

令和5年度林業デジタル・イノベーション総合対策のうち 戦略的技術開発・実証事業

森林作業道における目視外無人走行技術を搭載した フォワーダの開発

開発内容のご紹介



2024年2月9日

パナソニック
アドバンステクノロジー

ATR Advanced
telecommunications
Research Institute International



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

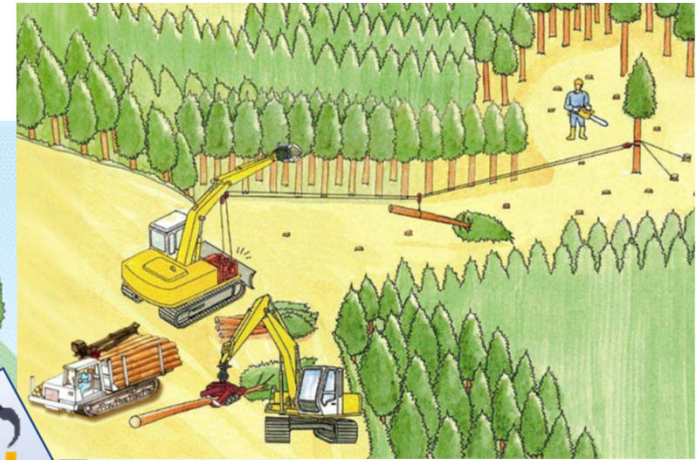
TAT 国立大学法人
東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

MOROOKA

0_1. 日本の作業システム

路網と高性能林業機械等を組み合わせ

- フォワーダ（集材車両）が不可欠
- 距離が長くなると生産性が低下
→ ボトルネック
- 労働災害の発生



集材作業の自動化
・遠隔操作化が必要

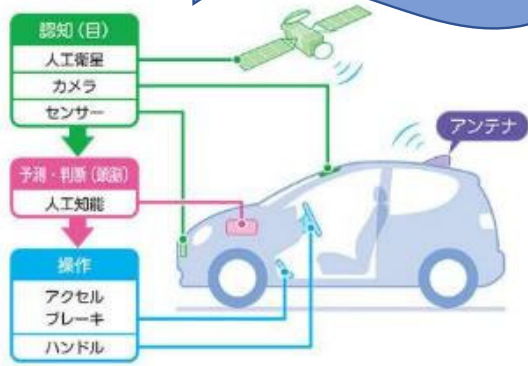
0_2. 日本の森林の作業環境

土木の自動運転



自動車の自動運転

農業の自動運転



森林
では?

- 建造物が少ない
- 立木、奥深い地形
- 携帯電波が届かない

- 認知が難しい
- RTK-GNSS (Ntrip) ができない

自然物の検知
通信手段の確保
SLAMの利用

0_3. SLAMとは？

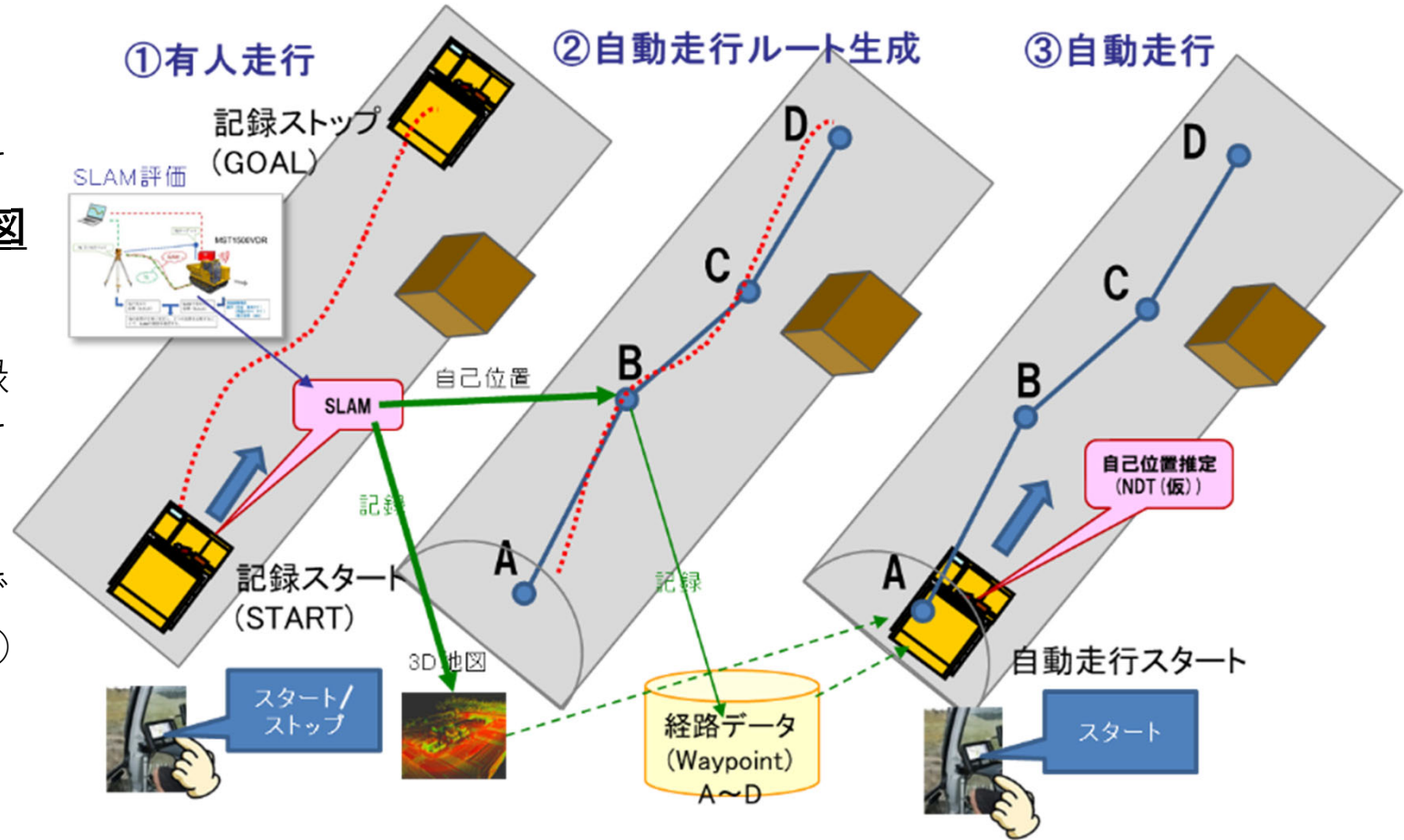
→いま自分がいる位置の推定と
周囲の環境の構造把握を同時に行う技術

■フォワード自動走行

①有人走行：人間が操作して走行し、**LiDARによる3D地図生成 & 自己位置推定**

②自動走行ルート：①で記録された自己位置情報に基づいてルートを生成

③自動走行：リアルタイムで自己位置を推定しながら、②で生成したルートに追従



0_4. これまでの開発・実証等の実績（～令和3年）

取組概要：フォワーダの自動運転に必要なセンシング技術の高度化及び森林作業道の高精度3Dマップ化等に係る開発・実証を実施し、集材・運材作業の**省人化、効率化、安全性の確保**を図る。

取組事業者：（株）諸岡、パナソニック アドバンステクノロジー（株）、森林総研、東京農工大学

令和3年度までの開発・実証等の実績

短距離、緩勾配でのセンシング技術の適用可能性検討



【令和2年度開発・実証実績（補助事業※）】

- ・遠隔操作走行の実現。
- ・センシング技術等を活用した自動走行試験。（20m程度の自動走行成功。）

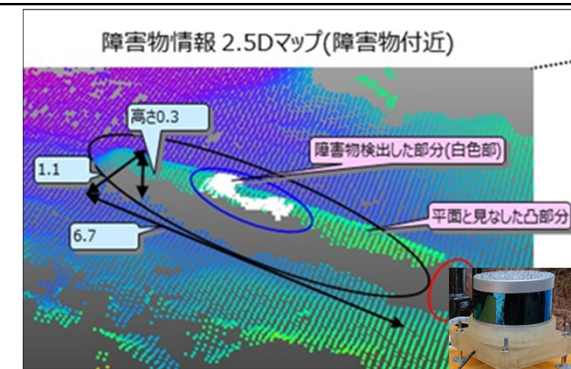
※（林野庁）令和2年度省力化機械開発推進対策



【令和3年度開発・実証実績（自主開発）】

- ・ベース車の荷台を、クランバンク仕様に改良。
- ・センシング技術等を活用した自動走行試験。（自動走行とラジコン操作を組合わせた無人集材作業に成功。）

参考：3D-LiDERによる
路面形状のデータ化画像



0_5. これまでの開発・実証等の実績（令和4年）

令和4年度の開発・実証等の実績

実用化に向けた、長距離、急勾配での自動化走行技術の実証実験

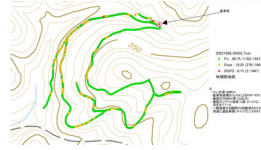
① 自動運転の早期実用化に向けたセンシング技術の高度化

【走行可能シーンの拡大】

本事業の取り組み内容：

国内の各種林業現場を実地調査し、作業シーン別のGNSS利用可能性を明らかにする

結果：今回の常陸太田市の現場では80.7%がFixとなっており、**m級の精度**でGNSS情報が取得できていることが確認できた。



【山地災害による環境変化への対応】

本事業の取り組み内容：

作業道安全性判断の実現に取り組むまた**予防安全**への展開に着手し、早期市場投入を目指す

結果：

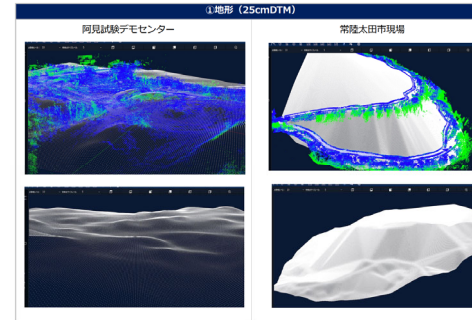
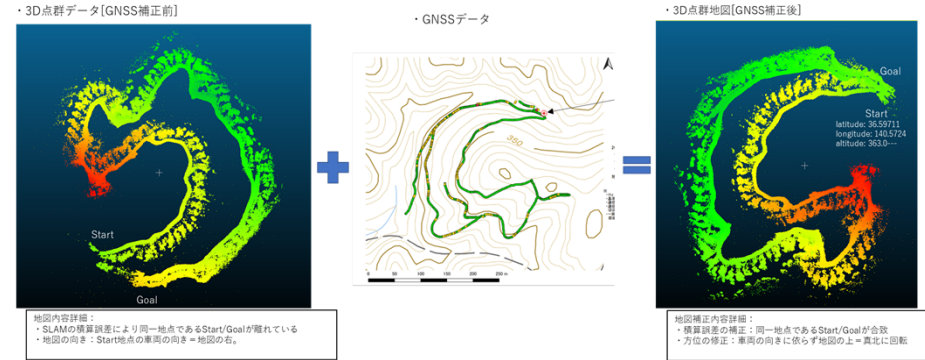
平地において**人サイズのものを検知して車両を停止**させる機能のDEMOを実施した。

また、作業道安全性判断の実現に向けて、

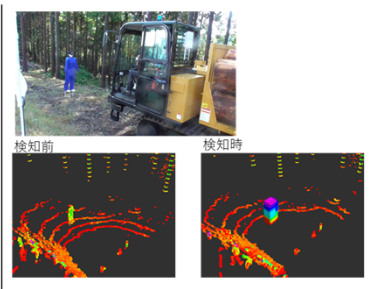
- ・実現場（狭隘路や勾配のある路面）における障害物・道幅の検知アルゴリズムの検討
- ・検知後の走行停止、減速などの車両制御の検討に着手した。

② 森林作業道の高精度3Dマップ化

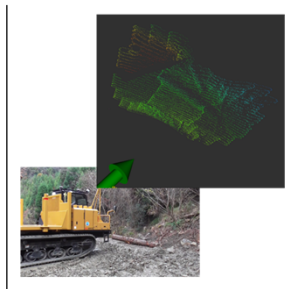
LiDARを用いたSLAMによって作成した地図をRTK-GNSS情報で補正することで、**地図全体の積算誤差や方位が修正**された。
今回は、RTK-GNSS用いて測定した2点以上の点を元に地図を補正する方法を採用したため、MBによる方位情報は用いていない。



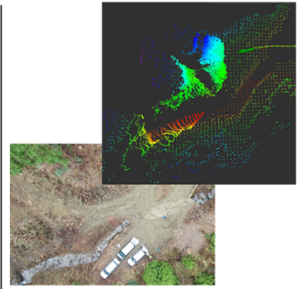
■ 障害物検知DEMO（林業機械展）



■ 障害物（倒木など）検知



■ 道幅検知（土砂崩れ）



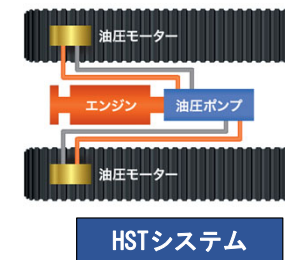
1. 令和5年度 事業内容

①急勾配・ぬかるみにおけるフォワーダ走行の安定化【フォワーダ走行安定化】

走行環境の厳しい国内森林作業道で自動走行を実現する場合、急勾配の上り・下り、材の積降状態により車両制御特性が大きく変化するため自動運転システムの適用先の拡大に向けて車両制御技術の高度化が必要。

【取り組み内容】

ホイールオドメトリ情報のフィードバックによる車両制御機能の開発及び、制御特性の変化への適用範囲の実証実験



②遠隔監視・操作技術の開発・実証【林内通信インフラ】

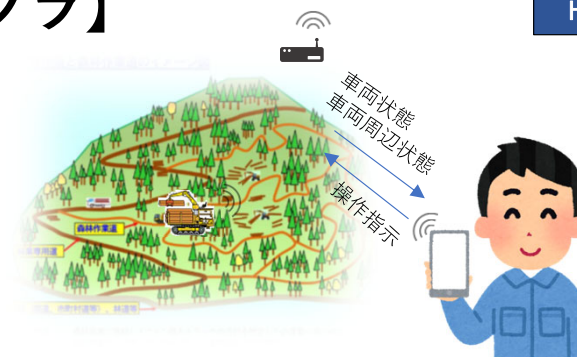
フォワーダの自動運転の実現のために遠隔監視や遠隔操作が必要となる。

遠隔操作：土場や伐採現場からの自動走行開始・停止指示。

遠隔監視：障害物検知状態や車両状態の監視及び、カメラによる周辺監視

【取り組み内容】

- ・森林内では公衆無線の届かないため林内通信インフラの構築の開発
- ・車両及び車両周辺状態の監視及び操作指示のためのユーザーインターフェースの開発



③予防安全機能の搭載

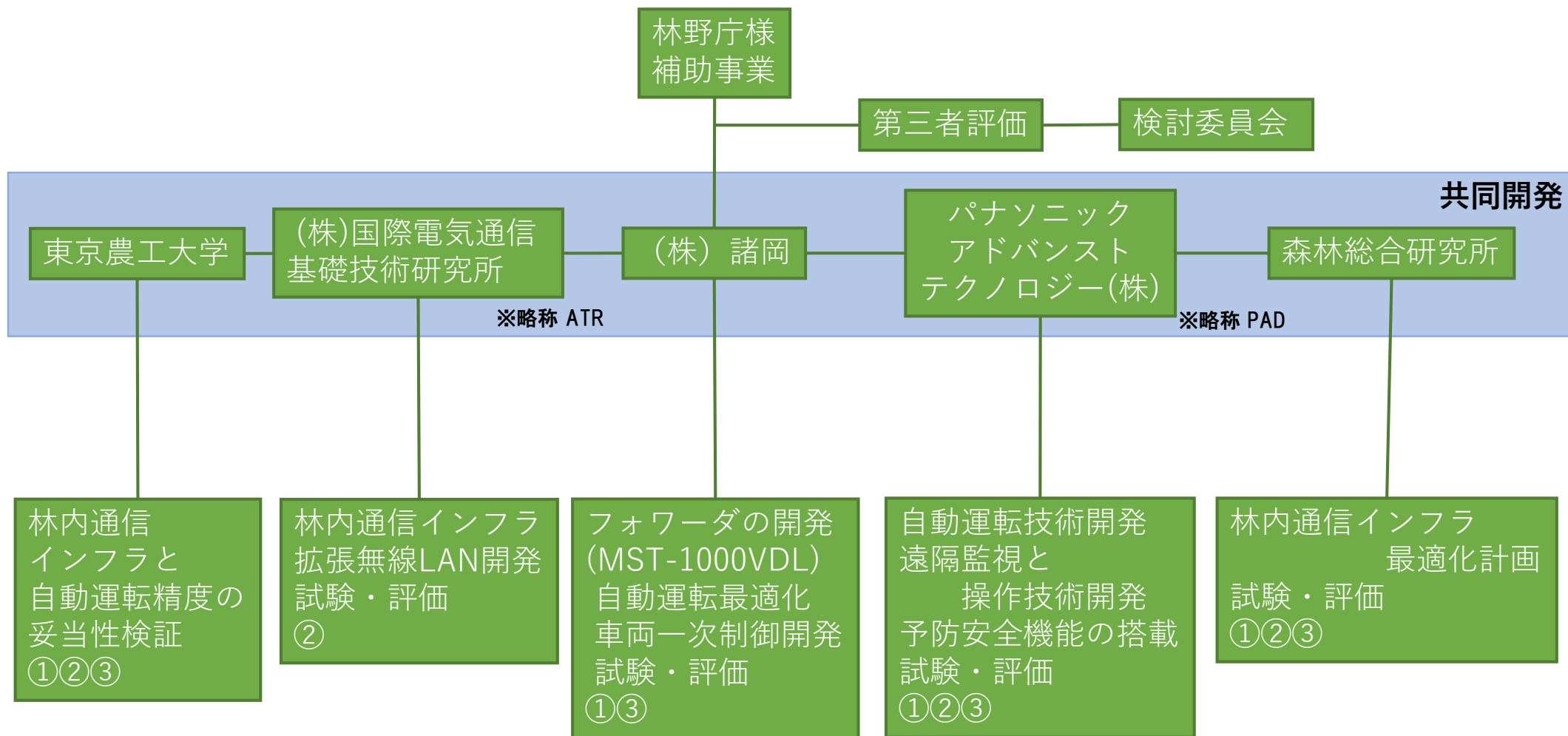
狭隘な国内森林作業道での自動走行車両の安全性確保のため、障害物（人、倒木、瓦礫など）の検知や崖の検知が必要。

【取り組み内容】

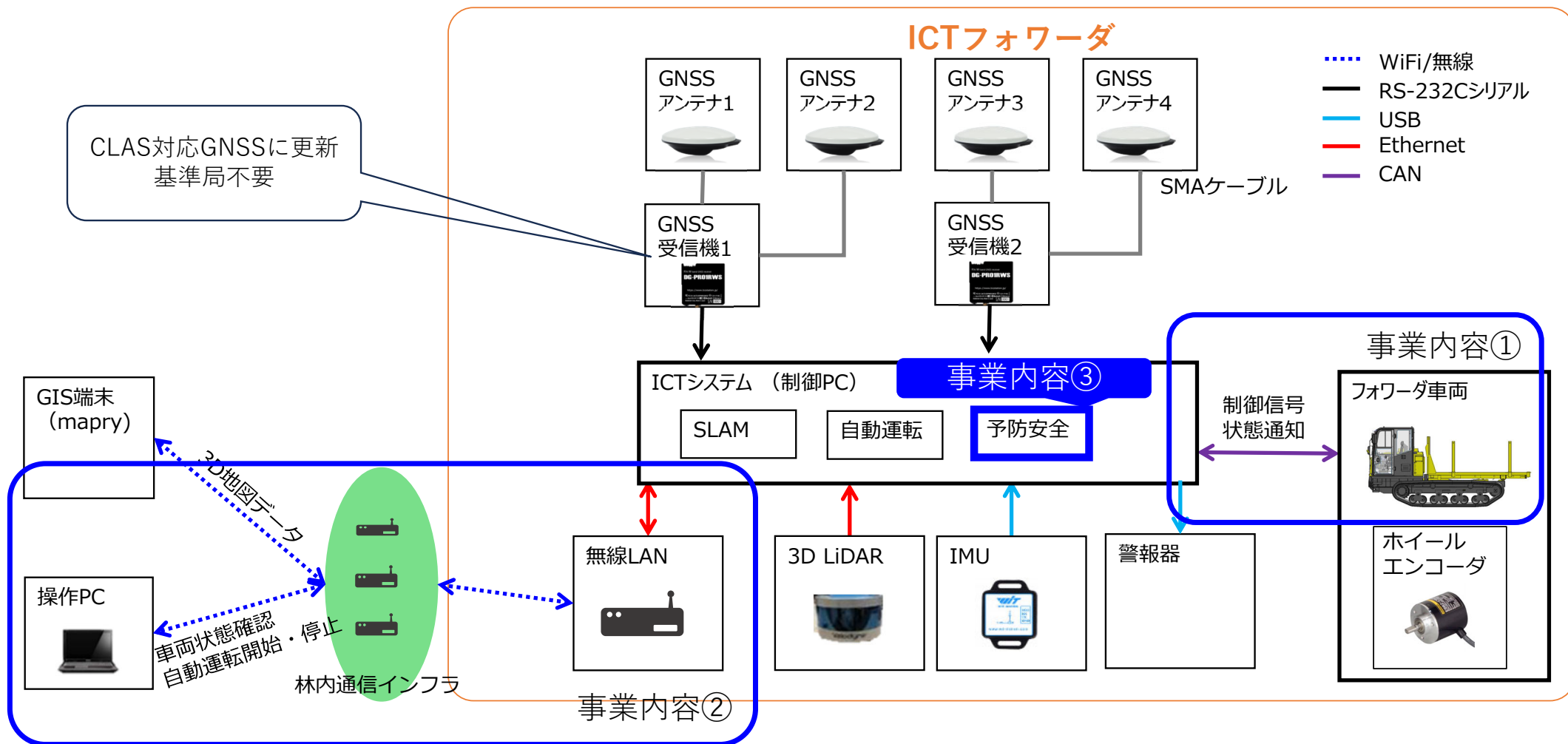
転落防止に向けた崖検知アルゴリズムの開発・実証実験



2. 実施体制と役割



3. 自動運転システム構成



4_1. フォワード走行の安定化

■ フォワード走行安定性の課題

課題1：路面状態や積載重量などで操舵特性が変わる。

クローラは路面との接地長が長く、路面状態や積載重量などで操舵時に発生する路面摩擦・走行負荷が大きく変化し、操舵特性が大きく変わる。

課題2：登坂走行と降坂走行では、走行特性が大きく変わる。（機械ヒステリシスが大きい）

登坂（加速）と降坂（減速）では、エンジンと油圧システムにかかる力の方向が逆転し、動力システムとしての特性が大きく変わる。機械ヒステリシスが大きくなる。

課題3：エンジン回転数による車両速度・加速度の特性が変わる

加速(登坂)と減速(降坂)や積載重量に応じて必要とされるエンジン馬力が変化し、これに対応するためエンジン回転数を増減するが、エンジン回転数によって油圧システムと車両速度変化の特性が変わる。

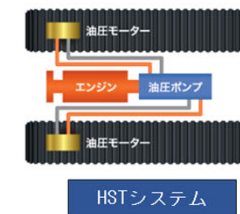
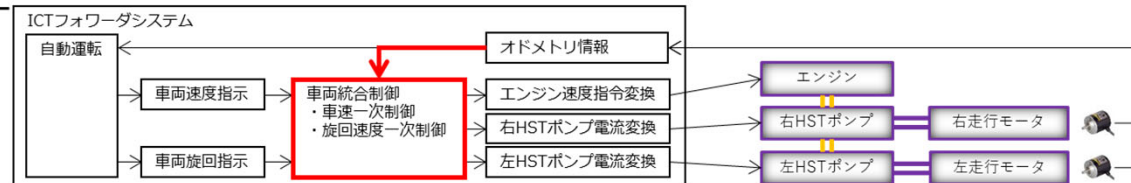
■ フォワード走行安定化の概要

自動運転システムからの旋回指示に対する応答性の向上、走行環境による特性変化の抑制のため、オドメトリ情報に基づくエンジン、左右ポンプ、左右走行モータのフィードバック制御を実装した。

○改善前制御フロー

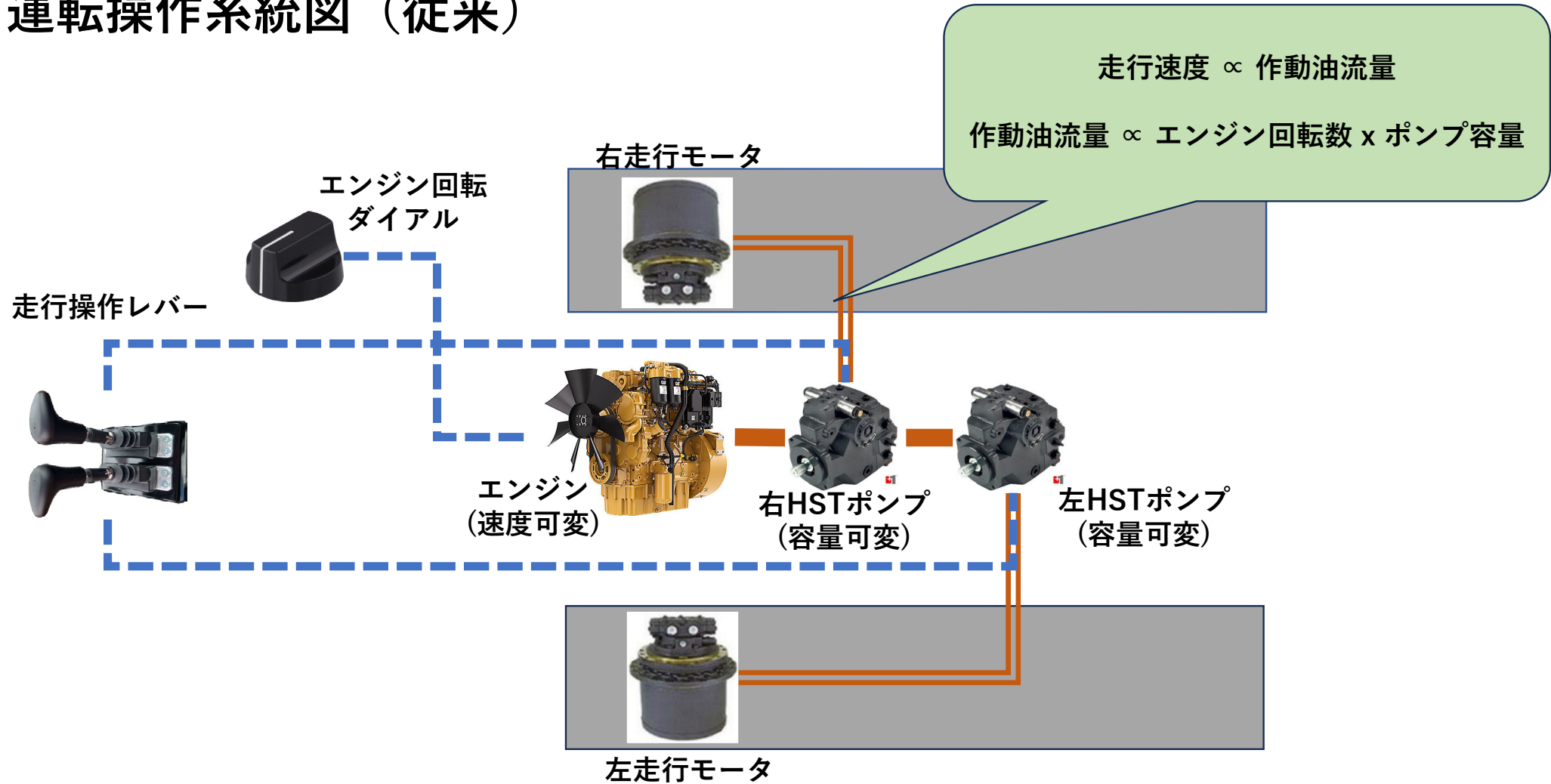


○改善後制御フロー

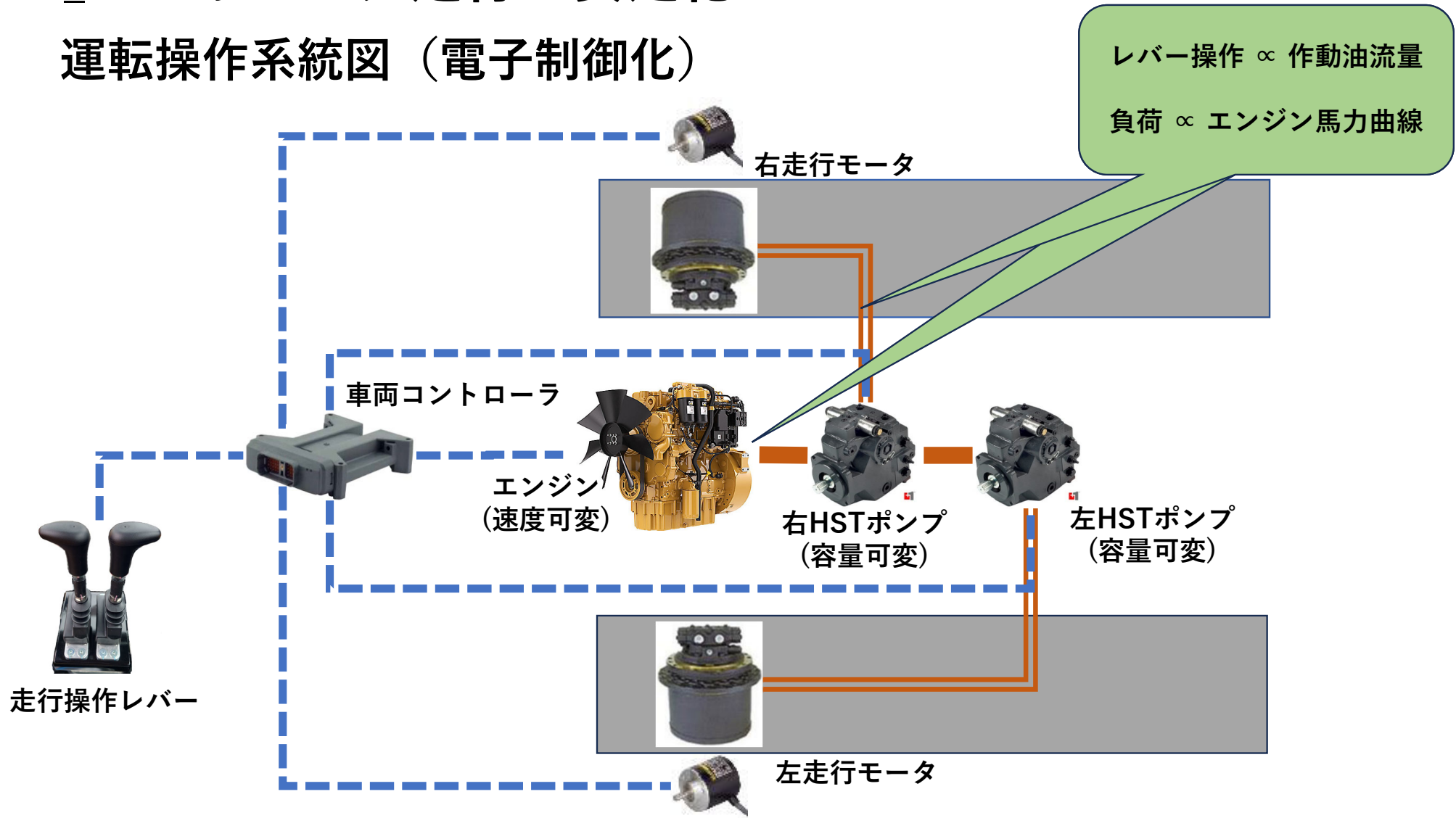


4_2. フォワーダ走行の安定化

運転操作系統図（従来）



4_3. フォワード走行の安定化 運転操作系統図（電子制御化）



4_4. フォワード走行の安定化

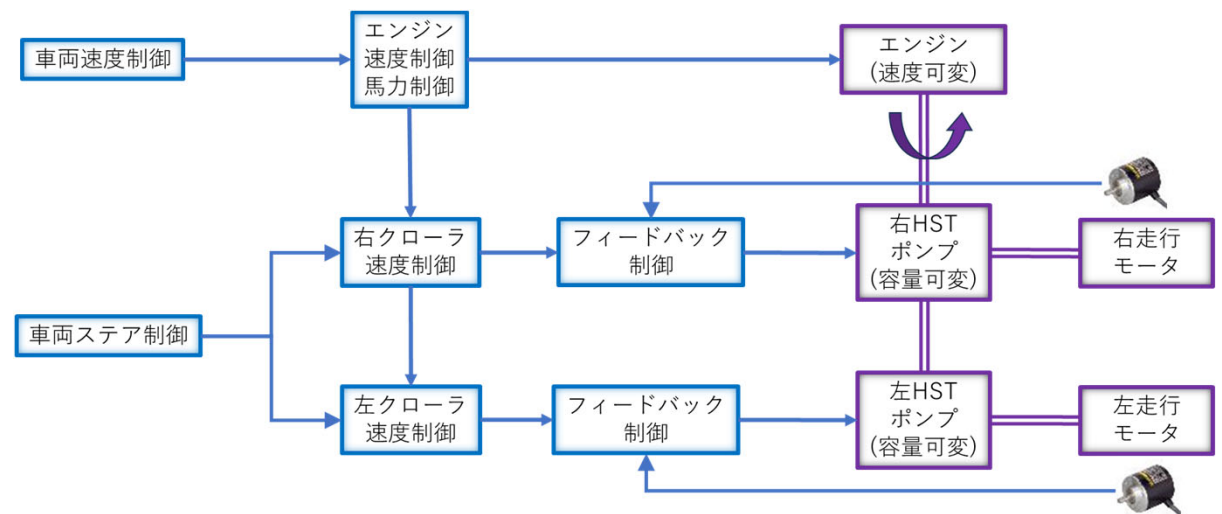
■ フォワード走行安定化の開発概要

電子制御化(手動運転)技術の自動運転モードへの適用

自動運転システムとの最適マッチング

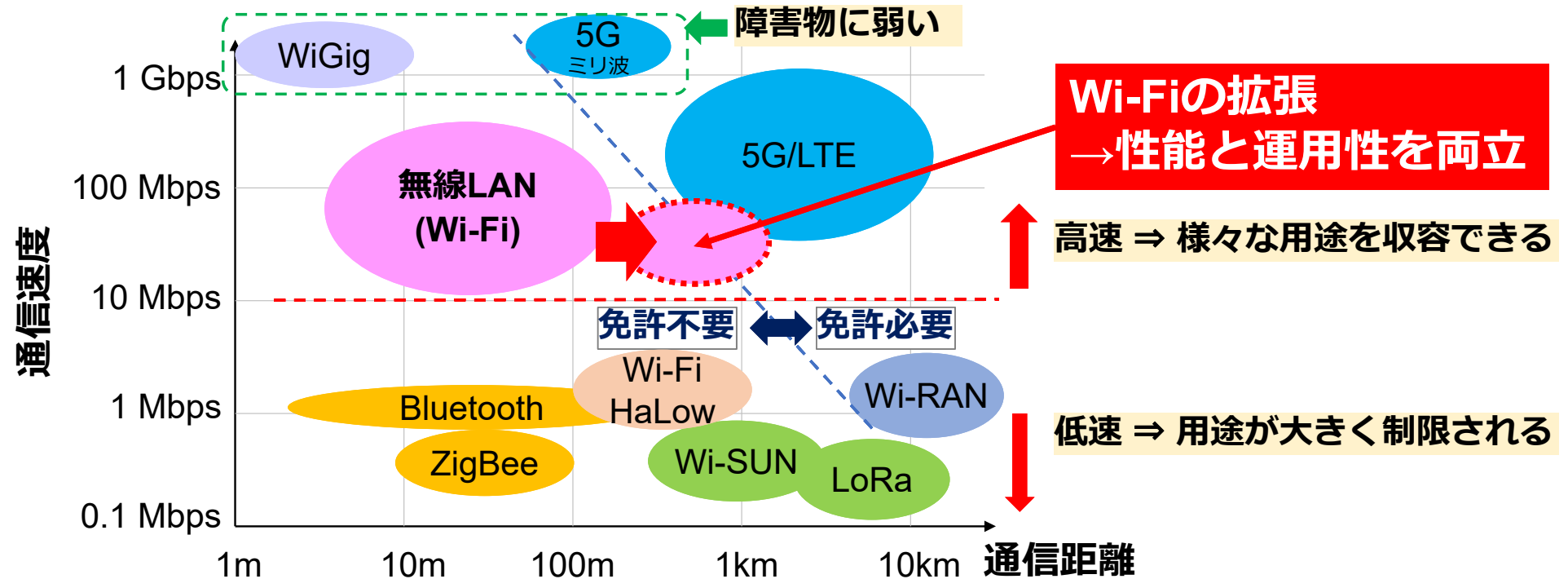
- ・ エンジン & HSTポンプ連動制御
- ・ エンジン馬力制御
- ・ アンチストール制御
- ・ 左右連動HST出力リミット制御(ステア特性安定化)

走行モータ速度制御(フィードバック)の適用



4_5. 林内通信インフラ

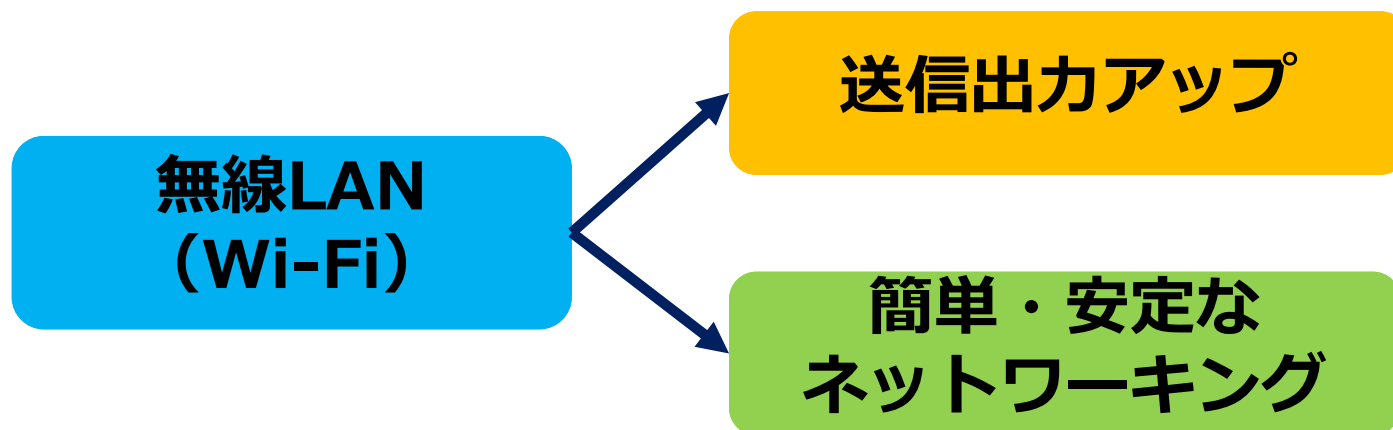
林業に適した無線通信は？



- 免許の要否: 免許が必要になると、自営が困難でコスト高
- 通信速度: 複数の用途を収容するには10Mbps以上は必要
- 通信距離: 見通し外も含め100m~の通信エリアが必要

4_6. 林内通信インフラ

林内ネットワーク向け無線LAN拡張

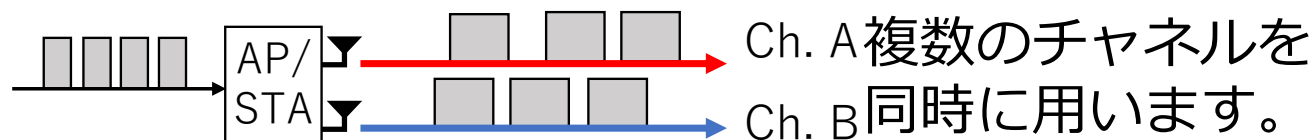


- **送信出力アップ** ⇒ 高出力通信でエリア拡張。既存制度の活用と拡張を検討
 - 「無人移動体画像伝送システム」の活用し評価
 - 将来的な林業向けの制度拡充の材料にも
- **ネットワークング** ⇒ 複数台をつないでエリア拡張。事業者が自前で敷設できる容易さを確保
 - 無線メッシュNWが代表的。ただし、調整が難しく現場運用のハードルが高い
 - マルチダイバーシティ無線LAN（ATR保有技術）の拡張で対応

4_7. 林内通信インフラ マルチダイバーシティ無線LAN (ATR保有技術)

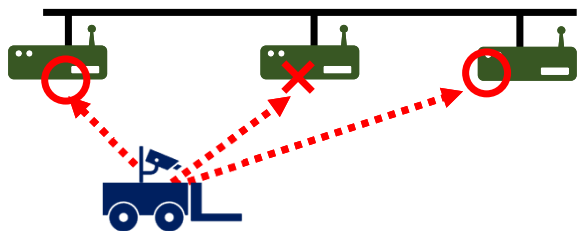
3種のダイバーシティの効率利用で
安定なWi-Fiを実現

①周波数軸上のダイバーシティ マルチチャンネル伝送



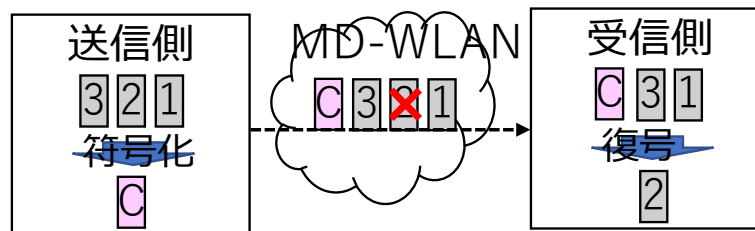
②空間的なダイバーシティ マルチポイント通信

複数の機器で同時に受信 (送信) します。



③時間軸上のダイバーシティ 適応符号化伝送制御

冗長パケットを効率的に送信します。

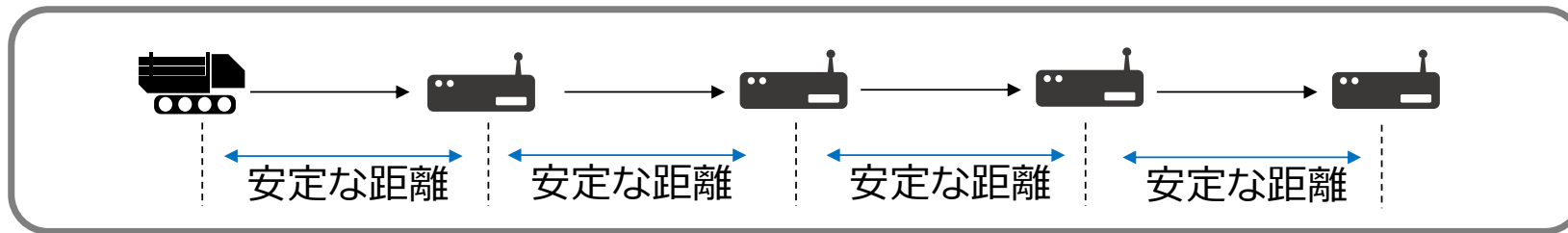


4_8. 林内通信インフラ

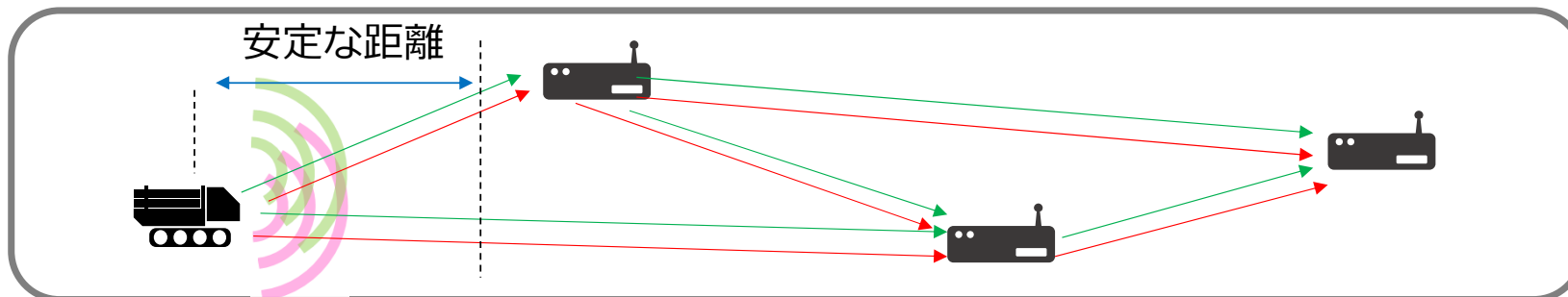
マルチダイバーシティ無線LANによるネットワークング

無線の特徴：**安定な通信距離** << **通信限界**

例)
安定：100m
通信限界：250m



一般の無線メッシュ：安定な距離以下での配置が必須
→ 台数が増えコスト増、設置の難易度も上昇

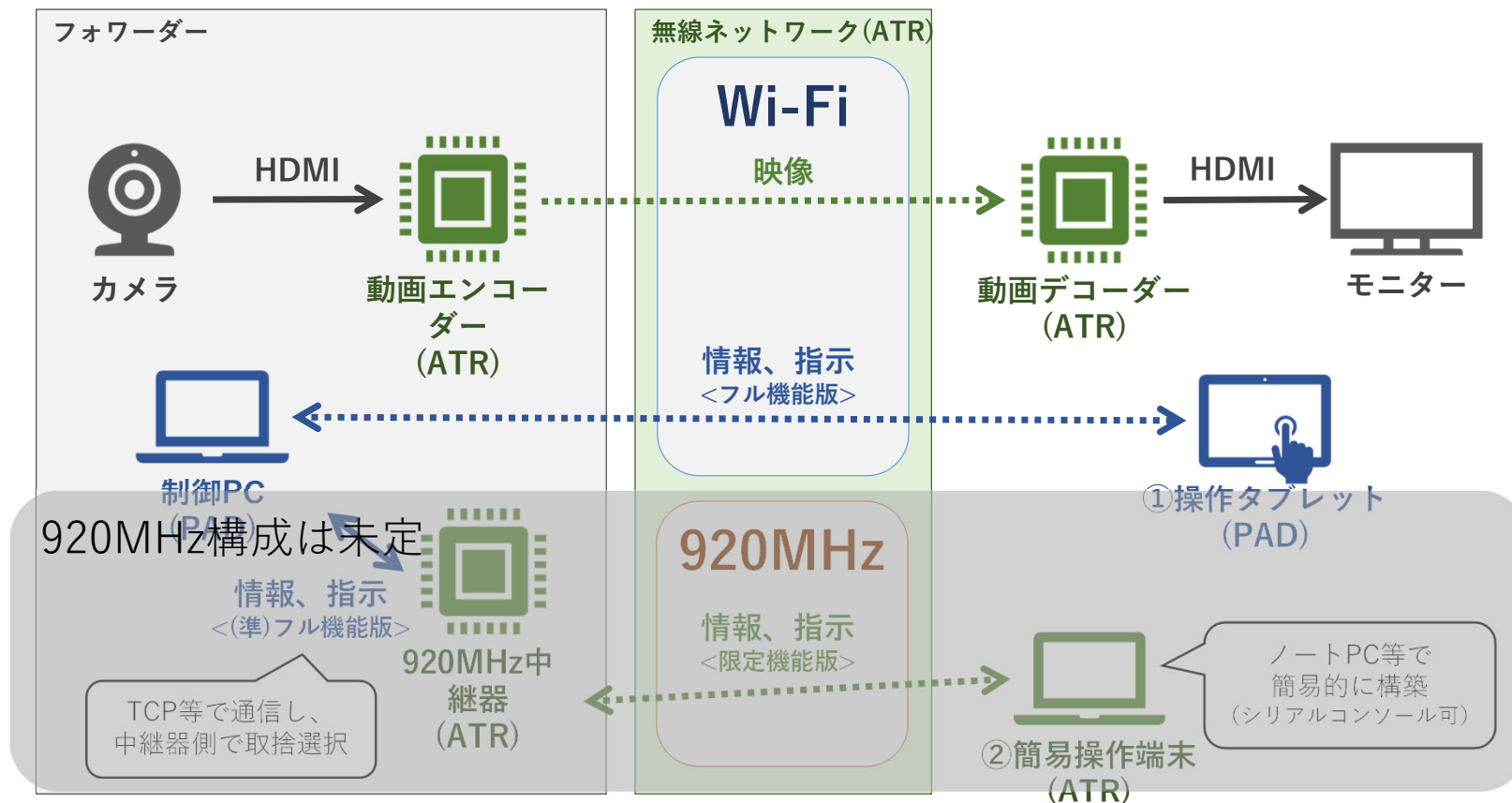


森林作業
道で評価

MDメッシュ：ダイバーシティにより“安定外のエリア”も使用
→ 少ない台数で効率的に広域をカバー

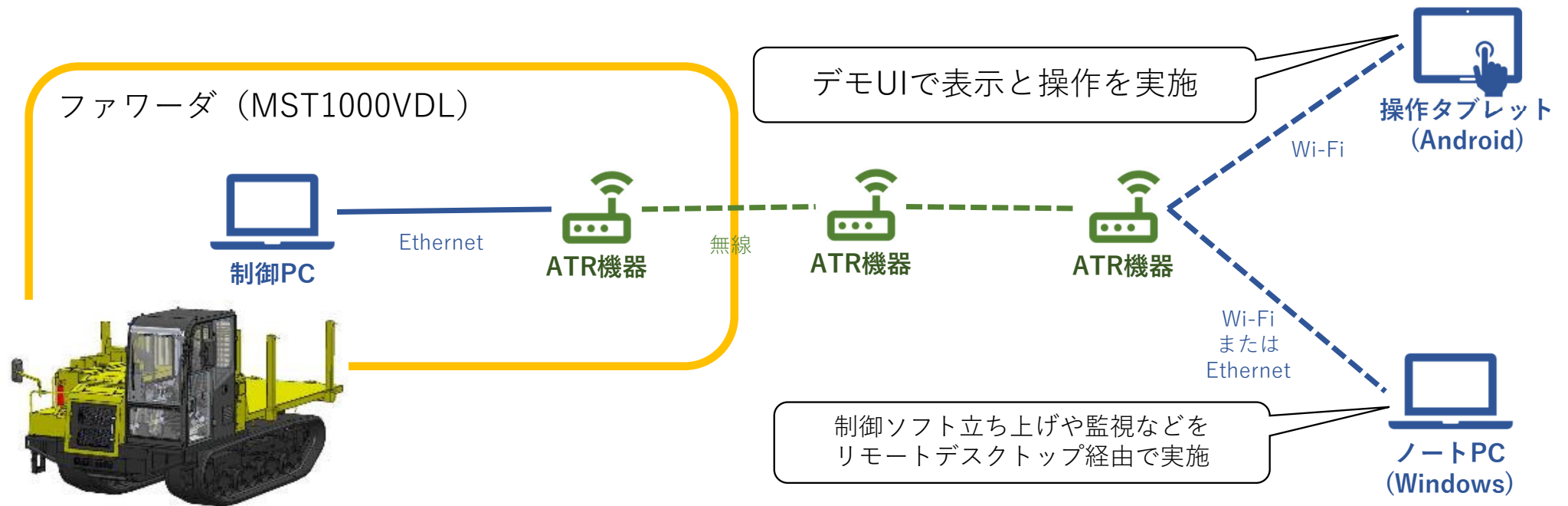
4_9.林内無線実証システム構成案

- 基本操作はWi-Fi圏内で①操作タブレットを用いて実施
- Wi-Fi圏外での自動走行中に②簡易操作端末から最小限の機能（動作モニタリング、停止・再開指示など）を実施



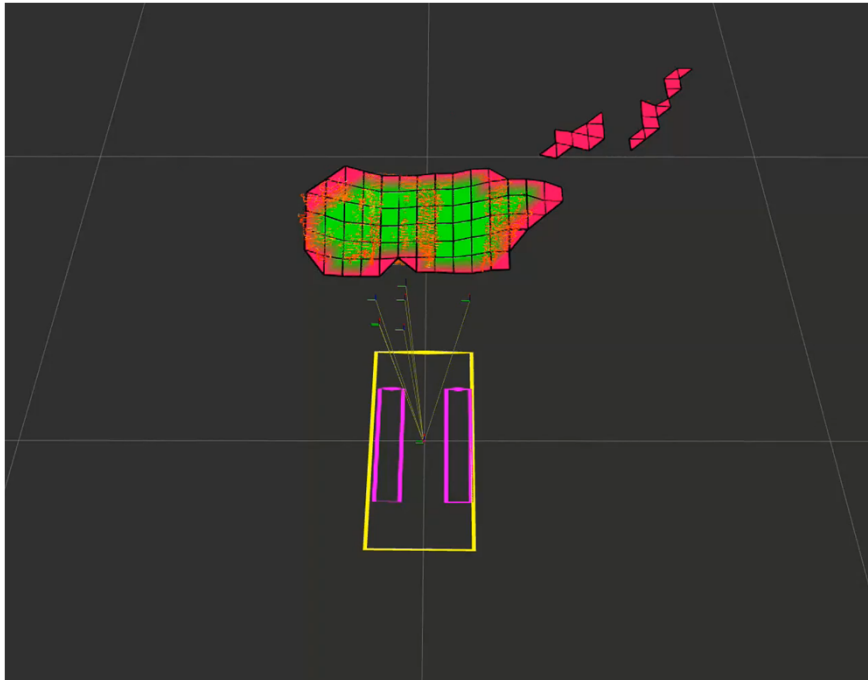
4_10.林内通信インフラの構成（令和5年度成果）

無線機器3台を土場、頂上付近、中腹に設置し、遠隔映像の確認及び、タブレットによる簡易操作の実現性を確認



4_11. 予防安全機能の搭載

- ・ 崖検知アルゴリズムについて検証中。



平面部分と車幅を比較するロジックを開発。

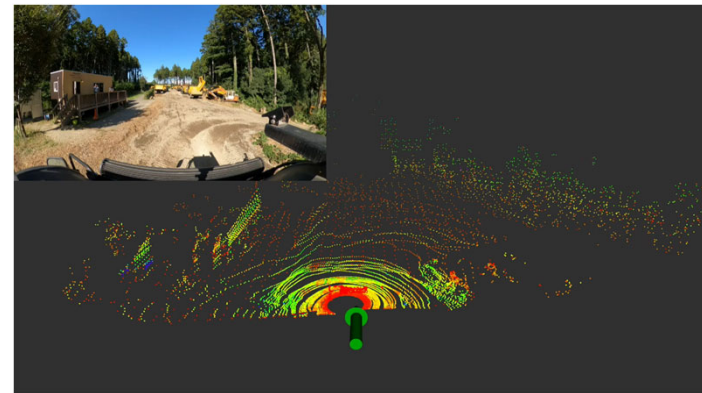
- ・ 平面：オレンジ
 - ・ 障害物（崖や法面）：ピンク
- 実データを用いた検証を実施中。

- ・ 崖検知に必要なセンサー（LiDAR）
VLP16だけでは死角が多いため、
LIVOX社製 MID-360 × 3 台を装着。



MID-360

- ※販売時のコスト削減も含めてVLP16の代わりに、
MID-360 × 3 台の構成で走行できないか
並行して確認中。MID-360 1台での走行検証の様子



令和5年度 戦略的技術開発実証事業

茨城県 常陸太田市 国有林内 作業現場

2023.12.5

0_4. 昨年度までの取組み【振り返り】

取組概要：フォワーダの自動運転に必要なセンシング技術の高度化及び森林作業道の高精度3Dマップ化等に係る開発・実証を実施し、集材・運材作業の**省人化、効率化、安全性の確保**を図る。

取組事業者：(株) 諸岡、パナソニックアドバンステクノロジー(株)、森林総合研究所、東京農工大学

令和2年度の開発・実証等の実績 (補助事業)

(林野庁：令和2年度省力化機械開発推進対策)



- ・遠隔操作走行の実現。
- ・センシング技術等を活用した自動走行試験。
(20m程度の自動走行成功。)

令和3年度の開発・実証等の実績 (自主開発)



- ・ベース車の荷台を、クランバンク仕様に改良。
- ・センシング技術等を活用した自動走行試験。
(自動走行とラジコン操作を組合わせた無人集材作業に成功。)

令和4年度実施した開発・実証内容(補助事業)

(林野庁：令和4年度戦略的技術開発・実証事業)

①センシング技術の高度化

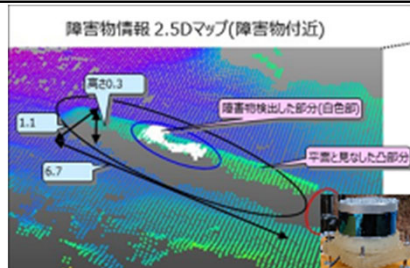


②森林作業道の高精度3Dマップ化



- ・自動走行の精度向上
- ・自動運転の早期実現

参考：3D-LiDARによる 路面形状のデータ化画像



【令和4年度実施した開発・実証等の概要】

- ・自動運転に必要な障害物や周辺情報の収集及び自己位置や機体姿勢の検出を正確に行えるようにするために、これまでに開発を進めてきた自動運転用LiDAR-SLAMの検出精度向上に加え、高精度・高安定GNSSとLiDAR-SLAMによって生成した3Dマップデータに絶対位置情報を付加するシステムの開発・実証を行う。(①)
- ・上記開発システムで収集、検出した情報を、フォワーダ操縦者に通知する機能の開発・実証を行う。(①)
- ・森林作業道の適切な維持・管理に向け、データでの路網管理等を行えるようにするために、上記システムで取得した情報データをもとに高精度な3Dマップを生成する技術の開発・実証を行う。(②)

0_5. 令和4年度の取組み【振返り】

① 自動運転の早期実用化に向けたセンシング技術の高度化

【走行可能シーンの拡大】

LiDAR SLAMによる林内自動運転は成功済み

ただし制約あり：

木々に囲まれた
深い森や山間部に限定



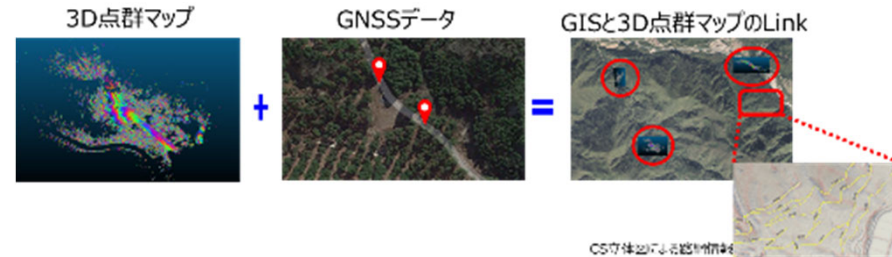
→高精度GNSSの併用で
皆伐後エリアの走行も可能に



⇒国内の各種林業現場を実地調査し、
作業シーン別のGNSS利用可能性を明らかにする

② 森林作業道の高精度3Dマップ化

⇒GNSS + LiDARで高精度な3Dマップを作製し、
GISとの連携で効果的な林道管理を目指す。
本年度はクラウドとの連携を実施する。



【山地災害による環境変化への対応】

あらかじめ教示した経路に沿った走行を実現済み

ただし制約あり：環境変化に対する危険回避（減速・停止）ができない

→走行時の車両周辺環境から崖崩れや障害物を認識する必要がある



⇒作業道安全性判断の実現に取り組む
また予防安全への展開に着手し、早期市場投入を目指す

0_6. 令和4年度の取組み【振返り】

①自動運転の早期実用化に向けたセンシング技術の高度化

【走行可能シーンの拡大】

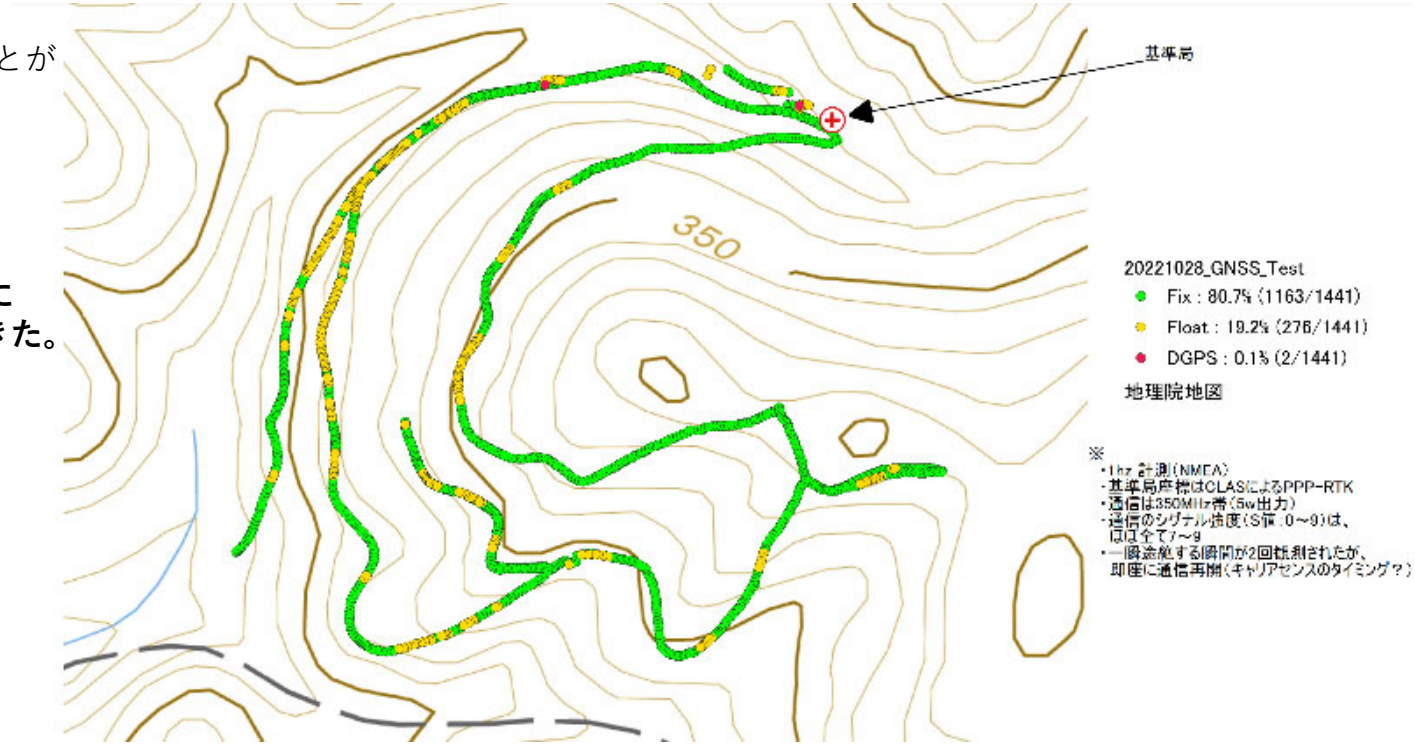
本事業の取り組み内容：

国内の各種林業現場を実地調査し、作業シーン別のGNSS利用可能性を明らかにする

結果：

今回の常陸太田市の現場では、80.7%がFixとなっており、m級の精度でGNSS情報が取得できていることが確認できた。

→Floatになった場所は、谷間や山影などで衛星を捉えずらい箇所であった。これにより皆伐後の山頂付近など、SLAMによる自己位置推定機能が十分に機能しないと考えられる場所の自動走行にGNSSの利用が可能であることが確認できた。



0_7. 令和4年度の取組み【振返り】

①自動運転の早期実用化に向けたセンシング技術の高度化

【山地災害による環境変化への対応】

本事業の取り組み内容：

作業道安全性判断の実現に取り組むまた予防安全への展開に着手し、早期市場投入を目指す

結果：

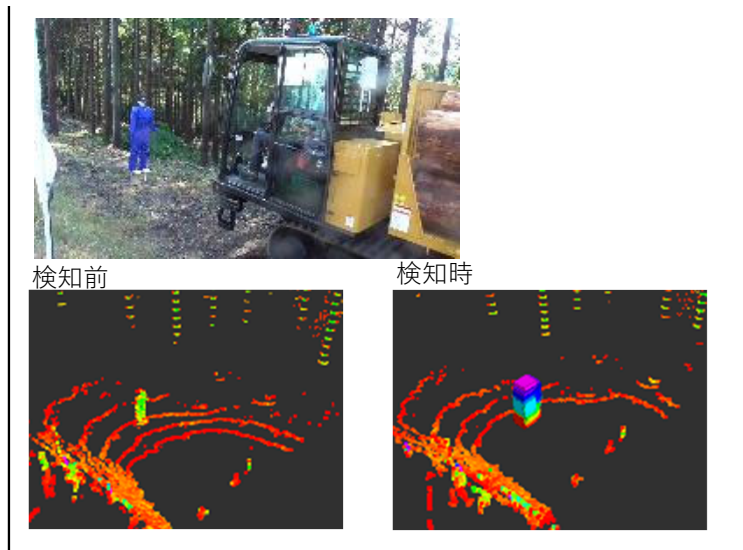
平地において人サイズのものを検知して車両を停止させる機能のDEMOを実施した。

また、作業道安全性判断の実現に向けて、

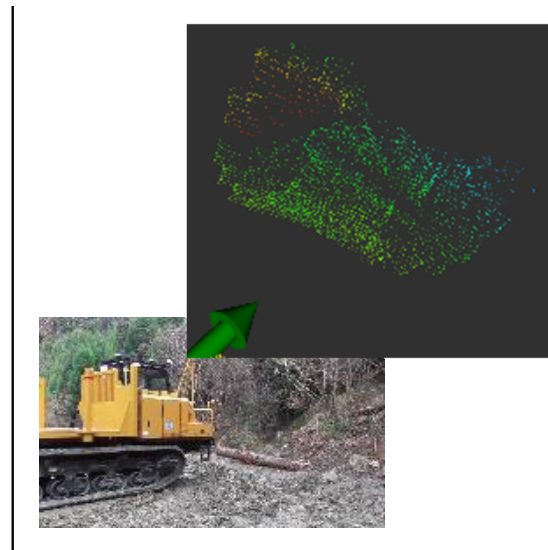
- ・実現場（狭隘路や勾配のある路面）における障害物・道幅の検知アルゴリズムの検討
- ・検知後の走行停止、減速などの車両制御の検討

に着手した。

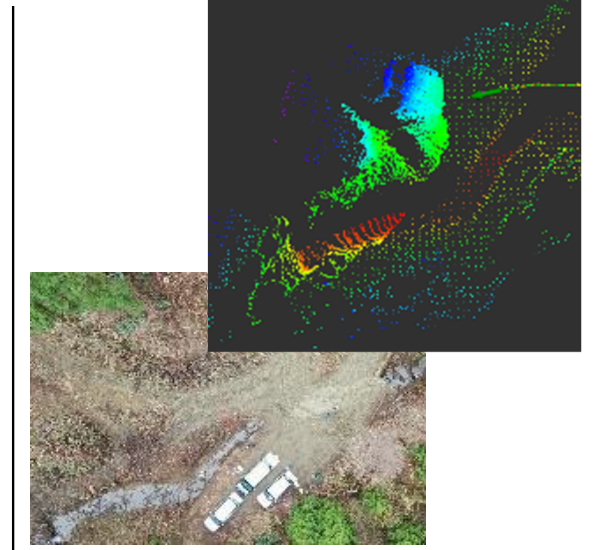
■障害物検知DEMO（林業機械展）



■障害物（倒木など）検知



■道幅検知(土砂崩れ)



0_8. 令和4年度の取組み【振返り】

②森林作業道の高精度3Dマップ化

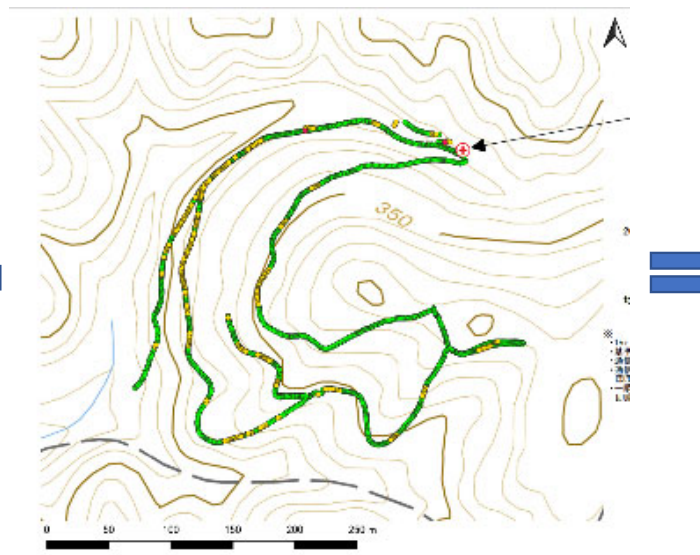
LiDARを用いたSLAMによって作成した地図をRTK-GNSS情報で補正することで、地図全体の積算誤差や方位が修正された。
今回は、RTK-GNSS用いて測定した2点以上の点を元に地図を補正する方法を採用したため、MBによる方位情報は用いていない。

・ 3D点群データ[GNSS補正前]



地図内容詳細：
・ SLAMの積算誤差により同一地点であるStart/Goalが離れている
・ 地図の向き：Start地点の車両の向き = 地図の右。

・ GNSSデータ



・ 3D点群地図[GNSS補正後]

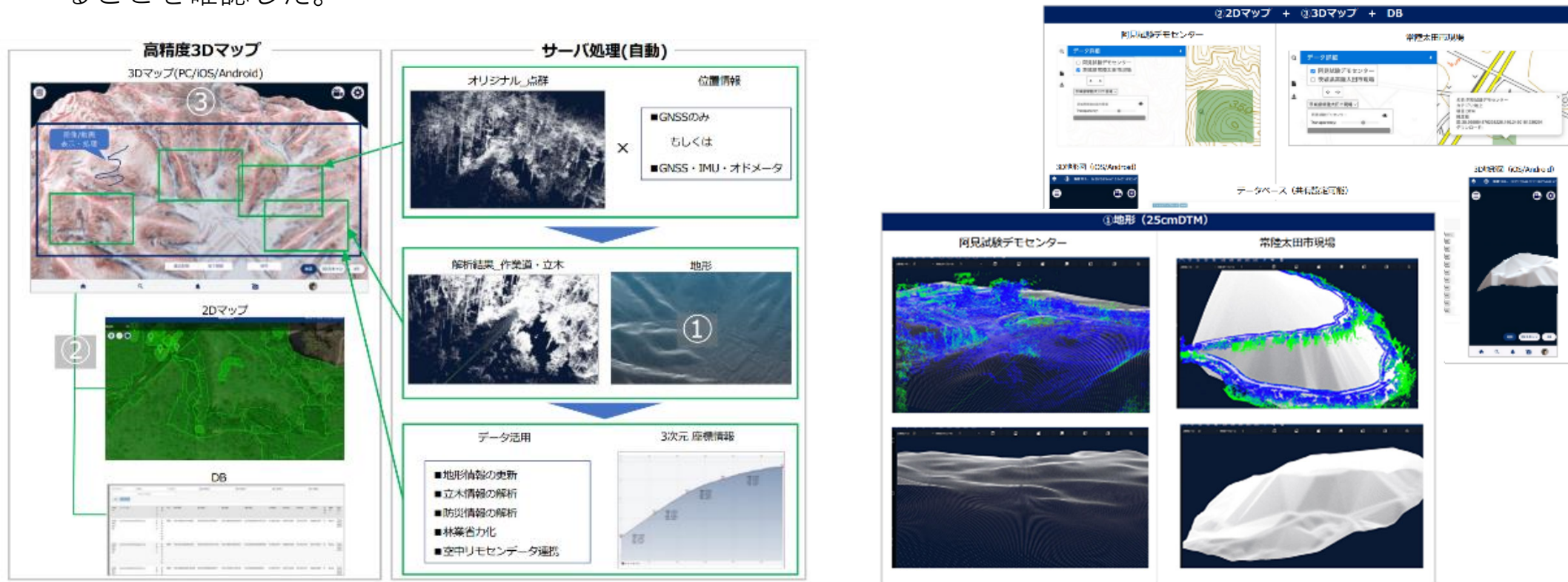


地図補正内容詳細：
・ 積算誤差の補正：同一地点であるStart/Goalが合致
・ 方位の修正：車両の向きに依らず地図の上 = 真北に回転

0_9. 令和4年度の取組み【振り返り】

②森林作業道の高精度3Dマップ化

今回取得したデータをデータベースに蓄積し、多時期のデータを比較することによって森林作業道の法面や路面等構造の状況変化を把握できることを確認した。また、LiDARによる計測範囲が課題と残るものの、周辺の森林環境として立木の評価など高精度3Dマップのデータが森林管理にも活用できることを確認した。



3_11. フォワード走行の安定化

制御概念系統図

