

人・モノの移動を自動化・省人化する自律オフロード四輪

Autonomous Off-road vehicles Enables Automation and Labor-savings of Human and Material Transportation



石井 宏 志①* Hiroshi Ishii
 佐野 敦 司②※ Atsushi Sano
 長坂 和 哉③ Kazuya Nagasaka

高齢化による労働人口の減少や自然災害への対応などの社会課題解決に向けた取組みとして、作業の自動化・省人化を目指した自律走行車両の開発に取り組んでいる。

舗装路だけでなく山間部などの起伏のある地形においても、自律走行を可能とするための要素技術を確認した。また、路面粗さや旋回半径などを考慮した独自の最適自律走行ロジックを開発し、実車においてその優位性を検証した。

As an effort to solve social challenges, such as a decreasing labor force due to an aging society and natural disasters, we are developing autonomous vehicles with the aim of achieving automation and reducing labor.

We have demonstrated element technologies that allow such vehicles to drive autonomously not only on paved roads but also on uneven surfaces in mountains and other areas. Also, we have developed a unique optimal autonomous driving logic that takes into account road surface roughness, turning radius and other such conditions and verified its advantages with the actual vehicles.

まえがき

高齢化による労働人口の減少や自然災害への対応のため、作業の自動化・省人化を目指した自律走行車両が求められている。

1 背景

舗装路を対象とした自律走行車両の研究開発が進められているが、今後は未舗装路や山間部などの起伏のある地形においても、人・モノの移動において自動化や省人化が求められる可能性がある。

当社はオフロード多目的四輪車「MULE」シリーズを販売しており、これらは主に北米の大規模農場や工場などでの移動用・運搬用として使われている。そして、未舗装路や山間部なども走行できる走破性能と、車両自身の堅牢さで広く支持されている。自然災害やパンデミックなどにより人々の移動が制限される中、物流面を中心に自律化の取組みが加速している。

2 自律オフロード四輪

新型コロナウイルス蔓延の影響下でも、この「MULE」

シリーズの市場は伸長を維持しており、各社新しいフィーチャーを導入して市場競争は激化している。また、この「MULE」のような車両で行う作業についても、コスト削減の観点から自動化や省人化の要望が出てきている。

そこで、なるべく簡易なシステム構成で単純作業や運搬の省人化・無人化を可能とする自律走行車両を開発することとした。具体的には「MULE PRO-FX¹⁾」をベースとして、これが持つ走破性の高さ・堅牢さ・積載性能を生かしつつ、未舗装路走行特有の自律走行技術開発に着手した。

3 開発方針

(1) 商品コンセプト

「MULE」のユーザーから市場調査を行った結果、図1に示すように農場・牧場などを中心に幅広い用途で利用されている中で、物資の運搬や見回りといった繰り返しを伴う定常作業が大きな割合を占めていることがわかった。

これに対し、従来の量産機種に自律走行機能をアドオンして、状況に応じて自動運転／遠隔操作／マニュアル操作の選択ができるようにした。これにより、量産機種ベースの自律走行機能をユーザーに体感してもらい、ユーザーからのフィードバックを得ながら、より良い車両を作り上げていく。



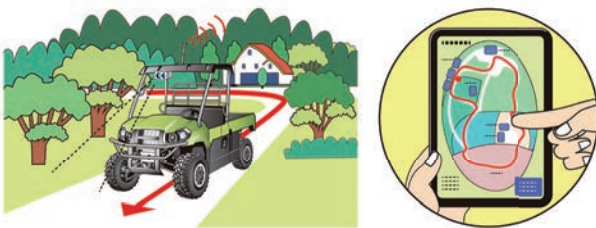
(a) 農場・牧場用 (b) 作業員の輸送
(c) レジャー用 (d) 狩猟 (ハンティング)用

図1 市場調査の概要 (「MULE」ユーザーの用途)
Fig. 1 Overview of market research (for MULE users)

ユーザーとの対話を通じて、「MULE」の走破性の高さ・堅牢さ・積載性能を維持しながら、作業用に特化した無人専用の車体プラットフォームの提供も見据えている。

(2) ユースケース

農場・牧場で行われている定常作業の省人化および自動化をターゲットとして、実運用を想定したユースケースを設定した。図2に示すように、ユーザーは走行経路をタブレット端末などへ入力することで、指定した経路に沿うように自動で低速走行を行う。または、作業開始時に手動運転により経路を記録し、走行経路の指定に置き換えるケースも想定した。



(a) タブレットで指定した経路に沿った走行



(b) 路面環境の変化に応じた走行 (c) 障害物の検知・回避

図2 ユースケースの一例
Fig. 2 Examples of use cases

「MULE」が使用される路面環境は未舗装路であるため、自動走行する際に路面環境の変化に応じた車速の制御や障害物の検知・回避も必要となる。

4 技術課題

未舗装路で安全かつ経路に沿って走行するために解決すべき技術課題を示す。

(1) 悪路状況下での自律走行

一般的な舗装路を走行する車の自動運転システムでは、図3に示すようにカメラ・レーダ・LiDARのセンサ出力に基づき、道路構造をはじめとする走路環境および歩行者や車両などの交通参加者を認識するとともに、自己位置推定機能により全球測位衛星システムGNSS (Global Navigation Satellite System)・地図情報・カメラを用いて地図上での自車位置を認識する。リスク予測機能は、認識された情報を用いて、交通参加者の未来の行動・意図・潜在的なリスクを予測する。これらの上流機能が認識または予測した情報に基づいて、行動計画機能が安全かつスムーズな運転を実現できるように走行軌道と速度を決定する。そして車両制御機能が、駆動力 (パワートレイン)、制動力 (ブレーキ)、操舵量 (ステアリング) を決定する。

一方、未舗装路などのオフロード環境での走行では、泥はねや走行時の振動によってLiDARやカメラなどの環境認識センサが正常に機能しない場合もある。そのため、自律走行システムとして冗長性を持たせる意味でも、環境認識センサに依存しない車両の制御方法が必要となる。

(2) 実機サイズでの経路追従性

想定しているユースケースでは、起伏が激しく路面環境も逐次変化する。車両の積載条件もさまざまであり、自律走行中に積載物の落下または車体の転倒といったリスクも考えられる。そのため、上記のような路面条件において従来のGNSSをベースとした経路追従機能で走行可能かどうか、走行シミュレーションおよび実機サイズでの走行試験により検証する必要がある。

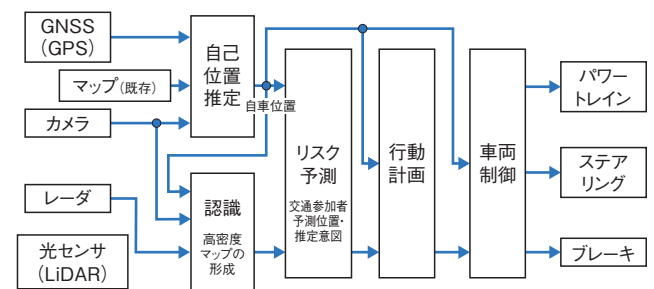


図3 自動運転システムの概念図
Fig. 3 Concept of autonomous driving system

5 要素技術の開発

技術課題で示した「悪路状況下での自律走行」に対して、車体挙動をもとにした悪路状況推定ロジックの構築に取り組んだ。環境認識センサに依存せずに、悪路を安全かつ効率的に走行できるような速度計画作成ロジックを、以下のように構築した。

- 初回走行時の車体挙動から、経路の路面粗さを推定
- 路面粗さと旋回半径に応じた制限速度を設定
- タイヤ力の摩擦円範囲内で加減速を最大化

(1) 路面粗さの推定

走行中の車体挙動から路面粗さを推定するためには、路面粗さと相関の強い車体バネ上加速度・車速・サスペンションストロークなどの計測項目を用いる必要がある。

この中で、計測が容易である車速とバネ上加速度を用いて推定を行うことにした。実使用条件では走行の都度積載条件が変化することもあり、バネ上振動加速度に影響するため積載荷重の違いによる影響も検討する必要がある。

車速・加速度・積載条件が既知である場合に路面粗さを推定可能であるか検証するために、図4に示す路面粗さを変えた3パターンの走行路面において、想定される車速で走行シミュレーションを実施した。路面の凹凸の程度および周波数成分を知る方法としてパワースペクトル密度PSDで示されることが一般的であるため、各路面の粗さをPSDで整理した。シミュレーションから得られた各走行路面別の車速とバネ上加速度の関係を図5に示す。車速とバネ上の上下方向加速度RMSおよび積載条件が既知である場合に、路面粗さの推定が可能である。

(2) 路面粗さと旋回半径を考慮した車速制御

上記の検討で得られた路面粗さの情報および設定された経路情報をもとに、悪路状況下で車速制御の指標となる制

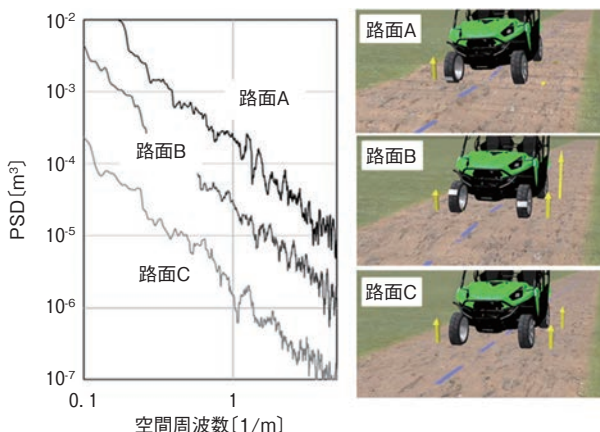


図4 シミュレーションに用いた路面の粗さ
Fig. 4 Roughness of the road surfaces used for simulation

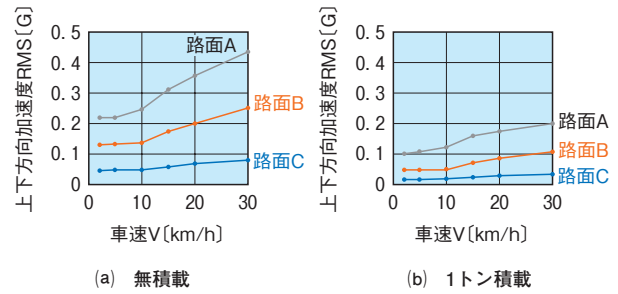


図5 各路面における車速、バネ上加速度の関係
Fig. 5 Relationship between vehicle speed and vertical acceleration

限速度を設定した。制限速度は路面粗さに反比例すると仮定し、路面粗さの代表値として10km/hで走行した場合に推定される値をもとに算出した。また、曲率半径の小さいカーブを走行する際に、積載物の落下を防ぐため旋回時に発生する横加速度が既定値以下となるように、制限速度を設定した。

(3) タイヤ力の摩擦円を考慮した加減速

タイヤの特性上、摩擦円範囲内の力しか生み出すことはできない。つまり、悪路走行中で摩擦円自体が小さくなっている場合や旋回中で横力を発生している場合は、発生可能な前後力が小さくなる。これを考慮して、前後加速度が上限値以下となるように制限速度を設定した。

6 走行試験

技術課題で示した「実機サイズの経路追従性」を検証するために、「MULE PRO-FX」をベースに改修した試作車を開発し、平坦路および起伏を有する悪路状況下での走行試験²⁾を実施した。

(1) 平坦路での走行試験

実機サイズでの自動走行パラメータのチューニングを目的として、平坦路での走行試験を実施した。図6に示すように、最大速度10km/hで通過点を設定して、四角形周回コースと8の字周回コースを精度良く走行できることを確認した。また、遠隔操作によるユースケースも想定して、ラジコン操作による走行制御も確認した。

(2) 起伏を有する悪路状況での走行試験

起伏を有する路面での走行試験結果を示す。図7ではあらかじめ8の字周回コースとして通過点を設定し、GNSSによる経路追従走行試験を実施した。

四角形周回コースにおける最大速度10km/hと15km/hでの走行軌跡をそれぞれ図7(a)と図7(b)に示す。最大速度10km/hでは精度良く走行できることを確認した。一方、最大速度を上げていくとカーブの際に大回りして、経路追



(a) 走行状況



(b) 走行経路

図6 平坦路での走行試験
Fig.6 Self-driving test on a flat road

従性の精度が悪くなることが確認された。以上のように車体の慣性影響により、平坦路では見られなかった旋回時の経路追従性の課題が明らかとなった。今後、車両の制御およびスロットル・ブレーキなどのハード側でも対策が必要となる。

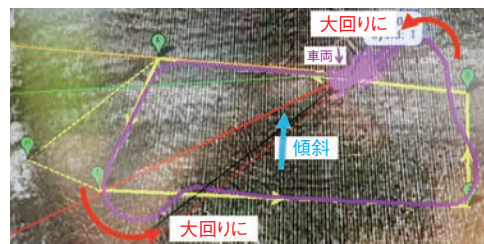
あとがき

労働人口の減少や自然災害への対応などの社会課題解決に向けて、作業の自動化・省人化を目指した自律走行車両の開発に取り組んでいる。

基本的な技術開発を完了させ、今後は国内自治体と協力して実証実験ステージへ移行する。具体的には農場や林道で実際の作業の代替として自律四輪による実証実験を行い、性能や利便性について確認していく。現地のユーザーを始めとするマーケットとの対話を通じながら最適なシステムを構築し、早期の上市を目指す。



(a) 最高速度10km/h



(b) 最高速度15km/h



(c) 傾斜のようす

図7 起伏路面での走行試験
Fig.7 Self-driving test on an uneven surface

参考文献

- 1) 久田, 高橋, 糸尾, 高馬: “オフロード多目的四輪車「MULE PROシリーズ」の開発”, 川崎重工技報, No.180, pp.24-27 (2019)
- 2) 川崎重工業モーターサイクル&エンジンカンパニーの公式YouTubeチャンネル: “Kawasaki RIDEOLOGY meets SELF-DRIVING / 自律走行自動運転” (2020)



石井宏志



佐野敦司



長坂和哉