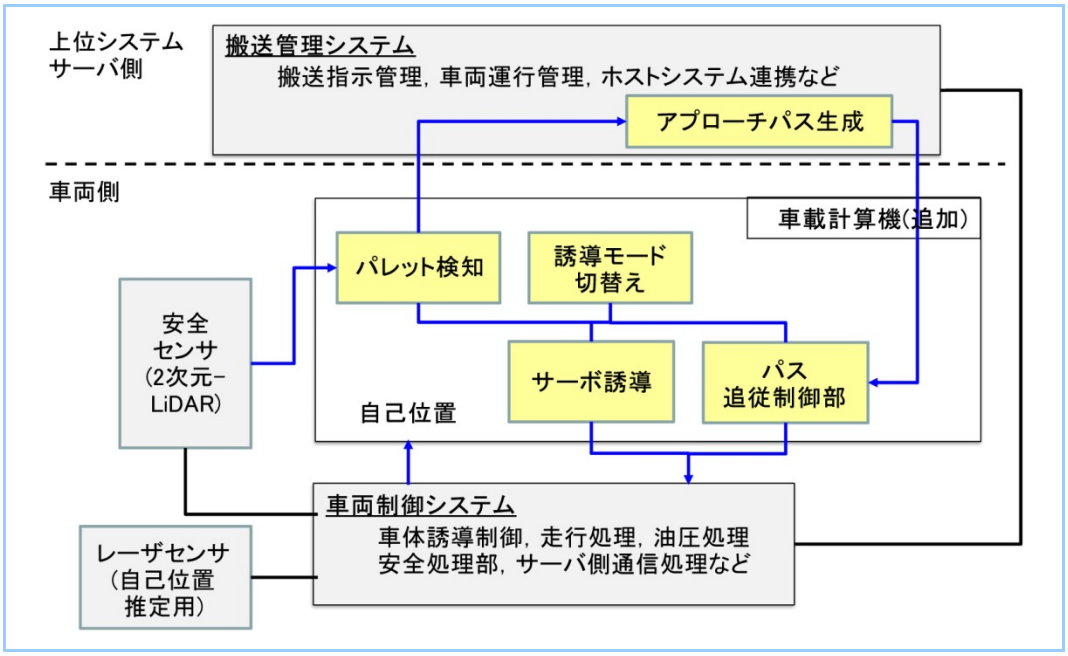

図1　高機能荷役システムのシステム構成

3. 問題設定

本報で対象とする問題設定を図2に示す。AGF は，フォークリフトとは異なり，安全上の配慮から”フォーク側が後進方向”となり，”バンパ側が前進方向”として運用され，前進は後進よりも高速に動くように設計されることが多い。AGFの典型的な動作を図2(左)に示す。図2(左)では，ターゲットパレットに対して平行に前進走行し，パレット正面を少し行き過ぎた箇所(以下，切り返し位置)で切り返し動作を行い，後進走行にてパレットまでアプローチを行っている。本システムでは，この切り返し位置までは既存の AGF 走行制御を行い，切り返し位置から先はパレット位置/姿勢に応じたアプローチを行っていく。

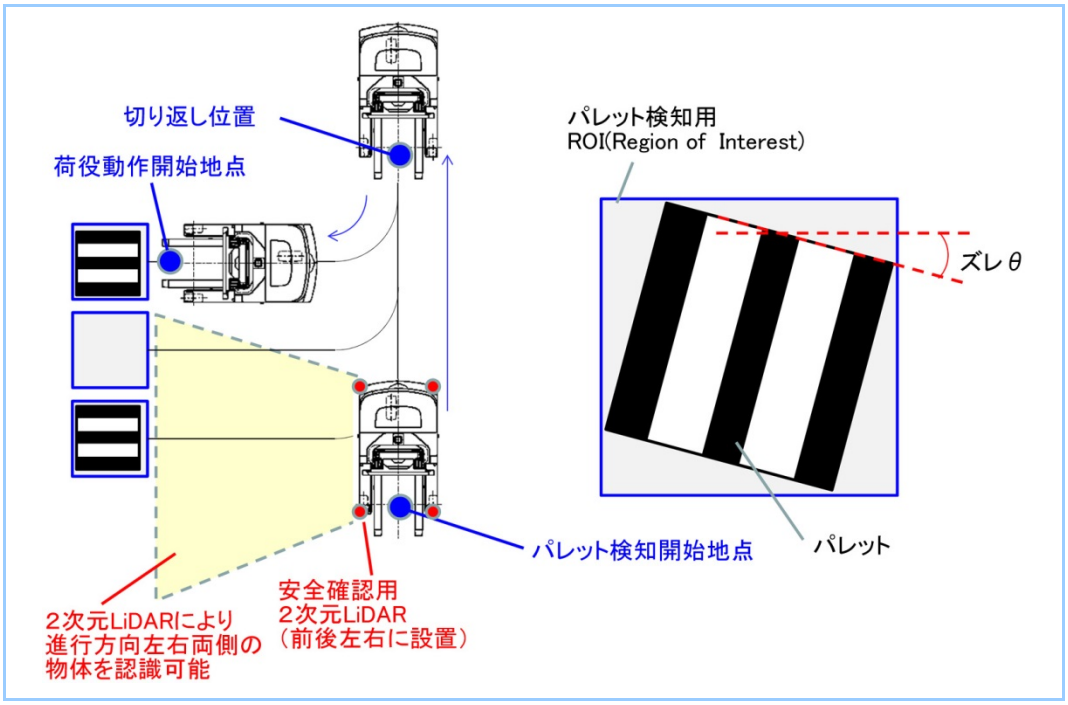

図2　対象とする問題の設定条件

4. 開発技術

4.1 パレット検知技術(PF)

(1) 概要

2章で述べたコンセプト，”容易に既存システムにアドオンできること” を実現すべく，本システムでは，既存AGFに安全用センサとして前後左右に取り付けられている2次元LiDARをパレット位置姿勢検知用センサとして流用することとした。本センサは，地面に近い箇所に取り付けられており，パレット穴の高さにレーザ光を照射することが可能である。また，図2(左)で示す通り，切り返し位置に移動するまでにターゲットパレットの前を横切るが，その際，この2次元LiDAR(前後2つ)にてパレットの位置姿勢を検知することが可能である。以下，パレット検知技術に関する詳細について述べる。

(2) 詳細アルゴリズム

パレット検知技術の詳細フローを図3に示す。以下フロー中の処理①～⑥について述べる。

① パレット前面領域抽出

計測された全 LiDAR 点群から，パレットが存在するはずの矩形領域内の点群のみを抽出することでパレット前面部と認識する。

② 直線検出

①ではパレット前面位置をある領域に絞り込んだだけなので，より直線的に絞るため，RANSAC(Random Sample Consensus)アルゴリズムにより直線検出を行う。具体的には，ランダムに選んだ2点を結ぶ直線のスコアを算出し，定数回繰り返すことで，スコアが最大の直線を検知する。

③ 線分検出

②で検出した直線の中から，直線上で隣り合う数点をグループ化し，更にパレットを正面から見た際にパレットの両端と中央に”けた”があるが，その”けた”に合うように点群を3つのグループにまとめる。それにより1枚のパレットとしての認識ができる。

これにより，検知したいパレットと隣接するパレットの誤認識を減少させることができる。

④ パレット端点検出

③で検出した線分から2つを選択し，長さがパレット幅となる線分の組を抽出することでパレットの端点として認識することができる。

⑤ 直線フィッティング

パレット穴付近の点群は LiDAR センサの特性により，点群が正確に反射されない場合があり，その結果パレット検知処理に影響を与えることになる。その影響を除去するために以下の処理を行う。

まず，③で検出したすべての線分に含まれる点群のうち，④で検出したパレット両端に挟まれた領域に存在するものを抽出する。抽出した点群のうち，③で検出した各線分の端から規定個数以内の点群を除外する。残った点群を用いて近似処理によってパレット前面部を直線状に抜き出し，これによりパレットの傾き θ を計算することができる。そして④で求めたパレット両端点のx座標の中点をパレットのx座標とし，更に上記 θ よりy座標を求めることができる。

⑥ 検出信頼度

求めたパレット位置姿勢の推定結果の”確からしさ”を”信頼度”として評価し，”信頼度”が高い結果を後述のアプローチパス生成や誘導制御に優先的に利用する。その信頼度計算方法について述べる。

一般的に，2D-LiDAR センサの角度分解能(カタログスペックより入手可能)より，センサからの距離により，どのくらいの点群数が計測可能か(理想的な計測点数)を事前に見積も

ることが可能である。これに対して，センサと対象物の相対角度などの影響により，実際に計測できる LiDAR 点数は理想的な計測点数よりも少なくなる場合がある。理想的な計測可能点群数に近い数が実際に計測された場合，その計測結果から推測されるパレット位置/姿勢の信頼度は高いとして評価することができる。

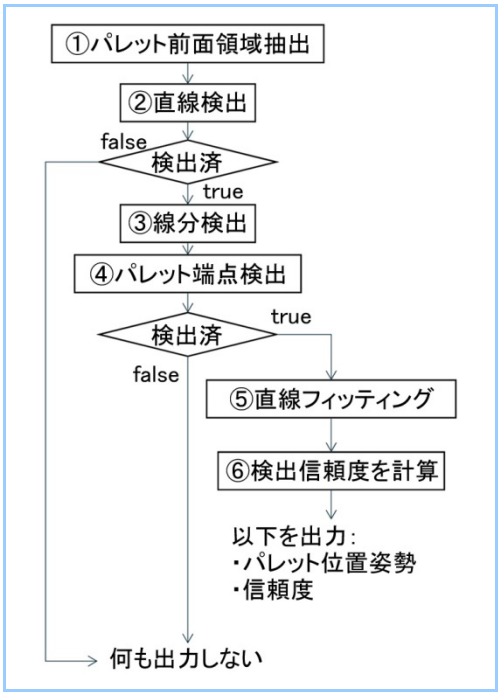

図3 パレット検知技術：処理フロー

4.2 アプローチパス生成技術（PP），誘導制御技術

AGF は全方向移動ができない車両であり，移動の制約を考慮した誘導制御を行う必要がある[(2)(3)]。この AGF に対し，4.1 項 PF で推定したパレット位置/姿勢を基に，パレット穴にフォークが挿せる姿勢に到達することを目的とした AGF の誘導技術を開発した。具体的には，図2(左)に示した“切り返し位置”から，PF により検知したパレット位置/姿勢に対するアプローチパスの生成，そのパスへの追従制御，及びサーボによる高精度な位置決め制御[(4)]を組み合せた技術を開発した。

(1) アプローチパス生成技術

図2(左)，及び 4.1 項 PF で述べたように，切り返し位置に到着するまでに，ターゲットのパレットの位置/姿勢を PF により推測することができる。その推測結果を用いて AGF のパレットへのアプローチパスを生成する。

図4にその処理フローを示す。また，この処理フロー中の各変数を図5に示す。なお，本手法は円弧軌道と直線軌道の組合せだけで経路を生成するため，最適化計算などが不要であり，高速に経路を生成できるという特徴を有している。なお，円弧軌道の旋回半径と AGF の舵角指令は一対一に対応しているため，外乱が一切ない場合に円弧軌道上を走行する AGF の舵角指令も同時に求めることができる。舵角一定であれば旋回半径は車速に依存しないため，スリップなどが発生しない範囲で任意の車速を設定可能となる。

まず，図5における最終誘導開始位置（仮）を計算する。ここで d_{MIN} はパラメータであり，最後の直線区間をどの程度残すかを表す。なお，AGF が最終誘導開始位置に到達した際はパレット姿勢と一致する。次に，追加の切り返しが必要か否かを判定するため，旋回軌道中心（仮）を計算する。この情報と旋回半径を用いて，図4に示すように追加の切り返し（上側への膨らみ）の要否を判定する。

追加で切り返す必要がない（上側に膨らむ必要がない）場合には，切り返し（SB：Switch

Back)位置[x_{SB}　y_{SB}]を計算する。ただし切り返し位置はシステム内で予め定義された経路(Original Path)上に設定することを前提とし，x_{SB} はその経路に一致させるため計算は不要である。続いて，切り返し位置[x_{SB}　y_{SB}]から最終誘導開始位置に到達するための旋回軌道中心を計算した後，最終誘導開始位置を計算する。最終誘導開始位置と最終誘導開始位置(仮) はパレット姿勢と同じ傾きを持つ直線上に存在するため，最終誘導開始位置が得られた時点で，切り返し位置からパレットまでのアプローチパスが完全に定まったことになる。図5の右側に，上側に膨らむ必要がない場合のアプローチパス生成結果の例を示す。

一方，追加で切り返さなければならない場合には，新たに旋回軌道中心②を計算する。この軌道は，アプローチパス及び最初に計算した旋回軌道とある一点だけが交わるように計算し，それらの交点をそれぞれ切り返し位置・追加切り返し位置とする。この場合には，切り返し位置→追加切り返し位置 → 最終誘導開始位置 とたどることで，AGF をパレットまで誘導できる。このように，切り返しが必要な複雑なアプローチパスを作れる点が本技術の特徴である。

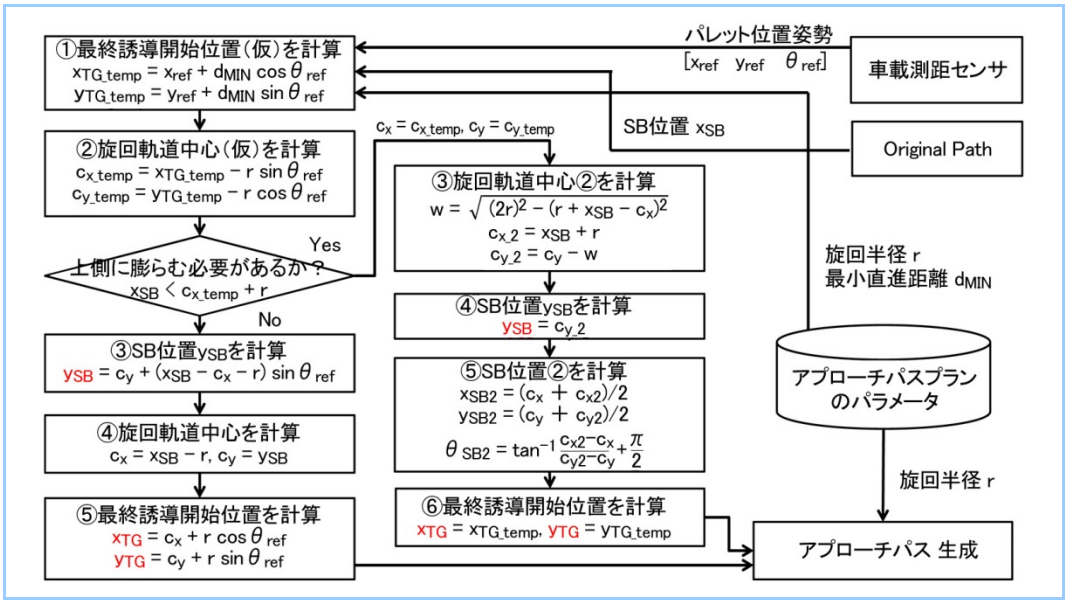

図4　アプローチパス生成技術：処理フロー

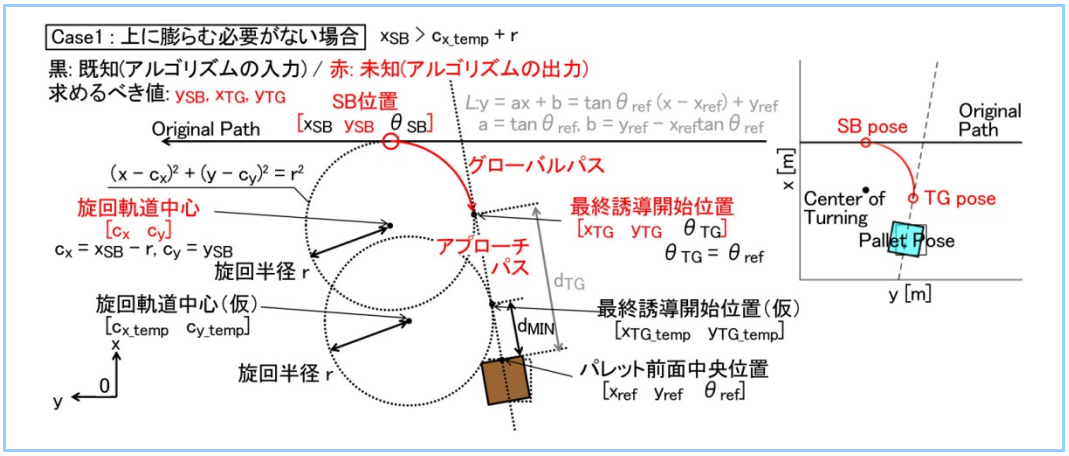

図5　アプローチパス生成技術：上に膨らむ必要がない場合の計算例

(2) 経路追従制御技術

経路追従制御は事前に計画された経路に沿って車両を走行させるフィードバック制御である。車両は経路のスタート位置付近から出発し，経路に沿って走行し，ゴール位置にて停止することを目的とする。すなわち，経路からの誤差を十分に小さく抑えて走行することを主な目的とする。以下に解析に用いた対象のモデル及び制御則を記載する。

まず，本制御の背景となるAGFの運動モデルについて述べる。 本制御の対象はAGFであ

り，車両には2つの固定輪と1つの操舵輪が存在する。また操舵輪は駆動輪も兼ねる。 AGF の旋回中心を操舵輪と固定輪の軸中心が交わる点であるとすると，式1に示す運動モデルが ODE として得られる[2]。このモデルはステア角度と走行速度を入力情報とし，位置x, yと姿勢 θ の時刻tに対する変化を記述している（図6式1）。次に，経路追従制御に対して上記モデルを適用し，誤差の時刻tに対する変化について， 本制御では経路からの距離誤差e_y及び姿勢誤差e_θを制御対象とする（図6(右)）。このモデルを現在位置と最も近い経路上の点を中心とする座標系に対して適応すると，図6の式2が得られる。 ここで，L はホイールベース長，κ_{ref}は最近傍点における経路の曲率である。

最後に制御則について述べる。本制御の目的は $e_y = e_\theta = 0$として続けることなので，上記式が$(e_y, e_\theta) = (0,0)$となる安定な平衡点を有するような入力関数$\delta_{ctl}: (e_y, e_\theta) \mapsto \delta$を設計すれば良いこととなる。本制御では，フィードバックに比例制御を採用し，図6式3に示す制御則を用いた。

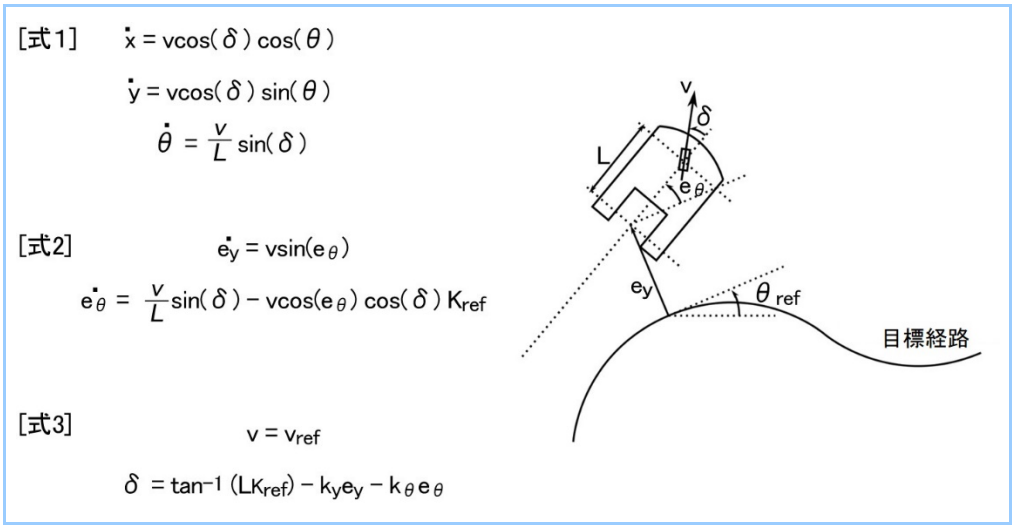

図6 経路追従システム概要

(3) サーボ制御技術

アプローチパスのみでは，AGF が外乱の影響によってアプローチパスから外れてしまう恐れが考えられる。あるいはアプローチパス生成時のパレット位置姿勢計測値に誤差があり，パレット正面から外れてしまう恐れがある。そこで本システムでは，測距センサを用いたサーボ（以下，LiDAR－Servo）による精密誘導を行う技術を開発し誘導制御に組み込んだ（図7）。これにより，経路追従誤差の影響を排除できる上，パレット位置姿勢の計測誤差の影響を緩和できる。

本サーボ機構では，安全用 2D-LiDAR センサにより都度推定されるパレット位置/姿勢の検知結果と目標位置の偏差のフィードバックにより操舵指令値を出力する。具体的な誘導処理フローを図8に示す。まず位置の偏差を優先して操舵指令値を出力し，位置がある程度目標値に収束した時点で，姿勢の偏差に対するサーボを行う。なお，本サーボ機構は先読みを行わないため，パレットに対して概ね正対した状態から起動される。ただし図8に示す通り，状況に応じて位置と姿勢のどちらを優先して誘導するかを切り替えるため，ある程度姿勢が傾いていても有効に動作させることが可能である。

(4) 誘導モード選択機能

ここでは，アプローチパス/追従からサーボ制御に切り替える仕組みについて述べる。まず，サーボ制御により爪差しが可能となる相対位置，姿勢のマップを作成し，システムに登録しておく。これに対し，PF 結果より推定された相対位置・姿勢情報に基づき，事前作成マップ条件に現在の推定相対位置・姿勢が含まれている場合，サーボ制御に切り替える。

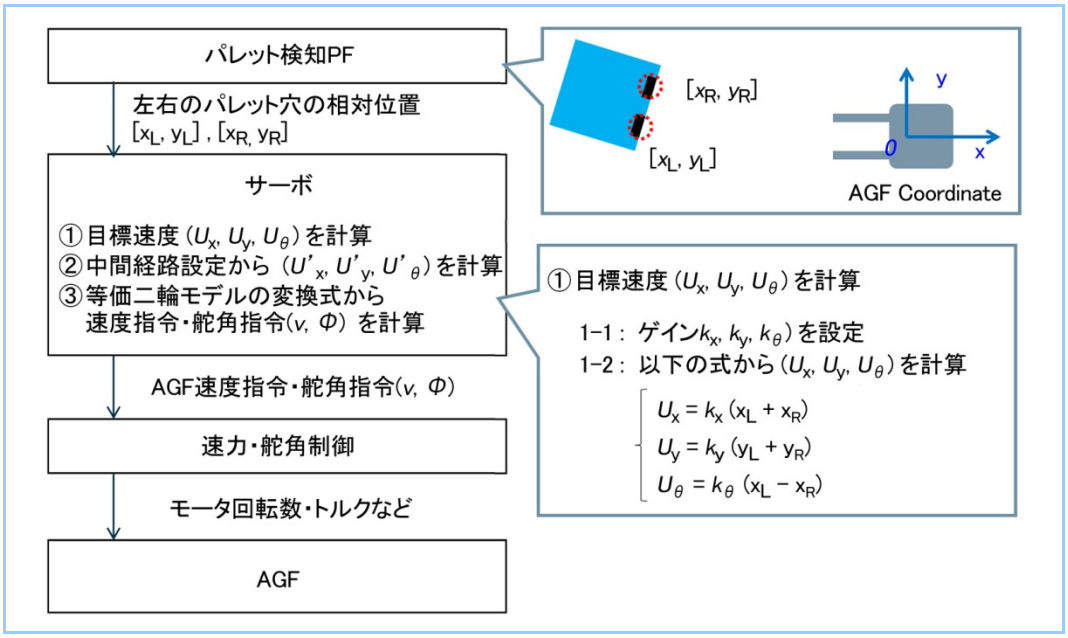

図7 PF を用いたサーボによる制御

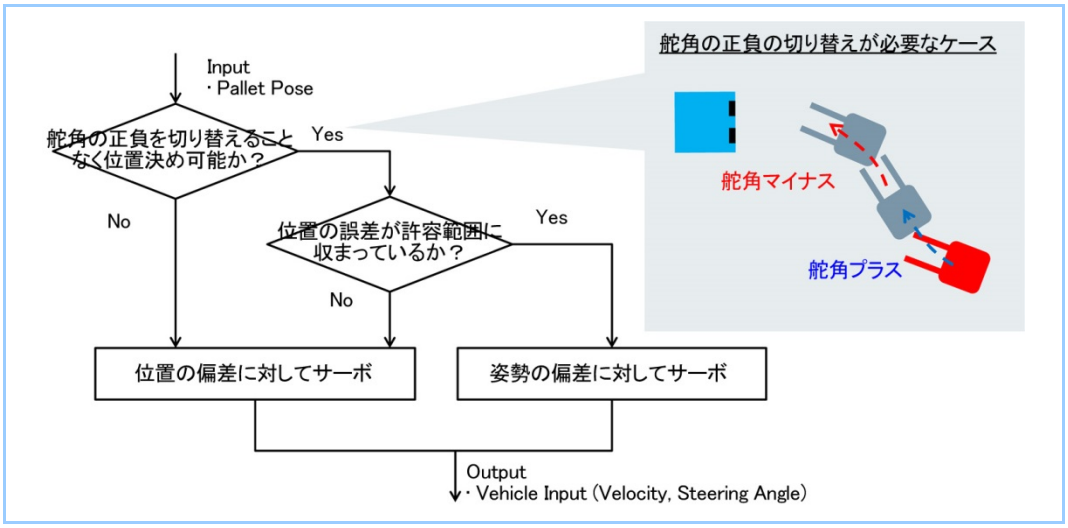

図8 PF を用いたサーボによるパレットへの爪差しの誘導処理フロー

5. 実機検証

5.1 検証車両，検証環境

開発した高機能荷役システムを当社の AGF 車体(リーチタイプ)に搭載し検証を行った。自動走行制御システムは従来システムを採用した。

5.2 検証結果

図9(a)に安全用 2D-LiDAR センサを用いてパレットの位置/姿勢をリアルタイムに推定している結果を示す。パレット前面の点群を効率よくかつ正確にとらえ，パレットの位置/姿勢を正確に推定できていることが分かる。また，図9(b)に，切り返し位置までに推定されたパレット位置/姿勢のうち，最も信頼度が高かった推定結果を用いて作成したアプローチパスの結果を示す。これより，推定されたパレット位置/姿勢に対して，爪差し可能なアプローチパスが生成できていることが分かる。さらに，経路追従，サーボ制御を行い，AGF をアプローチさせたところ，問題なくパレットに対して爪差しが行えたことで，開発した機能の有効性が実証できた。

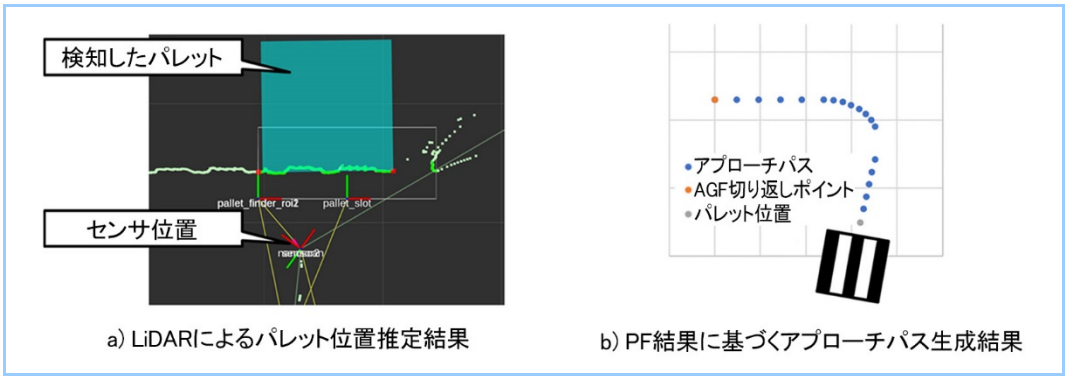

図9 検証結果(パレット検知結果, アプローチパス, 最終到達時点での誤差)

6. まとめ

今回 AGF に対して, ①パレット検知技術(PF), ②アプローチパス生成技術(PP), ③誘導技術から構成されるシステムの開発を行い, 試験環境にてその有効性を検証した。本システム開発では, 既存システム・既存センサを流用, かつ ROS を用いて開発を行うことで, 効率的な機能開発・実装を実現できた。本システムは今後, お客様サイトでの実証試験を行い, 市場投入していく。また, 本技術を発展させ, これまで自動化が難しかったさまざまな物流環境に対して, より一層の自動化を進めていく。

参考文献

(1) Junhao Xiao (et al.): Pallet recognition and localization using an RGB-D camera International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017
(2) Matthew R. Walter (et al.): Closed-loop Pallet Manipulation in Unstructured Environments, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2020
(3) Brian Paden (et al.): ″A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles″, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 1(1), pp.33 – 55)
(4) 尾里淳＋ほか:″線形ビジュアルサーボによる全方向移動ロボットの位置と姿勢の制御″, 日本機械学会論文集(C編)77 巻 774 号, pp.215-224 (2011)