論　文（Original article）

電磁誘導式自動走行フォワーダによる集材作業の無人化に関する研究

毛綱 昌弘[1)*]、山口 浩和[1)]、鈴木 秀典[1)]、山口 智[1)]、宗岡 寛子[1)]、佐々木 達也[1)]、有水 賢吾[1)]、飯澤 宇雄[2)]、大東 史典[2)]、阿部 慶一[3)]、小長井 信宏[4)]、辻 浩志[5)]

要 旨

集材作業の無人化により伐出作業の労働生産性を向上させることを目的として、自動走行フォワーダを試作開発した。試作機は以下に示す 3 つの特徴を有する。①作業道上の走行だけではなく、土場における荷おろし作業も自動化されているが、先山における積込作業は有人作業で行う。②既存の作業道を利用できるように、スイッチバック走行も可能な電磁誘導方式による自動走行機能を有する。③作業員が搭乗して運転するときと同じ速度で自動走行可能とすることで、作業能率を落とさない。開発した試作機を用いて集材作業試験を行った結果、先山における積込作業等の有人で行わなければならない作業時間は、一日の約 3 分の 1 程度となることが分かった。既存作業道の幅員拡幅工事等を必要としない精度で、試作機は作業道上を走行可能であった。しかしながら、一日の集材量を土場に貯めておくには、椪積み作業の行えない荷おろし機構を採用している試作機では広い土場が必要であった。自動走行フォワーダを用いた無人集材作業は出材量が大きく、集材距離が長いほど、労働生産性の向上に貢献できる可能性がある。今後、自動走行に必要な電線の敷設等付帯作業を含めた生産性向上のために、積込作業と造材作業の兼務試験とともに、積込作業の自動化に向けた研究が必要である。

キーワード：フォワーダ、自動走行、自動荷おろし、スイッチバック、電磁誘導式

1．はじめに

高性能林業機械の普及によって伐出作業の生産性は向上してきているが、素材生産量を大きくできない原因の一つとして、フォワーダによる長距離集材があげられている。基幹路網として林道が未整備な地域においては、林道の代わりに森林作業道を開設して、トラックの代わりにフォワーダを用いて集材作業を行っている現場がある。林道とは違い、曲率、幅員、縦断勾配等が厳しい森林作業道を用いた集材作業では、走行速度を大きくすることは、作業の安全性の点からも困難である。先山と土場間の距離である集材距離が長くなると、一サイクル中に占める走行時間が長くなり、一日の往復回数が減ることにより素材生産量とともに労働生産性も低下することになる。

この問題を解決するために、作業班の構成人数を一人減らしても素材生産量を保つことで、労働生産性の向上を図ることを目的として、自動走行フォワーダによる集材作業の無人化を試みたので、その結果について報告する。具体的には、伐木、木寄せ作業を担当する作業員 2 名、造材作業を担当する作業員 1 名、フォワーダで集材作業を担当する作業員 1 名の 4 名から構成される作業班において、フォワーダの運転手 1 名を減らして、3 名で作業班を構成しても素材生産量を低下させることなく作業が可能となれば、労働生産性は 1.33 倍向上することになる。さらに、余剰な作業員によってさらに作業班を再構成することにより、素材生産量を拡大することも可能になると考えられる。

フォワーダによる集材作業は、先山における材の荷台への積込作業、材を積載した状態で先山から土場への実走行、土場における荷おろし作業、空荷で土場から先山まで戻る空走行の繰り返し作業である。本報告の試みでは、フォワーダの運転手を削減することを目的としているので、先山における積込作業のみは有人作業とし、その他の工程である作業道上の走行と荷おろし作業を無人化することとした。これは、先山には伐木、造材作業工程等を担当する作業員が働いているので積込作業を兼務できるのに対し、土場に作業員を配置すると作業班の構成人数を減らすことは不可能となるためである。このため、試作したフォワーダには自動走行機能だけではなく、自動荷おろし機能も装備することとした。また、作業員を削減しても生産量を保つ必要があることから、有人作業と同等の能率で作業を行えるように、自動走行機能に

原稿受付：令和 2 年 4 月 6 日　原稿受理：令和 2 年 12 月 14 日
1) 森林総合研究所 林業工学研究領域
2) 魚谷鉄工株式会社
3) 株式会社舞鶴計器
4) 兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センター
5) 丹波市森林組合
* 森林総合研究所 林業工学研究領域　〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

速度調整機能を組み入れることとした。さらに、既存の作業道を有する現場においても利用可能な技術とするために、自動走行機能はスイッチバック走行にも対応可能となるように、試作機開発を実施した。

筆者らは、今までにフォワーダの自動走行に関する試みを行ってきた。慣性計測装置および車速計等を用いて自己位置推測を行い、既知の走行経路上の位置と比較することで自動走行を行うデッドレコニング方式を試した結果、作業道上という外乱の多い環境下では内界センサだけで走行することは困難であり、外界センサによる補正が必須であることを明らかにするとともに、補正方法として永久磁石を用いる方法を提案している（毛綱ら 2000）。また、全地球測位システム（Global Navigation Satellite System）から得られる位置情報を用いて自動走行を行う試みも行い、皆伐地のような開空度の高い現場では自動走行可能であったが、間伐地のように開空度が低い現場では十分な精度で車両の位置を検出できず、自動走行不可能であった（毛綱ら 2015）。これらの方法では、使用可能な現場が限定的であるとともに、慣性計測装置等の高額なセンサを使用しなければならず実用化にまでは至っていない。このため、自動走行用センサとして誘導方式を用いて試作機の開発を行った。誘導方式ではあらかじめ走行経路上に検出対象物を設置する必要があり、その対象物には永久磁石、光反射テープ、電線等が用いられているが、試作機では電線を用いることとした。これは、光反射テープは粉塵等の多い環境では使用困難であり、永久磁石は作業道の補修時に作業機にくっついてしまうため、検出対象物として不適と判断したからである。電線による誘導方式を用いた屋外自動走行車両には、ゴルフカート、無人防除機等の実用例があるとともに（戸崎ら 1996, 戸崎ら 1997）、検出対象物となる電線、検出器となるピックアップコイルとも安価であることも理由である。

2．試作機の概要および試験方法

2.1 フォワーダ

試作機は魚谷鉄工株式会社製フォワーダ AK-33 を使用して、各種の改造を実施した。本機は多くの国産フォワーダと同様に走行装置はゴムクローラ式の車両であり、変速機は HST（Hydro Static Transmission）で構成されている。最大積載量は 3t で、国産フォワーダとしては小型機に分類される。無人化集材作業を可能とするために、市販機を改造した点は以下の通りである。①エンジン回転数を調整する調速機を電子制御できるように、従来の機械式操作レバーから電動シリンダ式へ変更した。②走行速度等を調整する走行操作レバーを使用しなくても、油圧パイロット式の HST 操作レバーを電子制御できるように、電磁比例式圧力調整弁を追加して、左右の履帯回転数を電子制御できるように改造した。③エンジン回転数を検出できるように、非接触式の回転数検出センサを装備し

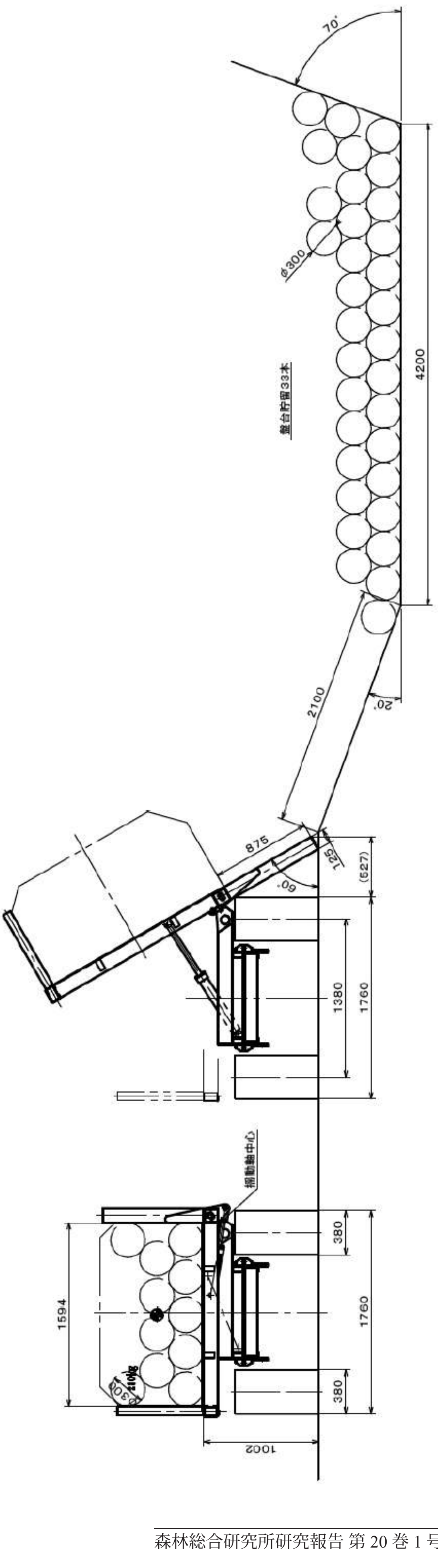

Fig. 1. サイドダンプ式荷台と可動式建て木
Side dump carrier and movable stake

た。④先山ではプロセッサ等による積込作業を想定するとともに、土場では自動荷おろし機構を使用することから、グラップルローダを装備していない。これらの改造を実施した結果、試作機の質量は 4,850kg となり、市販機に比べ 350kg 増加した。

2.2 自動荷おろし機能

試作機では土場における荷おろし作業を自動化するために、Fig.1 に示すように車体右方向に荷台を傾けるサイドダンプ方式を採用している。荷おろし時には建て木を車体外側に倒すことによりスロープとして機能させて、おろした材のばらつきを抑えている。荷台のリフト用シリンダおよび建て木の駆動用シリンダには、それぞれリミットスイッチが装備されており、荷おろし作業時のシリンダ停止位置の検出用として使用している。また、それぞれのシリンダには、絞り弁を装備して伸長速度を調整するとともに、各シリンダの動作タイミングに時間差を設けることが可能な仕様となっている。

荷おろし作業を行う土場では、おろした材がばらつくのを抑えるのに加え、材を貯めておくために荷おろし用の盤台を作設して作業を行う仕様とした。盤台は Photo1 に示すように間伐材を材料とし、土場の傾斜を利用して作設されている。一つの盤台には、試作機の荷台 3 杯分の材を蓄積できるように設計している。これは、盤台に貯められた材は、直接トラックのクレーンによって積込作業を行うことを想定しており、クレーンの可動範囲から盤台の大きさを決める必要があるからである。このため、1 日の集材量を蓄積するには、一つの盤台だけでは容量が足りないことになり、土場に盤台は複数作設する必要があるのに加え、荷おろし作業時には盤台を識別し、選択して荷おろし作業を行う必要がある。盤台の識別を行うとともに、フォワーダの停止位置の指定には、QR コードを用いた立て看板を利用している。この QR コードは後述するスイッチバック折り返し地点の指定等にも使用されている。先山からフォワーダが自動走行を開始する前に、盤台の識別番号を入力することで、土場では指定された盤台に停止して荷おろし作業を行う仕様としている。

2.3 自動走行機能

試作機の自動走行機能は電磁誘導方式を採用している。あらかじめ走行経路に沿って電線を敷設しておき、自動走行時には電線に交流電気を供給することで電線周りに磁界が生じる。フォワーダの車体底面には Fig.2 および Photo2 に示すように、ピックアップコイルと呼ばれる検

Photo1. 荷おろし盤台
Unloading facility

Photo2. 試作機外観
Prototype appearance

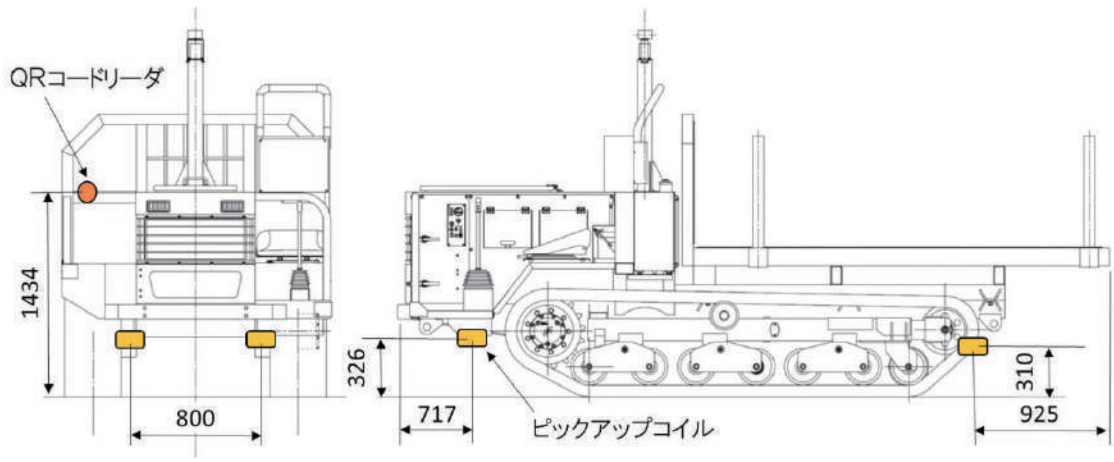

Fig. 2. 試作機のセンサ配置位置
Sensor placement position

出器が左右に装備されており、電線を跨いだ状態で走行することで、電磁誘導作用によって左右のコイルには誘導電流が発生する。この電流の大きさは電線からの距離にほぼ比例するので、左右の誘導電流値を比較することで、電線とフォワーダの相対位置が計測可能となる。この電流値の差を利用して、左右の履帯に速度差を発生させることにより、誘導電線に沿って自動走行が可能となる。

誘導電線の敷設方法は、作業道の中央部に電線を置いていくだけであり、特に固定等は行っていない。しかし、湧水等によって電線が移動してしまう可能性のある個所は、Photo3 に示すようにペグを路面に打ち込んで電線を固定している。使用している電線はゴムキャブタイヤケーブル 2PNCT の単線 3.5sq を使用しており、電線の防護具としてポリエチレン製のカバーを装備した状態で使用している。電線に供給される発信機は電源としてポータブルバッテリーを使用しており、一日の集材作業に用いるには、222Wh の容量で充分であった。発信機からは 1,597Hz の周波数で、約 900mA の電流が誘導電線に流れている。敷設する電線の長さによって電流が変化してしまうため、発信機には可変抵抗を直列に接続することで対応しており、発信機のアンプの能力による制限から、電気を供給可能な電線の最大長さは 2km であるため、集材距離 1km までの作業道に対応可能な仕様となっている。

試作機では、ピックアップコイルを前後両方に装備することにより、前後進とも自動走行可能な構造としている。前進時には車体前方のコイルを使用し、後進時には後方のコイルを使用している。自動走行機能を前後進ともに対応させた理由は、土場で荷おろし作業を終えたフォワーダが先山まで戻る際に、土場において U ターン動作を行うためには、誘導電線を敷設するだけでは対応不可であることと、土場に旋回するスペースを設けなければならないからである。試作機では、先山から土場までは前進で走行し、土場で荷おろし作業を終えた後は方向転回せずに、そのままの向きで土場から先山まで後進走行することで、集材工程の 1 サイクルを終了できる仕様としている。

Photo3. 誘導電線および固定方法
Induction wire and fixing method

2.4 スイッチバック走行

既存の森林作業道に対して、拡幅、線形変更等の工事を実施しなくても、自動走行機能が使用できるように開発することが望まれるが、森林作業道ではスイッチバックを設ける路線も存在することから、自動走行機能をスイッチバック走行にも対応可能となるように開発した。誘導電線をスイッチバック区間に沿って折り返して敷設するだけでは、折り返し地点で磁界が相殺されて相対位置の検出が不可能となるため、誘導電線を二本用いる方法を考案した。この方法では、誘導電線に電流を供給する発信器を二つ用意しなければならなくなるが、二本の誘導電線に異なる周波数の交流電気（1,597Hz と 1,477Hz）を供給し、スイッチバックの折り返し地点で追従する周波数の切り替えと同時に進行方向を変更することで、スイッチバック走行を実現している。折り返し地点の検出には、盤台の識別用にも用いている QR コードを利用した立て看板を用いている。スイッチバック区間を有する作業道への誘導電線の敷設方法を Fig.3 に示す。図中の実線は作業道上の誘導電線を示し、この電線を跨いでフォワーダは自動走行を行う。破線は作業道の脇もしくは林内に取り廻される電線を示している。

2.5 走行速度調整機能

フォワーダが作業道上を自動走行できても、走行速度が遅くなり集材量が減ってしまっては労働生産性を大きくすることはできない。また、森林作業道は、急勾配、急カーブ等のように低速で走行しなければならない区間ばかりではなく、ある程度の速度で走行可能な区間も存在する。電磁誘導方式による自動走行では、車両と電線の相対位置は判別可能であるが、走行経路の線形は判別

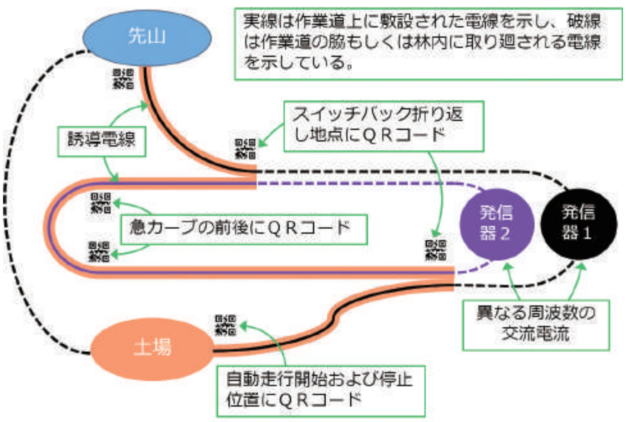

Fig. 3. スイッチバック区間を有する森林作業道への誘導電線敷設方法
Method of laying induction wire on strip road with switchback section

不能であることから、走行速度の設定は困難である。無人搬送車等では急カーブ等の最も走行条件の悪い場所における走行速度を設定速度として、一定速で走行している例が多い。

この問題を解決するために、試作機では有人運転時の走行速度を記憶して、自動走行時にはその速度を再現する方法とした。有人運転による走行を開始してからの経過時間に対する走行速度を記憶しておき、自動走行時には時間再生することで速度設定を行う方法としている。作業道のようなオフロードでは、スリップ等の影響により履帯の回転数が一定でも走行速度は一定にならず、速度制御の誤差がなくても同じ経過時間に同じ場所を走行しているとは限らないため、低速で走行しなければならない箇所を高速で走行してしまう危険性がある。この誤差を修正するためにも、QR コードによる立て看板を用いて修正している。あらかじめ作業道の脇に Photo4 に示すように立て看板を設置しておき、作業員が搭乗して運転した際に、その QR コード脇を通過した時間も記憶しておくことで、自動走行時には時間補正を行う方法とした。立て看板をたくさん設置するほど、設定速度の誤差は小さくなるが、設置の手間がかかる方法となっている。フォワーダには Fig.2 に示すように、QR コードリーダ（キーエンス　SR-200W）が車体側面に装備されており、センサは自己発光式のため、林内のような暗い場所においても識別可能な仕様となっている。

作業員による有人運転は、朝始業時に行うことを想定している。これは、森林作業道への落石、倒木、あるいは路肩の崩壊のチェックを兼ねて有人走行することで、自動走行を安全に利用可能であると考えたからである。また、作業する日によって天候、路面状況等が異なることから、降雨等の影響によって走行速度を小さくして作業を行わなければならない場合にも対応可能な方法でもある。このため、一日に先山と土場を十往復できれば、試作フォワーダを用いて 30m^3 の集材が可能となるが、10 回のうちの 1 回は有人運転、9 回は無人運転で作業を行うこととなり、作業班を構成する作業員の一人は、朝始業時の有人運転も行わなければならないことになる。

Photo4. QR コードと立て看板
QR code and vertical sign

3．結果および考察

3.1 自動荷おろし試験結果

土場に作設しなければならない盤台の大きさを求めるために、サイドダンプ機能によって荷おろしされた材が、どの程度ばらつくのか、盤台を架設して荷おろし作業試験を行った。試験を行う前に、荷台のリフト用シリンダと建て木用シリンダの速度および動作タイミングの調整を実施した。荷おろし試験は自動走行終了時の停止位置精度の計測とともに行った。フォワーダの停止位置に関しては、トータルステーションを用いて停止位置および停止時の車体の向きを計測した。その後、サイドダンプ機能によって荷おろし作業を行い、おろされた材の両端の距離を用いてばらつき程度の計測を行った。荷台からおろす材は変更せずに、試験は繰り返し 10 回行った。試験に使用した材は 24 本、材長 4.2m、末口径 16 ～ 23cm、元口径 20 ～ 27cm、材積 2.92m^3 であった。

フォワーダは進行方向に対して± 10cm 以内、横方向は± 2.5cm 以内の精度で停止可能であった。また、停止時の車体の向きは± 0.5 度以内で収まっていた。停止時の車体の向き θ とおろした材のばらつき ℓ の関係を Fig.4 に示す。停止時の車体の向きは、ばらつきの大きさにほぼ無関係であり、材長の 1.3 倍程度までばらつくことが確認できた。荷台からダンプ機能によっておろされる材は一本一本荷台から落ちるわけではなく、荷台がある程度以上にまで傾くと全ての材が一度に滑落して落ちはじめ、落ちた後に材同士がぶつかり合い、材の表面で滑って横方向にすべることが確認できた。材のばらつきは、材表面の湿り具合、皮むけの状態、荷台に積載されているときの材の木口のそろえ方、元口と末口の割合等、様々な要因によって影響されると考えられたが、荷おろし用盤台の横幅は材長の 1.3 倍以上、可能であれば 1.5 倍程度確保する必要があることが確認できた。

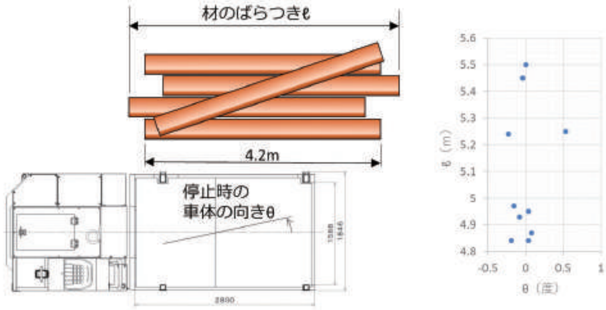

Fig. 4. 車体の向きと材のばらつきの関係
Relationship between body orientation and logs dispersion

3.2 自動走行試験結果

自動走行フォワーダは既存の作業道に対して幅員の拡幅工事等を必要とせずに使用可能となるのか検証するために、作業道上を自動走行するフォワーダの走行軌跡を計測して評価を行った。走行試験時には、追尾式トータルステーションによって座標計測を行い、慣性計測装置で車体姿勢を補正して、走行軌跡を取得した。試験条件としては荷台への積載の有無、前後進、縦断勾配、直線部と曲線部等の走行条件を変更して実施した。結果の一例をFig.5に示す。試験は同じ経路を10回繰り返し走行している。0m地点から100m地点への移動時には、約5度の下り勾配となっており、荷台に材を積載して前進で走行している。100m付近から0m付近への移動時は、上り勾配となり、空荷台で後進走行している結果となる。図には、フォワーダの走行軌跡から作業道幅員方向の走行位置を算出し、最も作業道の右端を走行した際と左端を走行した際の差を最大値として示している。誘導電線は作業道に固定されていないため、自動走行試験を繰り返すことにより電線が左右方向に移動してしまうことが確認できたため、電線の位置ではなく、左端と右端の中間値と計測値の差を誤差として、絶対値の平均値を求めている。走行試験の結果、幅員方向の誤差は平均10cm以内で走行可能であった。しかしながら、最大誤差は曲線部において60cm程度の誤差が発生することも確認できた。他の路線も用いて走行試験を繰り返した結果、自動走行時の幅員方向の制御誤差は直線部よりも曲線部において、前進よりも後進、無積載時よりも積載時のほうが大きくなり、有人運転で操作が難しい場合には制御誤差も大きくなるという傾向であった。前進時と後進時の誤差に関しては、ピックアップコイルと車体の旋回中心までの距離の差が後進時には短くなるため、誤差が大きくなったと考えられた。最も誤差が大きくなる条件は積載時の下り勾配のときであり、有人運転時において最も運転操作が難しい条件時と同様の結果であった。これらの結果より、作業道を作設する際には曲線部等の走行条件が厳しい箇所では、幅員が拡幅されている（林野庁 2010）ことを考慮すると、試作機は既存の作業道に十分に対応可能な精度で走行可能であると考えられた。

延長距離約600mの作業道に、QRコードを用いた立て看板を6か所配置し、各補正点における通過時間の差を計測した結果をFig.6に示す。試験は前進および後進走行ともに材を積載した状態で3回ずつ実施し、通過時間が遅れた場合を正として表記している。試験区間では中間点あたりが最も標高が高くなっているため、フォワー

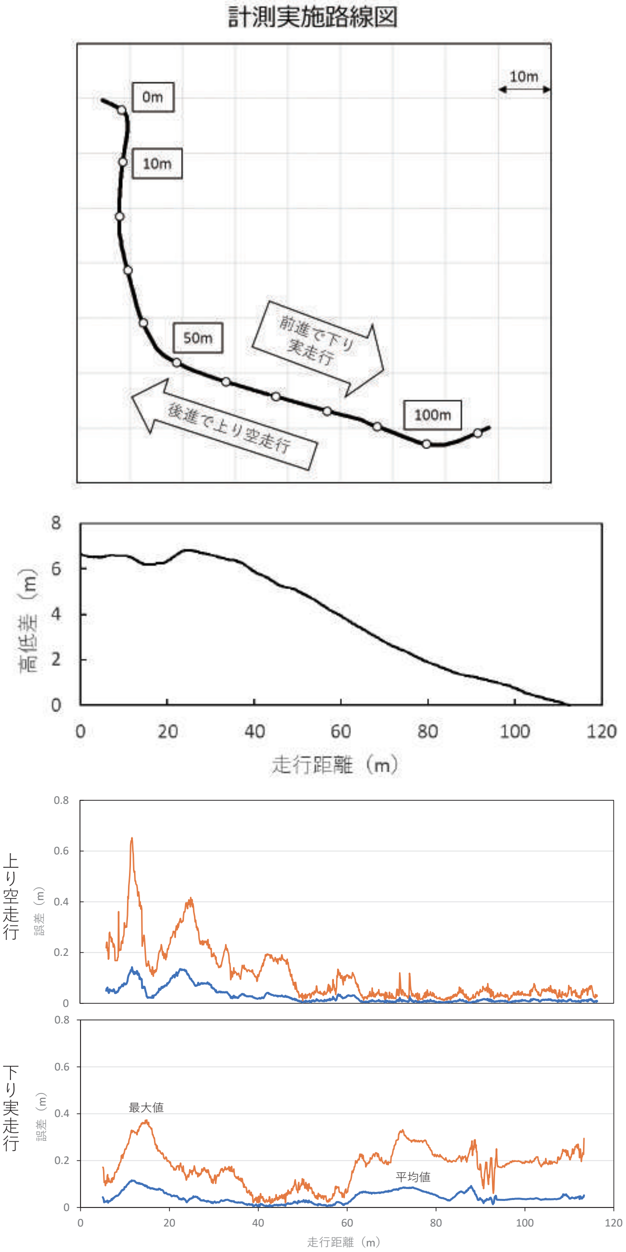

Fig. 5. 自動走行時の幅員方向の制御誤差
Control error in width direction during automated traveling

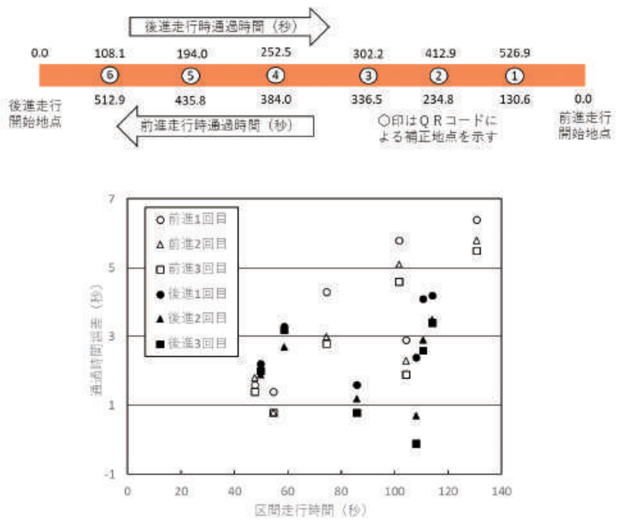

Fig. 6. 自動走行時の進行方向誤差計測結果
Measurement result of traveling direction error during automated traveling

ダは走行を開始してからしばらく上って、その後は下るという試験区間設定となっている。区間走行時間が長くなるほど、誤差である時間差は大きくなる傾向はあるが、走行時間と誤差は比例関係でなく、最大で 6% 程度の誤差が生じていることが確認できる。この結果から、QR コードを用いた時間補正は一定の間隔おきに設置するという方法ではなく、急カーブや横断排水溝のように低速で走行しなければならない箇所を通過する前に確実に実施できるように、立て看板の設置箇所を選択する方法が望ましいと考えられた。

3.3 実証試験結果

兵庫県丹波市山南町五ヶ野の作業地において、試作機を用いた集材作業の実証試験を実施した。Fig.7 に示すように、現場は 2.2ha の伐区と土場を約 661m の作業道で接続している間伐施業地であり、伐区内には数百 m の作業道が突っ込み型で数本作設されている。土場には、荷おろし用の盤台を 4 基製作したため、約 25m の細長い土場を用意する必要があった。実証試験では、安全性を考慮して伐木造材作業は先行して実施し、伐区内の作業道の脇に集材木数本の椪が散在している状況から実施した。作業員は森林組合の作業員 1 名であり、先山において油圧ショベルをベースとするグラップルを用いてフォワーダへの積込作業を行い、積込作業終了後には、自動走行開始地点までフォワーダを有人運転で移動し、フォワーダが自動走行している時間は作業を行わないという方法で作業時間の分析を行った。土場まで自動走行して、荷おろし作業を終えたフォワーダは、ほぼ一定の時間で自動走行開始地点まで戻ってくる。作業員は、自動走行開始地点で自動停止したフォワーダを有人運転で積込作業ポイントまで移動させて積込作業を始めるとともに、荷台が満載になるまでグラップルおよびフォワーダの二台の車両を運転して、移動と積込作業を繰り返している。

試験に先立ち、無人集材作業に必要となる付帯工事の作業時間を計測した。有人作業では必要のない工事として、誘導電線の敷設工事、荷おろし盤台の作設工事が必要になるとともに、作業終了時にはその撤去作業が必要となる。実証試験地において、それぞれの作業を二人で行った結果、QR コードを用いた立て看板の設置工事も含め、誘導電線を敷設するのに要した時間は 22,155 秒であり、撤去工事には 9,017 秒の時間を要した。また、試験地では 4 基の荷おろし盤台を製作したが、作設時間に 19,555 秒を要し、撤去作業は 2 時間以内で終了した。誘導電線の敷設距離と作業時間は比例すると仮定すると、この結果から、作業道 1km に電線を敷設するには 3 人日、撤去するには 1.3 人日を要し、荷おろし盤台の作設には 1.8 人日、撤去には 0.7 人日を要するので、無人集材作業を行うために必要となる付帯工事人工数は 7 人日であった。

実証試験は 2 週間に分けて行い、伐区内の材を全て集材するためにフォワーダが往復した回数は 46 回となり、総材積 122.3m^3 の集材作業に要した総作業時間は 103,083 秒であった。平均集材量は 2.7m^3、1 サイクルに要した時間は 2,241 秒であり、各要素作業の平均割合は Fig.8 の通りであった。サイドダンプ機能によって荷おろしされた材のばらつき頻度を計測した結果を Fig.9 に示す。Fig.4 の試験時と現場が異なるため、荷おろし盤台の細かな形状は異なっているが、おろした材の材長 4m に対して、材のばらつきは約 1.4 倍以内に収まっていることが確認できる。しかしながら、材長の 1.5 倍以上の 6m を超えるばらつきを示す場合もあり、土場に余裕がある場合は盤台を極力離して作設すべきであると考えられた。先山では、一人の作業員がフォワーダとグラップルの二台の車両を運転して積込作業を行っており、その作業に要した時間の頻度分布を Fig.10 に示す。積込作業に要した時間の平均値は 538 秒であったが、作業が進むに従い積込作業ポイントまでの移動距離が長くなり時間を要した結果となっている。

実証試験時の各要素作業の時間分析結果を用いて、集材距離が 1km の場合の作業時間を推定した結果を Table1

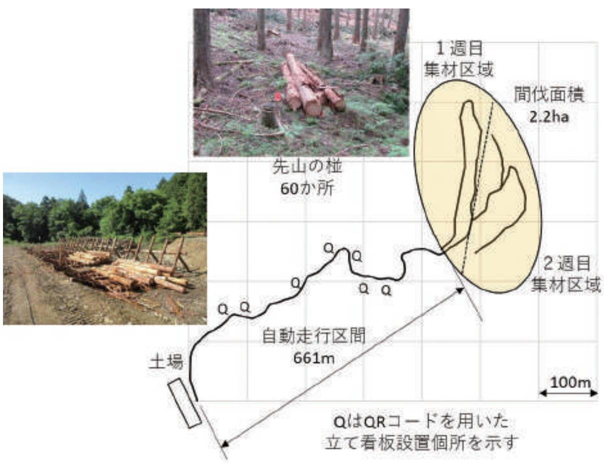

Fig. 7. 実証試験地概況図
Overview of demonstration test site

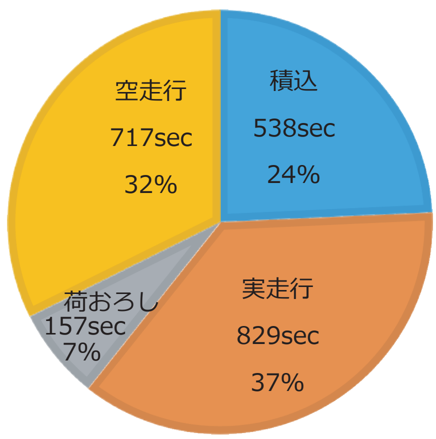

Fig.8. 各要素作業の平均所要割合
Average required percentage of each elementary operation

に示す。表には積載量が 3t の小型フォワーダを用いて 10 サイクル往復して 30m^3 の集材を行う場合と、5t の大型フォワーダで 6 サイクル集材する場合を試算した。ただし、走行時間は集材距離に、積込時間は積載量に比例すると仮定して計算している。小型フォワーダの場合、作業に要する時間は 30,937 秒と試算され、有人作業による積込作業時間は一日の約 20% の時間を費やすとともに、1 日の作業時間を大きく超える結果となった。大型では作業時間は 20,952 秒に短縮され、1 日で 30m^3 の集材作業が可能となるが、有人作業の積込作業時間が約 30% まで

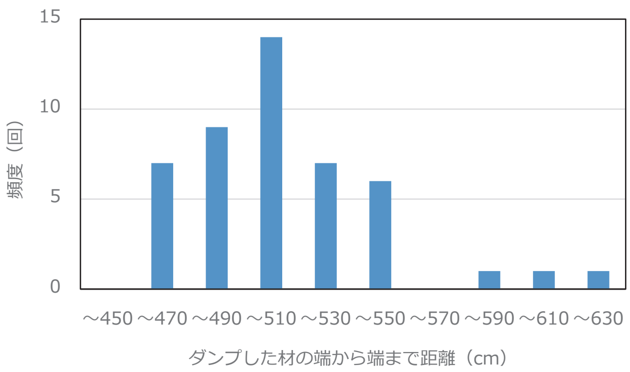

Fig.9. 実証試験地における材のばらつきの度数分布
Frequency distribution of log dispersion at the demonstration test site

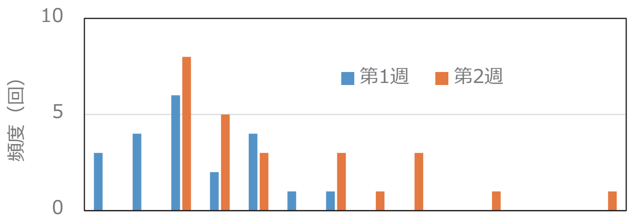

Fig. 10. 実証試験地における積込作業時間の度数分布
Frequency distribution of loading time at the demonstration test site

Table 1. 作業能率の予測結果
Work efficiency prediction results

	平均作業時間 10 サイクル 集材距離 661m 積込材積 2.7m^3	推定作業時間 10 サイクル 集材距離 1km 積込材積 3m^3	推定作業時間 6 サイクル 集材距離 1km 積込材積 5m^3
積込	5,378	5,976	5,976
実走行	8,291	12,543	7,526
荷おろし	1,569	1,569	941
空走行	7,171	10,849	6,509
合計	22,409	30,937	20,952

（単位　秒）

大きくなった。Table1 の結果を用いて、集材距離が集材材積及びフォワーダへの積込作業時間の占める割合を試算した結果を Fig11 に示す。集材距離が短くなれば集材材積は上がるが、積み込み作業時間の占める割合が長くなり、造材作業と兼務することは不可能となる可能性がある。集材距離が長くなると集材材積は低くなるが、作業時間割合が小さくなるため、造材作業との兼務の可能性が高くなると考えられる。今回の実証試験では、造材作業と兼務しながらの試験までは実施できなかったが、プロセッサ等の造材機械は 10m^3/h 程度の作業能率があり待ち時間が発生しやすいことからも、集材距離が長くなれば兼務の可能性は十分にあると考えられる。

実証試験地の条件では、積込作業に要した時間は 1 サイクルの 24% となっていることからも、先山の作業員の一人は 1 日の作業時間を 6 時間とすると 1 時間半は自動走行フォワーダへの積込作業に携わらなければならない。さらに、最初の一回目は有人運転によって走行速度を入力しなければならないことから、1 サイクルに要する約 37 分間もフォワーダの運転時間に追加される。これらの時間を合計すると、作業員一名の一日の作業時間のうち、約 3 分の 1 は自動走行フォワーダの運転に携わらなければならない結果となった。造材作業等との兼務として、フォワーダへの積込作業がどの程度の時間まで可能であるか、検証の必要があると考えられる。また、先山における積込作業が自動化できれば、このような問題も生じないことから、積込作業の自動化に向けた研究も必要であると考えられる。

4．おわりに

試作開発したフォワーダは、GNSS を利用した自動走行フォワーダの試作機（毛綱ら 2016）に比べ、電磁誘導方式は立木等の影響を受けないことから利用可能な環境が広がるとともに、自動走行時の制御誤差も小さくなっていることから、より実用化に近い開発が行えたと考え

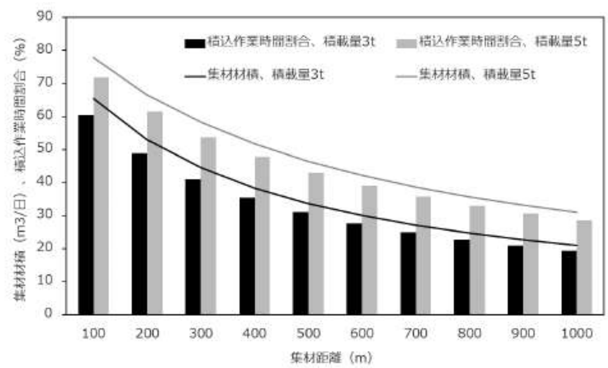

Fig. 11. 集材距離がフォワーダへの積込作業時間割合に与える影響
Effect of logging distance on loading time ratio to forwarder

ている。しかしながら、自動走行時の制御精度が良くなるほど、森林作業道の同じ個所を何回も繰り返し走行するため、曲線部や急勾配な箇所では路面にわだちができてしまうことが確認できた。有人運転時であれば、走行する個所を意図的に変更することでわだちの生成を避けながら作業を行うのに対し、自動走行フォワーダによる作業では誘導電線の位置を変更する以外にわだちを防ぐ手段がない。今回の実証試験では作業道のメンテナンスの手間等を考慮できていないことから、今後検証の必要があると考えられる。

また、誘導制御方式による自動走行の欠点として、電線の破断事故が考えられる。実証試験地の土場等では、誘導電線がトラックや油圧ショベルによって踏みつけられて断線するような事故は起きなかった。しかし、作業道上において、急カーブのような個所では路面にわだちが形成されるとともに、わだちの土がカーブ外側に押し出されるため、電線もカーブ外側に移動してしまい、破断する事故がみられた。電線が破断すると、電気が流れなくなるので自動走行フォワーダは安全に停止できるように設計されているが、電線の破断箇所を特定することはできない。このため、この電線破断時の対応方法に関しても検討を行う必要がある。

さらに、今回の実証試験ではプロセッサ等の造材機械による作業と兼務しながら、フォワーダへの積込作業を行うまでの試験を実施することはできなかった。集材距離によって積込作業に要する作業時間割合が変化し、集材距離が短すぎると造材作業との兼務が不可能となり、作業員を削減することは不可能となることからも、素材生産量を減らすことなく作業員を削減できる集材距離を求めるために、兼務作業の試験を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究では、実証試験を行うにあたり、丹波市森林組合の協力をいただいた。ここに深謝する。なお、本研究は「革新的技術開発･緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）」の補助を受けて実施した成果である。

引用文献

毛綱　昌弘・山口　浩和（2000）永久磁石とジャイロの組み合わせによる自律走行運材車の 開発．森林利用学会誌，15，197–204.

毛綱　昌弘・山口　浩和・伊藤　崇之・鈴木　秀典・千坂　修・高崎　綾信・草野　兼光・北原　成郎（2016）遠隔操作機能と自動走行機能によるフォワーダの操作支援技術の開発．森林総合研究所研究報告，15，91–102.

林野庁（2010）森林作業道作設指針の制定について．林野庁長官通知 656 号.

戸崎　紘一・宮原　佳彦・市川　友彦・水倉　泰治（1996）誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発－無人走行システム－．農業機械学会誌，58，101–110.

戸崎　紘一・宮原　佳彦・市川　友彦・水倉　泰治（1997）誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発－無人散布システム－．農業機械学会誌，59，87–96.

Research on unmanned logging operation by automated traveling forwarder using electromagnetic induction

Masahiro MOZUNA[1)*], Hirokazu YAMAGUCHI[1)], Hidenori SUZUKI[1)], Satoshi YAMAGUCHI[1)], Hiroko MUNEOKA[1)], Tatsuya SASAKI[1)], Kengo USUI[1)], Takao IIZAWA[2)], Fuminori OHIGASHI[2)], Keiichi ABE[3)], Nobuhiro KONAGAI[4)] and Hiroshi TSUJI[5)]

Abstract

To improve labor productivity, we developed an unmanned work system for the logging process in the form of an automated traveling forwarder. As the vehicle does not require a driver for a large part of operating time without reduction in the amount of production, thus resulting in increased labor productivity. The prototype has three features: 1) Traveling on a strip road and the unloading process are automated, whereas the loading of logs from a felling site is performed by workers. 2) The vehicle has an automated traveling function that uses an electromagnetic induction system, which allows switchback driving so that existing strip roads can be used. 3) By making it possible to automatically travel at the same speed as when an operator is driving, working efficiency is not reduced. The result of conducting a logging operation test using the prototype confirmed that the time required for manned work processes such as loading from felling sites was about one-third of the day. In addition, the prototype vehicle was able to travel accurately without the need to widen the existing strip road. However, it was also confirmed that a prototype equipped with an unloading mechanism will require a larger yard to store the logs because it cannot make piles. The present study showed that the unmanned logging using an automatic traveling forwarder have possibility to improve labor productivity. Further researches on automatic loading systems and ancillary work such as laying electric wires for unmanned operation are necessary.

Key words : forwarder, automated traveling, automated unloading, switchback, electromagnetic induction

Received 6 April 2020, Accepted 14 December 2020
1) Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
2) Uotani Co., Ltd.
3) Maizurukeiki Co., Ltd.
4) Forestry Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries
5) Tamba City Forestry Association
* Department of Forest Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, JAPAN; E-mail: mozuna@ffpri.affrc.go.jp