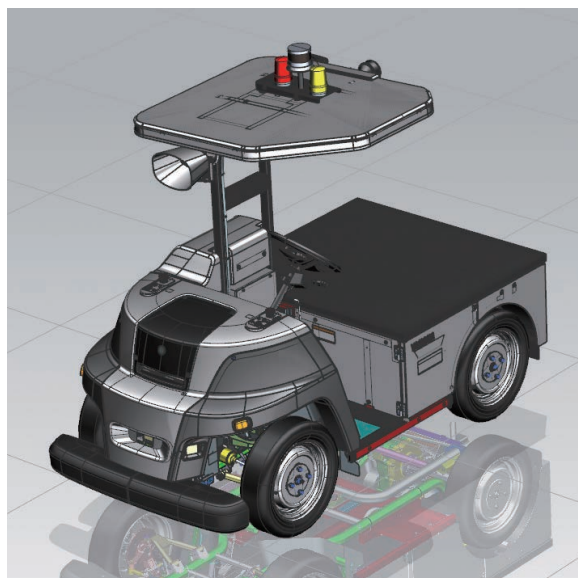


自立型工場自動搬送車「FG-01」

Self-support Automatic Factory Vehicle "FG-01"

岡田 健史 岸 知昭 西村 政哉 實生 達朗 中谷 和弘 松本 順文 山内 拓也



Abstract

In April 2020, Yamaha Motor Co., Ltd. (hereinafter, the Company) and Tier IV Co., Ltd. (hereinafter, T4) established the joint venture, eve autonomy Co., Ltd. (hereinafter, eve autonomy), which provides automated goods transportation solutions, including those within factory premises, and the three companies have developed the new self-driving EV "FG-01." The "FG-01" is a partner Factory Gear that can automatically deliver items within the factory by combining our vehicle development technology for eve and the open-source automatic driving software "Autoware" (hereafter, Aw) promoted by T4.

1 はじめに

2020年4月にヤマハ発動機株式会社(以下当社)と株式会社ティアフォー社(以下T4)は、工場敷地内をはじめとしたモノの自動搬送ソリューション事業を行う合弁会社「株式会社 eve autonomy (以下 eve)」を設立し、三社で新型自動運転EV「FG-01」を開発してきた。「FG-01」はeve向けに当社の車両開発技術と、T4が推進するオープンソース自動運転用ソフトウェア「Autoware」(以下 Aw)を融合した、工場内のモノを自動で配送できる相棒 Factory Gear である。

2 開発の狙い

工場の物流現場は、高まる多品種少量生産のニーズと慢性的な人手不足により、作業員配置を前提とした従来型の設備・運用では、需要に合わせた効率的な生産体制の維持が難しくなっている。この課題に対し、商品コンセプト“REAL WORK HORSE”を掲げ、以下に主眼をおいて開発をおこなった。

- 1) 建物内部、建物間の物流ができるコンパクトな車格
- 2) 荷物積載、牽引ができる
- 3) 人にやさしく容易に周囲から認知できる
- 4) 障害物が回避できる
- 5) 簡単に走路設定ができる自動運転システム

図1に本モデルのフィーチャーマップを示す。

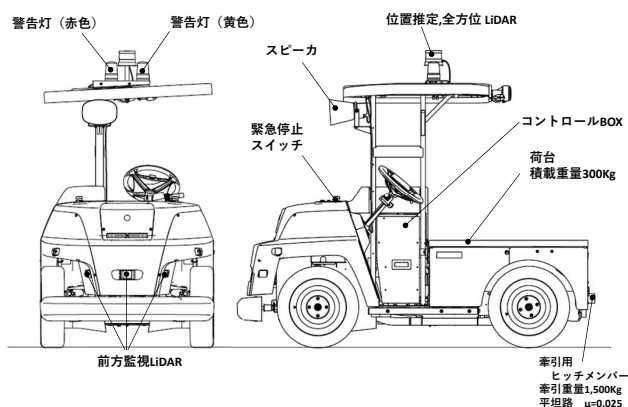


図1 フィーチャーマップ

3 開発の取り組み

3-1. Aw を活用した自動運転への取り組み

Aw とは ROS2 (Robot Operation System 2) をベースとしたオープンソースの自動運転ソフトウェアであり、図2のように自動運転に必要な「認知」、「判断」、「行動」のすべての機能を有し、効率的なソフト開発が可能である。本プロジェクトでは、LiDAR(ライダー:Light Detection And Ranging)などのセンサ構成の再構築や経路計画機能の向上、パトランプや音声による周囲への警告機能などを追加した。このように今後も市場の要望に沿ってハード、ソフトともに比較的迅速な対応が可能な点が特徴である。

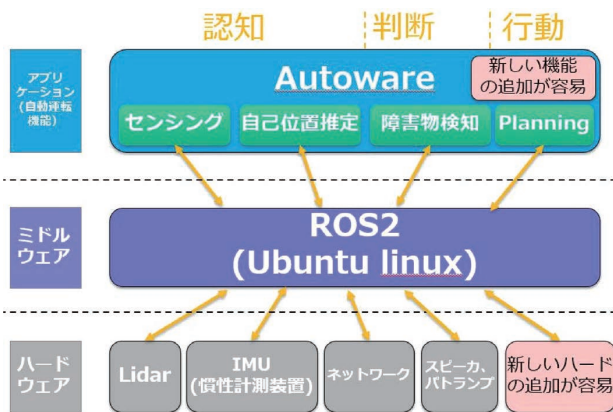


図2 Autoware の構成図:
ハードウェア、機能の柔軟な開発が可能。

「FG-01」にはセンシングのためのLiDARが搭載されており、LiDARはレーザー(近赤外線)を照射し、その反射光をスキャンすることで周囲環境との距離情報を取得する。Awはその情報を利用して3Dの点群を生成し、事前に作成した3Dの点群マップと、リアルタイムで取得した点群のマッチングを行うことで自らの車両の位置を推定することができるため、昼夜を問わず自動走行が可能である。図3に実際の走行中の点群と走行経路の様子を示す。

またAwが改良された場合、ネットワークから機能をアップデートするOTA(Over The Air)なども開発されており、これらの新規機能に関して、車両とAwのエラー情報などを三社で共有しながらAwを評価し、製品全体としての成熟を図りつつ、今後の自動運転車両に必要な機能の蓄積を行ってきた。

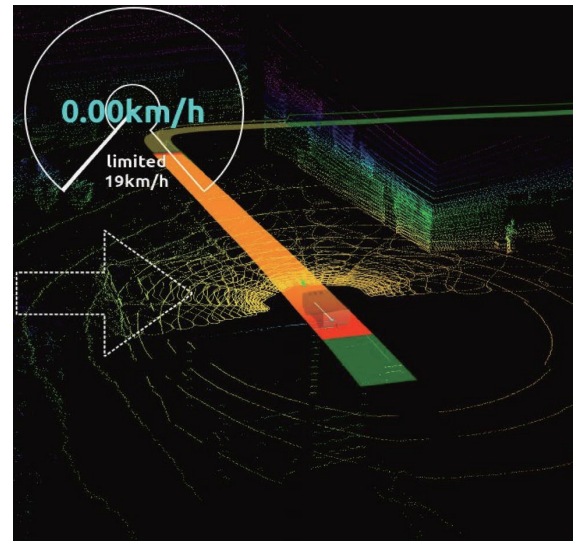


図3 構内を自動走行する「FG-01」:
3D点群データの取得状況と経路生成の様子。経路上に未知の点群を検出すると障害物と認識し安全に停車する。

3-2. 無人搬送システム

「FG-01」の無人搬送システムは、Awをベースに、各種工場向けの追加機能を組み合わせて構成している。

Awは、3D-LiDARとデジタル地図のみで、自動運転機能を実現することができ、磁気ネイル等、走行経路を表現するためのインフラ設備を必要としない。このため、初期導入コストを抑えて省人化ソリューションを提供することが可能である。無人搬送システムの全体構成を図4に示す。

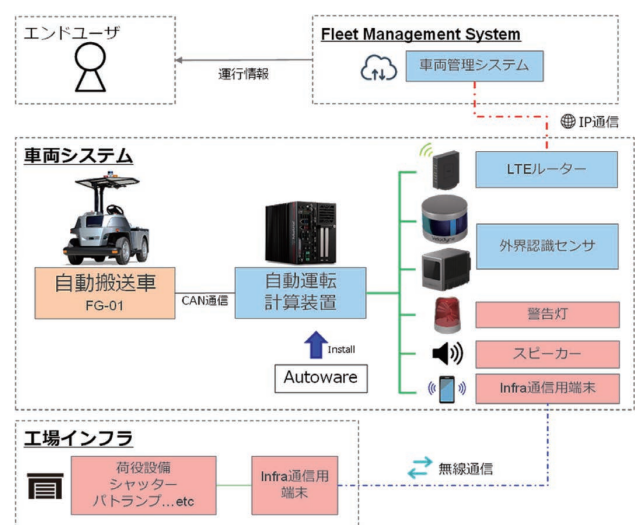


図4 無人搬送システム

3-3. 狭い工場通路の物流を可能とするコンパクトな車体

「FG-01」車体開発にあたり建物内部の物流ができるコンパクトな車体をヤマハモーターパワープロダクツ株式会社(以下YMPC)製ランドカー(以下LC)ベースで検討した。LCとの部品や製造工程の共通化によって、部品コスト、投資および開発工数を削減することが重点テーマの一つであった。狭い建物内部を走行するためにはホイールベースの短縮は必須でありフレームの新作は避けられなかったが、LCのサスペンションおよびステアリング、ブレーキ、モータ等をLCのまま搭載できるフレーム構成とし部品構成を共通化したことで、製造ラインもLCと一部共通化することが可能となった。また、LCと共通化が不可能な荷物積載やけん引に関わる新規の構造部位に関しては、当社の解析技術を活用することにより、強度剛性を確保した上で複雑な板金の使用を減らしつつ既成のパイプ形状を最大限そのまま使用する構造とした。これにより金型投資や加工、溶接の工数を抑えて投資の最小化を実現した(図5)。

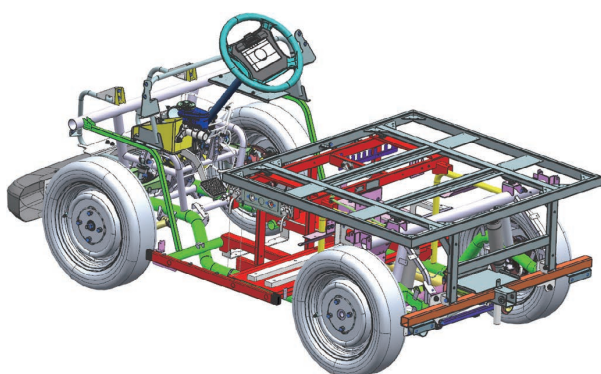


図5 パイプ材を活用したフレームワーク

3-4. 稼働率向上のためのバッテリー交換システム

BEV(Battery Electric Vehicle)にはエネルギー密度や安全性の制約により充電ごとの走行距離が短く、充電には長い時間がかかるという課題が未だ存在する。一方、工場における物流は操業時間中常時稼働できることが求められるため長時間の充電による停止をすることは困難である。そこで「FG-01」では最大限まで車両の稼働率を向上させることを目的とし、クレーンやフォークリフトを使用することなく、一人でバッテリーを簡単に交換できるシステムを開発した(図6)。これにより数分のバッテリー交換だけで稼働し続けることが可能となり、長時間操業する工場物流の需要に対応できる車両となった。

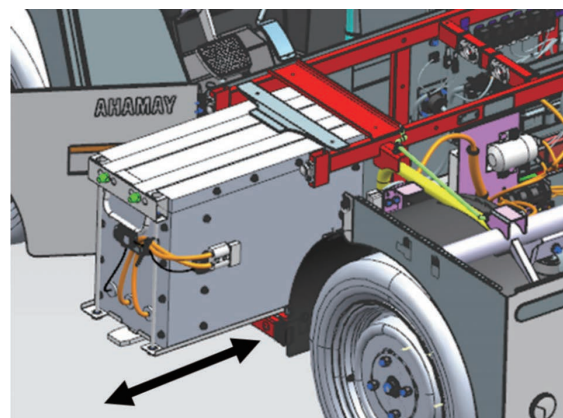


図6 バッテリー交換構造

3-5. 駆動モータのサーマルマネジメントシステム

高負荷、連続稼働、力行効率が低い低速が増加するなど従来と異なる使われ方で、モータの温度上昇が課題となる。内部の温度変化を予測できる非定常の熱伝導、熱伝達、発熱(電流、摩擦)モデルを開発、実装し、モータ保護を行った。

ブラシモータの構成部材をステータ側の界磁コイルとコア、モータカバー、ローター側のブラシとアーマチュア、モータ内外の空気に代表させ、各パーツの熱収支をモデル記述し結合した(図7)。これにより駆動モータの全体の熱収支、各部の温度変化が計算できるようになった。熱伝導率は部材の物性値、熱伝達率は論文から相場値で0.9以上の高い相関を示した^{[1][2][3][4]}。そこから実走データを元に熱伝達率を最適化し同定した。初期温度が合えばRMSE(Root Mean Squared Error:二乗平均平方根誤差)3℃以下と高い精度を示す。この精度を維持しながら、コントローラへ実装できるレベルへ分割要素を減らし、時間刻みの幅を広げ、計算コストを圧縮して実装することができた。課題は初期温度の決定で、車載ではモータカバー温度を計測して参照温度とし、初期温度のあたり付けと収束性を高めている。この機能から温度上昇にともなう走行可否を判断し、モータ保護を実施している。

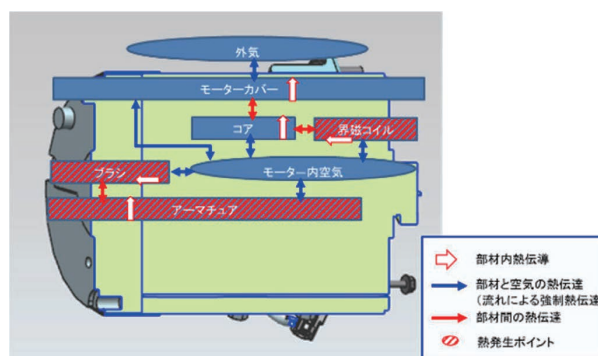


図7 駆動モータのサーマルマネジメント

3-6. 自動運転を支える高精度な角度検出と故障検出機能を兼ね備えた舵角センサ

車両の進行方向を検出する舵角センサ(図8)は前左輪・前右輪に近い位置に搭載されており、前輪タイヤの切れ角を検出する。舵角センサは旋回時に前輪が転舵する中心軸上に取り付けられており、フロントサスペンションの伸縮の影響を受けずに純粋な切れ角を得ることができる。また、舵角センサを左右の二重系とすることでセンサ値の比較による故障検出も可能としている。なお、「FG-01」では一般的な四輪車と同様にアッカーマン機構が採用されており、旋回時では内輪と外輪で切れ角が異なるため、舵角センサ値を操舵制御や故障診断に用いる際には切れ角の差異の影響を無くすための角度変換を実施している。

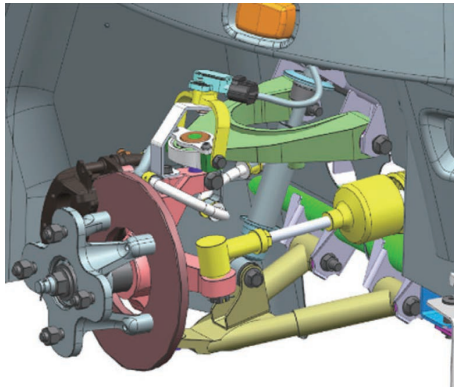


図8 舵角センサレイアウト

3-7. 部品レイアウトと放熱設計のための CAE 活用

「FG-01」は荷物積載用の荷台寸法を大きく取ることが求められ、相対的に無人搬送システムの構成部品を限られたスペースにレイアウトする必要がある。また、無人搬送システムは、車両の周囲環境をリアルタイムに把握するため、負荷が高い演算を繰り返し実行しており、計算端末から発生する熱量を効率的に放出するための熱設計も重要である。

図9は新規開発した、無人搬送システムデバイス収納用コントロールBOXの熱流体シミュレーション結果であり、筐体内の空気の流れとヒートスポットを評価した時の様子である。開発の初期段階からCAE(Computer Aided Engineering)を活用し、車体設計、電装設計、熱流体解析の担当者が連携することで、厳しい制約条件下でも、高い部品充填効率と放熱性能を両立させることに成功している。

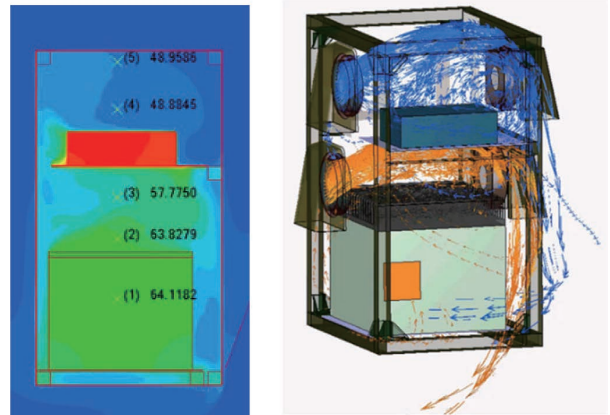


図9 放熱性能評価のための、
熱流体シミュレーションの様子

4 おわりに

eve、T4、YMPC、当社、各社の企業文化、風土が違う複雑な環境下でのモデル開発であり、価値観の違いにより開発中いくども衝突したが、最終的には深く合意し、お客さまのニーズにこたえる自動搬送運転車両を世の中に送りだすことができた。引き続き市場の声に耳に傾け改善に努め、自動運転技術を活用した省力化に貢献していく。

※Autoware は The Autoware Foundation の登録商標です。

■参考文献

- [1] 異材界面における接触熱抵抗の評価, 福岡俊道, 日本機械学会論文集(A編), 76巻763号(2010)
- [2] エレクトロニクスのための熱設計完全制覇, 国峰尚樹, 日刊工業新聞社
- [3] 波動テイラー渦流れの変調, 黒田泰平, 可視化情報, 27巻(2007)
- [4] 溝付回転二重円筒内流動の可視化観測, 湯浅朋久, 日本機械学会論文集, 第83巻(2017)

■ 著者



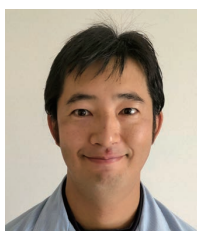
岡田 健史
Takeshi Okada
技術・研究本部
技術開発統括部
プロジェクト推進部



岸 知昭
Tomoaki Kishi
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



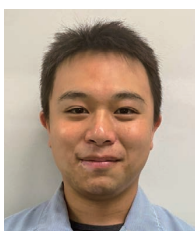
西村 政哉
Masaya Nishimura
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



實生 達朗
Tatsuro Mibae
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



中谷 和弘
Kazuhiro Nakatani
技術・研究本部
技術開発統括部
制御システム開発部



松本 順文
Yorifumi Matsumoto
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



山内 拓也
Takuya Yamauchi
技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部