

森林総合研究所

交付金プロジェクト研究 成果集 10

林業機械のテレコントロール システムの開発

独立行政法人 森林総合研究所

2006. 9

序 文

平成 3 年に「高性能林業機械促進基本方針」が策定され、本格的な高性能林業機械の開発とその導入による作業システムの普及が始まった。しかし、これまでの導入は土場造材作業用機械が中心であり、伐出作業用の高性能林業機械の普及は遅れている状況にある。また、平成 12 年には「高性能林業機械促進基本方針」が改定され、我が国林業の一層の高性能林業機械化の促進、すなわち伐倒や育林を含めた一貫した高性能林業機械の普及や開発、非皆伐作業の森林作業システムの構築が強く求められている。

我が国の急峻な地形条件の中で環境負荷に配慮しながら非皆伐施業を実行するには、作業のための情報支援や自動制御による機械操作の高度化が必要である。また、森林作業システムは、各工程の機械が林内に分散する形で展開されており、これらの機械を安全で効率的に連動させるため、究極的には無人化を視野に入れた技術革新が必要である。こうした問題に対応する方法として、林業機械をテレコントロール（無線遠隔操作）する方式が考えられる。この方式によれば、複数台の機械を 1 人のオペレータが操作することができ、より安全で効率的な機械間の連携が可能となるばかりでなく、森林情報、作業情報、機械情報をリアルタイムで統合処理することによって、多様な作業条件に対して柔軟に対応できる機械作業システムを構築できる。

本研究「林業機械のテレコントロールシステムの開発」は、交付金プロジェクトとして平成 13 年度から平成 17 年度までの 5 か年にわたり、森林総合研究所が実施したものである。本研究は、林業機械を一括して遠隔操作、管理可能にするテレコントロールシステムを開発するため、無線による機械操作とオペレータへのフィードバックを可能にするビジュアルコントロール装置の開発、遠隔操作では実現困難な操作・作業技術の自動制御化、および、環境に配慮したきめ細かな作業を実行するためのリアルタイム作業支援システムの開発を目標に実施したものである。

この研究成果は、今後の我が国における林業機械化に関わる試験研究、技術開発および行政を推進する上で貴重な技術的知見を与えるものと考え、ここに本書を刊行し、広く関係者の参考に供する次第である。

平成 18 年 9 月

独立行政法人 森林総合研究所
理事長 大熊 幹章

研究課題：林業機械のテレコントロールシステムの開発

目 次

研究の要約	1
第1章 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発	8
1. 作業対象物形状計測装置の開発	8
2. 車両周辺立木情報の把握手法	14
3. 林業車両のための森林内ナビゲーションシステムの開発	19
第2章 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発	27
1. 遠隔制御実験用グラップルローダの製作	27
2. 実験機による遠隔操作の作業模擬実験	32
第3章 リアルタイム作業支援システムの開発	36
1. 林分情報と地形情報の収集とマッピングシステムの開発	36
2. 林分情報を用いた作業計画立案方法	42
3. リアルタイム作業支援プログラムの開発	48

研 究 の 要 約

I 研究年次および予算区分

研究年次：平成 13 年～平成 17 年（5 か年）

予算区分：運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主 査：林業機械研究領域長 井上源基（平成 13 年 4 月～平成 17 年 3 月）

伐出機械研究室長 陣川雅樹（平成 17 年 4 月～平成 18 年 3 月）

副主査：伐出機械研究室長 陣川雅樹（平成 13 年 4 月～平成 17 年 3 月）

伐出機械研究室 毛綱昌弘（平成 17 年 4 月～平成 18 年 3 月）

取りまとめ責任者：

第 1 章：伐出機械研究室 山口浩和

第 2 章：伐出機械研究室 毛綱昌弘

第 3 章：伐出機械研究室 田中良明

III 研究担当機関

森林総合研究所 林業機械研究領域 伐出機械研究室

IV 研究目的

我が国の急峻な地形条件の中で環境負荷に配慮しながら非皆伐施業を実行するには、作業のための情報支援や自動制御による機械操作の高度化が必要である。また、森林作業システムは、各工程の機械が林内に分散する形で展開されており、これらの機械を安全で効率的に連動させるためには、無人化への可能性を視野に入れた技術革新が必要である。こうした問題に対応する方法として、林業機械をテレコントロールする方式が考えられる。

そこで、林業機械の無線遠隔操作を実現するために作業情報等を画像によってオペレータへ伝達するコントロール装置の開発、遠隔操作では実現困難な操作・作業技術の自動制御化、および、効率的な作業を実行するための作業支援システムの開発を行い、これらを統合したテレコントロールシステムの開発を目的とする。

本システムの開発は、「高性能林業機械促進基本方針（平成 12 年改正）」の中の補完システム（コスト低減および環境負荷低減への配慮を基本とした機械作業システムの開発推進）を具現化するものであり、高性能林業機械化推進のための先端技術として位置付けられるものである。

V 研究方法

第 1 章 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発

1. 作業対象物形状計測装置の開発

テレコントロールシステムにより機械操作を行うオペレータは、モニタ画面に映る 2 次元情報を頼りに作業を行うこととなり、距離感や立体感などの情報は欠落する。そこで、これら欠落す

る情報を補うため、作業対象物の 3 次元位置や大きさ・形状等を、1 台のカメラとレーザーポインタを用いたステレオマッチング法により算出する手法を検討する。

2. 車両周辺立木情報の把握手法

遠隔操作するオペレータが、効率的な機械操作を行い、立木等に接触しない走行ルートを選択するためには、あらかじめ機械周辺の立木位置や大きさ等の情報を把握しておく必要がある。そこで、平面的にレーザーを照射することができるレーザーパターンプロジェクターを利用し、対象物の位置、大きさ、形状を計測する手法を検討する。

3. 林業車両のための森林内ナビゲーションシステムの開発

カメラ画像から得られる情報は局所的な情報であり、森林作業を効率的に進めるためには、林道からの距離や位置、走行経路など大局的な情報が必要である。そこで、慣性計測装置とレーザー距離計を用いたナビゲーションシステムについて検討する。

第 2 章 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発

1. 遠隔制御実験用グラップルローダの製作

複雑な操作を可能とする遠隔操作システムを開発するためには、オペレータから機械への動作指示だけでなく、機械からの情報をオペレータへ伝達する双方向通信が必要である。そこで、無線 LAN を用いた制御および通信装置を搭載した遠隔操作作業実験用のグラップルローダを試作する。

2. 実験機による遠隔操作の作業模擬実験

実験機にビジュアルコントロール装置を搭載するとともに、機械に装備した各種センサ情報、カメラ映像等を用いて遠隔制御による森林作業を支援する制御装置を開発する。開発した実験機を用いて模擬実験を行い、制御装置の有用性を確認する。

第 3 章 リアルタイム作業支援システムの開発

1. 林分情報と地形情報の収集とマッピングシステムの開発

テレコントロール作業においてオペレータはカメラ画像やセンサから得られる情報を頼りに作業を行うが、対象となる森林の地形情報や林分情報があらかじめ得られていれば、より適切な機械操作・作業を行うことができる。そこで、針葉樹人工林の立木位置と幹直径を簡易に取得する手法を開発するため、デジタル画像による立木位置の測定を行い、測定方法、精度といった基本的な問題を検討するとともに、これをテレコントロールシステムへ取り込むため、取得した情報を 3 次元グラフィックスとして表示するマッピングシステムを開発する。

2. 林分情報を用いた作業計画立案方法

テレコントロール作業における作業計画立案の例として、間伐木選木の問題を取りあげた。デジタル画像から得られた立木位置情報を利用し、間伐後の立木分布の変化を定量的に把握するため、いくつかの選木法をアルゴリズムとして表現し、プログラムとして実装することによって各選木法を立木の平面分布の観点から評価した。

3. リアルタイム作業支援プログラムの開発

森林の地形情報や林分情報が与えられていれば、伐採搬出の実行にともなってリアルタイムでオペレータに作業の指示を与えられることが可能である。そこで、作業支援の一例として障害物

の回避をとりあげ、立木位置の情報と移動体の位置情報に基づいてリアルタイムでオペレータに対して障害物への接近を知らせる方法を検討するとともに、マッピングシステム、選木のアルゴリズム、障害物回避の作業支援を実装した作業支援プログラムを作成する。

VI 研究結果

課 題	H13	H14	H15	H16	H17
(1) 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発	←	→			
(2) 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発		←	→		→
(3) リアルタイム作業支援システムの開発		←	→		→

第1章 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発

1. 作業対象物形状計測装置の開発

林業機械の遠隔操作を支援するために、作業対象物の位置および形状を計測する装置の開発を行った。装置はCCDカメラとレーザーポインタを組み合わせ、オペレータの作業画面上の作業対象物にレーザー輝点を与えることにより、CCDカメラとレーザーポインタの距離を基線とした三角測量により3次元位置座標を算出する手法である。また、計測装置の試作を行い、屋外でのレーザー輝点の検出可能な光条件の把握、および作業対象物を計測した際の3次元座標位置計測精度について明らかにした。その結果、林縁部など作業対象物に直達光が届く場所では計測が困難であったが、直接光の届かない林内においては計測が行えた。また、計測精度については、10m離れた地点にある作業対象物の計測において、計測誤差10cm以下であった。

2. 車両周辺立木情報の把握手法

森林内において林業機械を遠隔操作する場合、オペレータは車両を確認することができない。遠隔操作による車両の走行や森林作業を安全で効率的に行なうためには、車両周囲の情報、特に立木位置や立木径等を瞬時に確認する必要がある。そこで、レーザー平面を照射するレーザーパターンプロジェクターとCCDカメラを組み合わせた森林内立木位置計測装置を開発し、その計測精度を明らかにした。森林内で立木の計測試験を行なった結果、およそ10m離れた位置にある立木については、3cm程度の誤差で位置計測が行えた。また、立木径については2cm程度の誤差であった。この誤差は、林業機械を操作する上では十分な精度であり、本装置の有効性が確認された。

3. 林業車両のための森林内ナビゲーションシステムの開発

森林作業を効率的に進めるために、森林内における現在位置や作業対象の位置等を把握できる森林内ナビゲーションシステムを開発した。森林内においては、一般的に用いられているGPSを利用した測位システムが常時利用できるとは限らない。そこで森林内における車両位置を特定するために、既知座標点を車両に搭載したレーザー距離計により視準して自己位置を計測する手法と、慣性計測装置と車両の走行速度から自己位置を推定する手

法の2通りの手法を検討した。前者の手法では、実際の距離に対して5%程度の誤差で位置計測が行えた。後者の手法では、地形の起伏や路面条件等によりその精度が大きく影響を受ける結果となったが、走行条件の良いところでは、3%程度の誤差で車両位置の推定が行えた。

第2章 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発

1. 遠隔制御実験用グラップルローダの製作

遠隔制御実験用としてグラップルローダの改造を実施し、搭乗時の操作方法と同様な操作方法で遠隔にて操作可能な制御システムの開発を行った。遠隔操作用の通信装置には無線 LAN を使用したため、データの転送距離は制限されるが、制御実験用の通信装置として、無線 LAN が十分活用可能であることが確認できた。また、試作実験機には双方向通信によるフィードバック機能として、位置および圧力センサが装備されている。これらのセンサにより、グラップルの位置などの情報が遠隔操作しているオペレータに伝達可能である。

2. 実験機による遠隔操作の作業模擬実験

車載のカメラから得られる画像情報だけで作業を行うことは極めて困難であることから、遠隔操作をアシストする制御システムを構築した。このシステムの有効性を確認するため、グラップルローダで立木を把持する作業を対象として、搭乗して行う操作、遠隔操作および開発したシステムを用いた遠隔制御による操作を行い、その作業性を比較した。その結果、遠隔操作では搭乗操作に比べ、2 倍以上の作業時間を要するのに対し、遠隔操作をアシストする制御システムを用いた遠隔制御では搭乗操作とほぼ同等の速度で作業を行うことが可能であり、開発した制御システムの有効性を確認できた。

第3章 リアルタイム作業支援システムの開発

1. 林分情報と地形情報の収集とマッピングシステムの開発

デジタルカメラの画像を使って、立木とその直径を計測する方法について検討した。簡易な基準点を用いて、横方向への移動により一定の面域の立木位置と幹直径が計測できることを示した。画面の横方向の測定精度はほぼ理論上の誤差と一致したが、奥行き方向では基準点の誤差に起因すると考えられる数十センチメートルの誤差が現れた。このような方法で取得された林分情報を3次元形状モデルとして展開して、xファイル形式で出力するプログラムを作成した。このファイル形式を読み込み可能なプログラムにより処理すれば、森林の3Dグラフィックスが描画できる。これをテレコントロールシステムのマッピングシステムとして採用した。

2. 林分情報を用いた作業計画立案方法

間伐後の残存木が均等に配置されるような選木を行うために、立木配置の均等性を評価する数値として隣近測度とボロノイ領域の面積の変動係数を評価値として用いた。本研究では、4つのアルゴリズムをとりあげ、位置情報をまったく考慮しないランダム法と比較して、距離法や面積法は配置の均等性から優れていることをシミュレーションと実際の林分への適用例から明らかにした。選木の結果はマッピングシステムを通じてオペレータに3次元グラフィックスとして表示される。

3. リアルタイム作業支援プログラムの開発

立木位置の情報と移動体（林業機械）の位置情報に基づいて、リアルタイムでオペレータに対

して障害物への接近を知らせる方法を検討した。具体的には、3D グラフィック上で作業実行中の立木、移動機械の状況をリアルタイムで鳥瞰表示し、障害物接近を警告音で知らせるプログラムを開発し、リアルタイム支援の一つとして障害物の回避が可能であることを示した。最後にマッピングシステム、間伐木選木のアルゴリズム、障害物回避を1つのプログラムとしてまとめ、プロセス間通信を用いることによってコントロールプログラムと統合した。

VII 今後の課題

第1章 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発

1. 作業対象物形状計測装置の開発

本計測装置は、林内における測量などにも利用できると考えられるが、材形状の把握等への応用も考えており、さらに精度を高める手法を検討していきたい。投光器の制御にはステッピングモータを用いるが、レーザー光直線の特定はステッピングモータの回転角から計測することになるので、今後は回転軸周りのパラメータの決定手法について検討を行う。

2. 車両周辺立木情報の把握手法

試験で使用したレーザーパターンプロジェクターは投光角45°であり、その範囲内に入っている立木が測定対象であった。そのため周囲の立木情報を得るためには、少なくとも8回の計測が必要となる。森林内作業へ適用していくためには、車両周囲の立木情報が必要となる。今後全方位カメラへ応用する手法を検討し、さらなる簡素化と効率化を図る必要がある。

3. 林業車両のための森林内ナビゲーションシステムの開発

地形傾斜や土壌条件などの林地の地形条件が走行距離の算出精度に影響する問題が残った。これを改善するために地形条件の変化を慣性計測装置のピッチ角変化や油圧回路内の圧力変化等から指令電圧と走行速度の係数を補正する必要がある。

第2章 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発

1. 遠隔制御実験用グラブプロローダの製作

試作機製造時の制限から、機械操作用の無線装置として安価な無線 LAN を用いて制御システムを構築したが、実際の現場である林内では立木などの障害物、地形の凹凸、傾斜等の影響を受けやすいため、無線 LAN の使用は困難であることが予想される。このため、林内のような障害物が多数存在するような環境下でも、十分に通信可能な周波数帯の無線機に関して、検討を行う必要がある。

2. 実験機による遠隔操作の作業模擬実験

作業の模擬実験に用いた荷役作業以外にも、遠隔操作による作業を対応可能とするためには、遠隔操作をアシストする制御機能の拡充が必要であり、ソフトウェアの充実を図る必要がある。

第3章 リアルタイム作業支援システムの開発

1. 林分情報と地形情報の収集とマッピングシステムの開発

デジタル画像を用いて森林の地形や林分情報を得るという作業は、20m～50m四方程度の林分であれば、基準点を作設し、対話型のプログラムを使って立木の輪郭を手動測定すれば十分可能

であり、小規模の伐採現場や森林作業の調査への適用は有用である。しかし、中小規模の伐採現場のように、数ヘクタールの面域の地形情報や林分情報を入手するには、地形図の活用、航空機を用いた上空からの写真撮影やレーザースキャンのような方法を検討する必要がある。

2. 林分情報を用いた作業計画立案方法

アルゴリズムとして用いた距離法や面積法は林分の完全な位置情報を必要とするが、これらの方法が均等な分布を保つことから、立木の位置情報が得られない実際の選木においても近隣の立木間の距離を考慮することによって同様の選木が可能となる。しかし、実際の選木では立木の形質や大きさを考慮する必要があり、切らなければならない立木や残したい立木がどのような分布を有しているのか、あるいは、立木の大きさとボロノイ領域の関係等について今後検討する必要がある。

3. リアルタイム作業支援プログラムの開発

森林の林分条件や地形条件を事前に把握するという前提は、小規模の自営林業、高品質材生産のための集約的施業では可能であっても、一般的な素材生産ではコスト的に問題が残る。一方、本研究期間においてもセンサやコンピュータ等の性能は向上しており、全ての条件を事前に把握しなくても、機械に装備したセンサ類により、作業を進めながら周囲の状況を把握することが可能である。そのため、今後の機械化施業においては、事前に大まかな地形情報などを林業機械に与えておき、機械周辺の条件を測定しながら作業を進めていく方法が可能となるであろう。ここで示した障害物の回避についても機械周辺の情報をもとにして適切な経路選択が行えるように改良を行う必要がある。

VIII 研究発表

- 1) 田中良明、山口浩和、毛綱昌弘、陣川雅樹（2001）林業機械のテレコントロールのためのポインティングデバイスの開発、日林学術講演集 112：534
- 2) 毛綱昌弘（2001）林業用ナックルブームの荷重制御、森林利用学会誌 16(2)：121-128
- 3) 山口浩和、田中良明、川崎達郎（2002）画像処理を用いたヘキサチューブ被覆苗の位置検出方法の検討、日林関東支論 53：199-200
- 4) 山口浩和、田中良明、陣川雅樹、毛綱昌弘（2003）輝点の自動検出による3次元座標計測、日林関東支論 54：241-242
- 5) 山口浩和、田中良明、毛綱昌弘、陣川雅樹、井上源基（2003）位置計測システムにおけるレーザー光パラメータの決定手法、日林学術講演集 114：793
- 6) 山口浩和、陣川雅樹、毛綱昌弘、田中良明、井上源基（2003）カメラとレーザーポインタを使って木の位置を測る、平成14年度森林総研成果選集：34-35
- 7) 毛綱昌弘、田中良明、陣川雅樹、山口浩和（2004）グラップルローダの遠隔操作制御装置の試作、日林関東支論 55：293-294
- 8) 毛綱昌弘（2004）森林作業用ナックルブームの軌跡および荷重制御に関する研究、北海道大学大学院農学研究科邦文紀要 26(2)：155-217
- 9) 山口浩和、毛綱昌弘、田中良明、陣川雅樹（2005）森林内における遠隔操作車両の位置把握手法、森林利用学会誌 19(4)：267-270
- 10) 山口浩和、田中良明、毛綱昌弘、陣川雅樹（2005）遠隔操作車両の森林内走行、日林学術講

演要旨集 116 : PB064

- 11) 山口浩和、陣川雅樹、毛綱昌弘、田中良明（2005）林業用車両のための森林内ナビゲーションシステム、研究の森から 139 号、森林総研
- 12) Hirokazu Yamaguchi、Masahiro Mozuna、Yoshiaki Tanaka、Masaki Jinkawa（2005）A Tele-operation system for forestry machines、The International Forestry Review7(5) : 183
- 13) 山口浩和、田中良明、陣川雅樹、毛綱昌弘（2006）レーザーパターンプロジェクターを用いた森林内立木位置情報の把握手法、日林関東支論 57

IX 研究担当者

第 1 章 山口浩和、陣川雅樹、田中良明、毛綱昌弘

第 2 章 毛綱昌弘、山口浩和、陣川雅樹、田中良明

第 3 章 田中良明、山口浩和、陣川雅樹、毛綱昌弘、井上源基

第1章 遠隔操作ビジュアルコントロール装置の開発

1. 作業対象物形状計測装置の開発

ア 研究目的

ハーベスタ等の林業機械に搭乗するオペレータは、目視で作業対象物の位置や形状・大きさを確認することができるため、3次元情報を利用した機械作業を行なうことができる。しかし、本プロジェクトで開発するテレコントロールシステムのように機械に搭乗せず遠隔操作をする場合には、機械に取り付けられているカメラからの映像を頼りに作業を行なうこととなり、オペレータはモニタに映し出される2次元情報をもとに作業を行なうため、距離感や立体感といった情報が欠落し、効率的に作業を行なうことが困難となる。

そこで、これらの欠落する情報を補い、オペレータの機械作業を支援することを目的として、機械と作業対象物との相対的な位置関係や、作業対象物の大きさ・形状等を計測するシステムの開発を行い、その計測精度について検証する。また実作業において本システムが使用できる諸条件等を明らかにする。

イ 研究方法

テレコントロールシステムにより機械操作を行なうオペレータが、モニタ画面を見ながら作業を行なう際に、画面にとらえている作業対象物の3次元的位置や大きさ・形状等を計測できる手法を検討する。作業対象物の3次元位置や形状を計測する手法として、ステレオマッチング法がある。このステレオ法は、人間の肉眼のように2台のカメラ映像を用いて画像処理手法により立体視する方法である。しかし、複数台のカメラ映像の処理は極めて煩雑となるものと予想される。そこで2台のカメラの代りに、1台のカメラとレーザーポインタを用いたより簡易な手法について検討した。

レーザーポインタを用いる利点は、離れた位置にある対象物に対して手元の操作でマーキングを行うことができ、かつレーザー光線が位置計測の手段として利用できることにある。つまりこのレーザー光線と、輝点とカメラ中心を通る直線が同一空間上の直線式として特定できれば、三角測量により輝点位置が算出できる（図1-1-1）。

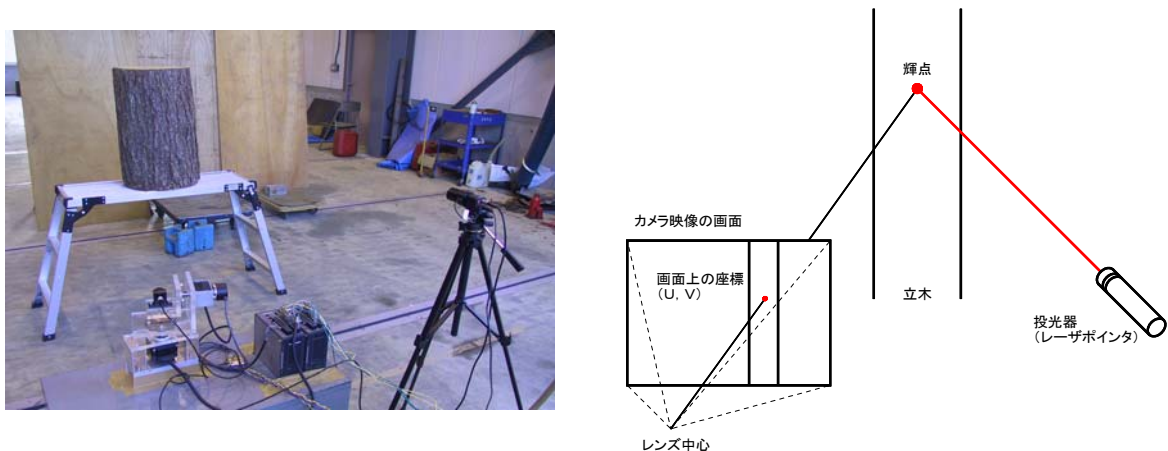


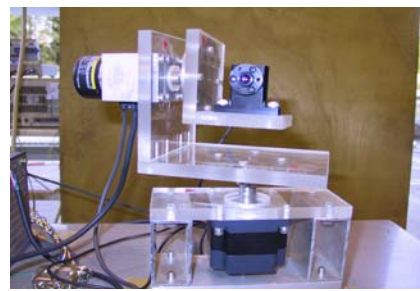
図1-1-1 カメラとレーザーポインタを用いた位置計測手法

各直線の式は次の手法で求まる。あらかじめ座標の分かっている既知点を撮影したカメラ画像を用いてカメラのキャリブレーションを行い、カメラ位置、カメラの向き、画像中心、焦点距離と単位長さあたりピクセル数の関係等のパラメータを決定する。そのカメラにより対象物の撮影を行い、撮影画像上の輝点位置座標（U，V）を特定することで、カメラ中心と輝点を結ぶ直線式を求めることができる。次にレーザー光の直線式は、レーザーポインタの水平軸、垂直軸それぞれに回転角センサを取り付け、カメラ座標上の回転角度として計測することで求めることができる。輝点位置座標は、2 直線の交点として計算されるが、実際には、2 直線が交わることは無いので、2 直線間の距離が最短となる各直線上の 2 点の中点座標が計測値となる。

この計測手法では、処理の過程でカメラの撮影画面上の輝点位置座標（U，V）を特定する必要がある。そこで輝点位置座標を自動的に検出し、U V 座標値として出力する装置を開発した。装置は CCD カメラ、変調式投光器、計測装置（VP-1000）から構成される（図 1-1-2）。レーザーポインタの輝点は画像内の他の部分よりも輝度が高く、画像処理手法を用いて輝点抽出が可能である。つまり、発光するフレームと発光しないフレームを減算処理することで、輝点のみを抽出したフレームを得ることができる。カメラにはさらに輝点抽出能力を高めるために光源の波長とあわせた光学フィルタが取り付けられており、これにより環境光の影響は最小限に抑えられている。減算処理に必要な 2 つのフレームを得るために投光器の発光タイミングはカメラと同期変調させている。発光および計測の周期は 0.1 秒間隔であり、データ処理および U V 座標出力に要する時間は、光点位置が安定してから 1 秒以内である。輝点座標の特定過程では、さらに精度を高めるためにカメラ画像（水平 640×424 ドット）に 2 次元重心演算を行うことにより、サブピクセル分解能（水平 1280×垂直 848 ドット）での出力を実現した。出力はモニタおよび RS232C 出力であり、モニタ出力画面では、人眼で光点を確認しやすくするために、光点位置に十字線スーパーインポーズと U V 座標値を映像に付加した（図 1-1-3）。



（カメラ：光学フィルタ）



（レーザーポイン



（計測装置 VP-1000）

図 1-1-2 カメラとレーザーポインタを用いた位置計測装置

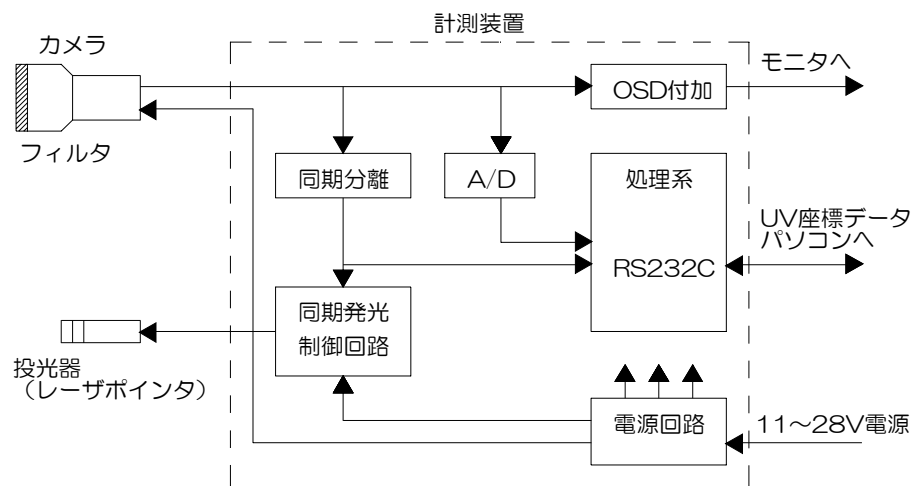


図 1-1-3 画像処理装置の概要



図 1-1-4 輝点位置の UV 座標出力画面（スーパーインポーズ）

本装置を屋外にて使用する場合に問題となるのが光条件である。どのくらいの照度においてカメラ画像で輝点を検出できるかは、本装置を屋外で使用する場合の重要な要素となる。そこで、さまざまな照度条件下においてカメラと対象物までの距離を変化させ、自動検出可能な最大距離を計測した。また、森林内の光環境を計測するため、立木表面の照度を計測し、林縁からの距離との関係を調べた。

次にこの装置を用いて 3 次元位置計測試験を行った。カメラと投光器との距離（基線長）を 0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、の 4 段階に設定し、それぞれの基線長でカメラから 2.5m、5.0m、7.5m、10.0m の位置にある対象物の位置計測を各 8 点ずつ行い、計 128 点の計測を行った。計測精度の検証は、各位置計測データとトータルステーションによる測量値を比較することにより行った。レーザー直線の特定は、今回はレーザー光を 2 地点で遮り、その位置をトータルステーションで測量することで 2 地点を通過する直線の方程式として求めた。

ウ 結果

輝点位置自動検出装置で、輝点位置の検出が行えた屋外の光条件を求めた結果を図 1-1-5 に示す。対象物表面の照度が 2000lux 以下では、照度の増加とともに測定距離が急激に減少しているが、2000lux 以上では、その傾きはかなりなだらかとなり、6000lux での計測でも 4m の距離での計測が行えた。

また、森林総合研究所構内の下層植生のないヒノキ人工林にて林内の立木表面の照度を計測した試験では、直達光の届く部分では 2000~3000lux と高い値を示す場合もあったが、それ以外の部分では、林縁部で 1500lux、林縁から 5m 以上では 500lux 以下であった（図 1-1-6）。

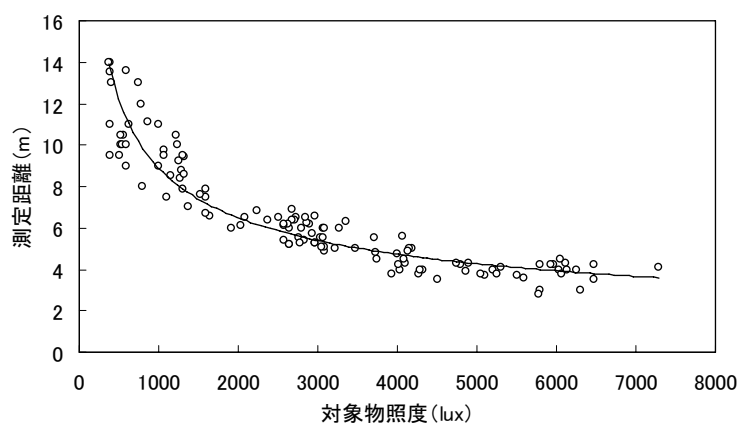


図 1-1-5 作業対象物の表面照度と計測可能距離

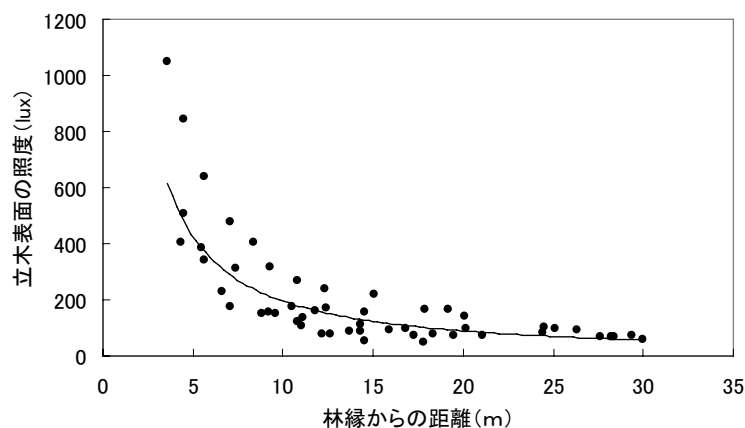


図 1-1-6 森林内の立木表面照度（林縁部からの距離の違いによる）

この装置を用いて 3 次元位置計測を行った結果を図 1-1-7 に示す。グラフは各基線条件における測定誤差の絶対値の平均値と測定距離の関係を示したものである。基線長が長いほど、また同じ基線長であれば、測定距離が近いほど測定精度が高いことが確認できる。特に測定距離に対する誤差は 2 次関数的に増加する傾向にあり、その原因には相対的な基線長の減少と 1 ドットあたりの誤差の増加といった 2 つの要素が関係していると考えられる。表 1-1-1 は、基線長 0.5 m で計測した際の X 方向、Y 方向に発生した誤差である。Y 方向つまり奥行き方向に多くの誤差が発生していることが分かる。Y 方向の誤差の平均値は、5m の位置計測では 15mm 以下であり、10m の計測では 75mm 程度であった。

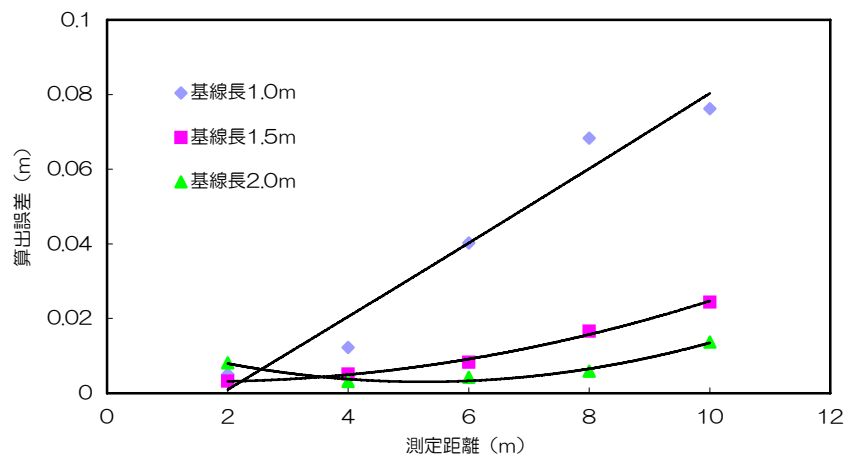


図 1-1-7 3次元位置計測精度

表 1-1-1 計測誤差の発生方向（基線長 0.5m）

		計測距離			
		2.5m	5.0m	7.5m	10.0m
Y 方向 (奥行き方向)	最大値	0.008	0.028	0.123	0.132
	最小値	0.002	0.003	0.001	0.017
	平均値	0.004	0.013	0.038	0.073
X 方向 (水平方向)	最大値	0.002	0.006	0.014	0.024
	最小値	0.000	0.000	0.001	0.000
	平均値	0.001	0.002	0.006	0.009

次に、この装置を用いて、立木と丸太に見立てた作業対象物の形状を計測するために、スキャニング試験を行なった結果が図1-1-8である。このように機械を遠隔操作するオペレータに3Dグラフィックス表示を提供することが可能となる。

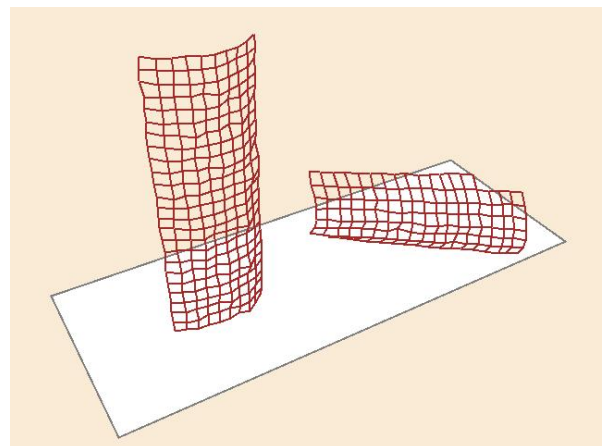
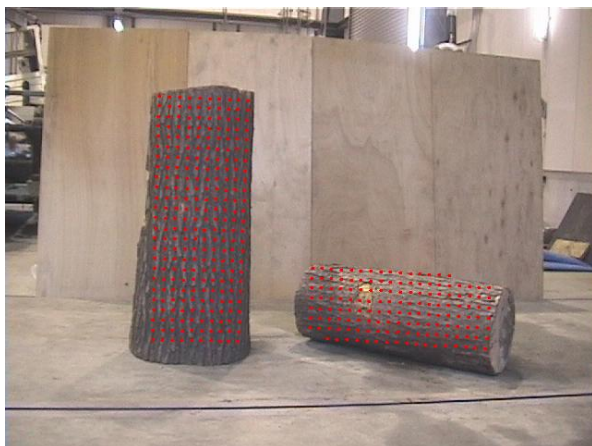


図 1-1-8 作業対象物のスキャニングデータを用いた 3D グラフィックス表示

エ 考察

直達光の少ない林内では 10m 以上の距離でも計測が行えることが分かった。また皆伐地など直達光のある光条件のもとでも、4m 程度の距離であれば計測できることが確認できた。

カメラと投光器間の距離を増やすことで本システムの精度を高めることは可能であるが、機械に搭載する場合には機械の車幅がその制限要因となる。今回の計測試験では、機械の操作に重要となる 3～5m 前後の測定精度は、精度の低い基線長 0.5m の場合でも 15mm 以下であり、材を扱う伐倒機やグラブ等作業機を制御する上での精度としては十分であることが確認できた。

オ 今後の問題点

この計測装置は、林内における測量などにも利用できると考えられるが、材形状の把握等への応用も考えており、さらに精度を高める手法を検討していきたい。投光器の制御には、ステッピングモータの利用を考えているが、レーザー光直線の特長はステッピングモータの回転角から計測することになるので、今後は回転軸周りのパラメータの決定手法について検討を行う予定である。

カ 要約

林業機械の遠隔操作を支援するために、作業対象物の位置および形状を計測する装置の開発を行った。装置はカメラとレーザーポインタを組み合わせ、オペレータの作業画面上の作業対象物にレーザー輝点を与えることにより、カメラとレーザーポインタの距離を基線とした三角測量により 3次元位置座標を算出する手法である。この研究においては、計測手法の確立と装置の作成を行い、屋外でレーザー輝点を検出できる光条件の把握、およびこの装置を用いて作業対象物を計測した際の 3次元座標位置計測精度について明らかにした。その結果、林縁部など作業対象物に直達光が届いている以外の場所においては、この装置を用いた計測が行えた。また、計測精度については、10m 離れた地点にある作業対象物の計測においても誤差 10cm 以下であった。

キ 引用文献

- 1) 近津博文 (1993) 写真測量とリモートセンシング、Vol32、No.6
- 2) 田中良明、山口浩和、毛綱昌弘、陣川雅樹 (2001) 林業機械のテレコントロールのためのポインティングデバイスの開発、日林講 112 : 534

(山口浩和)

2. 車両周辺立木情報の把握手法

ア 研究目的

テレコントロールシステムにより林業機械を遠隔操作する場合、遠隔操作を行うオペレータは機械に搭載されたカメラ映像をもとに機械操作を行うことになるが、モニタに映し出される映像は2次元映像であり、対象物までの距離感や大きさなどの情報が不足し、効率的な作業を行うことが難しいばかりか、機械を走行させる場合などには、周辺木に接触し損傷を与えてしまう可能性もある。

そこで遠隔操作するオペレータが効率的な作業の実行、および立木等に接触しない走行ルートをあらかじめ選択することができるように、機械周辺の立木の位置、大きさ等の情報を把握する手法を開発する。

前項では、立木位置の計測を行うために、カメラ映像でとらえた立木に、カメラから離れた位置に取り付けたレーザーポインタにより輝点を与え、カメラとレーザーポインタとの距離を基線とする三角測量により3次元座標位置を算出する手法について検討した。しかし、この方法では、立木の位置や立木の太さの計測を行うためには、スキャニングという作業が必要となり、計測に時間を要するという問題が生じる。そこで、計測が瞬時に行えるようにレーザー平面を照射するレーザーパターンプロジェクターを利用する計測手法について検討した。

イ 研究方法

この試験で用いたレーザーパターンプロジェクター（以下 LPP）は、均一光強度ラインとよばれる投光パターンを照射するもので、レンズ中心から投光角 45 度のレーザー平面を照射する。この LPP を計測対象に照射すると、平面が対象物により遮られて対象物にレーザーによる輝線が現れる。その輝線は LPP とは違う角度から対象物を捉えたカメラ映像には、その対象物特有の輝線として現れ、その形状から対象物の位置や大きさ、形状を計測できる。計測システムの概要を図 1-2-1 に示す。

画面上の輝線から対象物の形状を計測する手法は次の手順により求められる。まず、輝線は輝点の集合であるため（ピクセル群）、カメラ中心と、各輝点を通る直線の方程式を順次求める。次に、LPP から照射されたレーザー平面の方程式を求める。そして直線とレーザー平面との交点を3次元座標値として算出する。

実験装置には、カメラ（SONY CCD-MC5）およびレーザーパターンプロジェクター（LPP：波長 660nm、出力 50mW）を組み合わせた装置と、撮影した画像フレームを取り込み画像処理する画像処理ボードを組み込んだパソコン部により構成される。

対象物の計測を行うためには、カメラおよびレーザーパターンプロジェクターのキャリブレーションを行なう必要がある。カメラのキャリブレーションは、既知座標点を 12 点写しこんだカメラ映像と既知座標点の測量データを用意し、各既知座標点について画像上の座標位置（UV 座標）と測量データとを演算することにより求めた。レーザーパターンプロジェクターのキャリブレーションは、レーザー平面上の任意の点を 3 点以上抽出し、トータルステーションで各点の座標値を計測し、平面方程式として算出した。この装置を車両等に搭載する際には、カメラおよび LPP を機械に搭載した時点（位置および角度が決定した時点）で、キャリブレーションを一度行

なえば、その後は車両を移動させてもキャリブレーションの必要はない。

計測試験を行うための準備段階として、画面上に映し出されている対象物上の LPP による輝線を抽出する画像処理する試験を行なった。まず LPP を発光させた画像フレームと発光させない画像フレームを作成し、フレーム間で各ピクセルの RGB 値の R 成分について減算処理を行ない、得られた画像フレームの 2 値化を行なった。しかし、この処理では、輝線以外のノイズが多く含まれていたため、ノイズの除去を行なうために、点滅を数回繰り返し複数個の 2 値化フレームを作成し、それぞれを AND 処理した。これによりノイズを除去した輝線のみを抽出した画像フレームを作成することができた（図 1-2-2）。

この装置を用いて森林総合研究所内ヒノキ林において立木位置および立木径の計測試験を行った。計測試験は、装置を移動させながら、森林内の立木 30 本を任意の位置から計測した。精度の検証では、装置を用いて求めた立木情報と森林内に固定したトータルステーションによる測量値（理論値とする）を比較することにより誤差を求めた。装置を移動させるとカメラ座標系が移動するためトータルステーションで精度の検証を行なうことができないので、装置上の 3 箇所に基準点を設け、装置を移動させる毎にトータルステーションで基準点を測量しカメラ座標系の座標変換を行なった上で精度の検証を行なった。

ウ 結果

図 1-2-3 は、計測距離に対する立木位置の計測誤差を示したものである。計測距離が長くなるほど、位置計測誤差が増加する傾向にあることが確認された。精度についてみると、対象物まで 10m 程度の距離であれば、おおむね誤差 3cm 程度で計測できることが分かった。

図 1-2-4 は、計測距離に対する立木径の計測精度を示したものである。計測距離が長くなるほど、立木径の計測誤差が大きくなる傾向にあった。これは遠方を計測するほど、一ピクセルあたりの実距離が大きくなることが関係している。また、遠方ほどレーザー輝線が細く薄くなるため、画像処理を用いた輝線抽出の際の誤差による影響を受けやすかったと考えられる。精度についてみると、対象物まで 10m 程度の距離であれば、おおむね誤差 2cm 程度で計測できることが分かった。

エ 考察

本装置を使用することにより、立木位置の計測および立木径の計測が行えることが確認された。その精度は、森林内を走行し、立木や丸太を扱う林業機械を操作する精度としては十分であると考えられる。また、照射されたレーザー平面が立木により遮られる輝線の形状は、画像処理手法を用いることにより画面上の輝線として抽出できることが確認できた。

建設機械同様、林業機械の遠隔操作も車両に搭載されたカメラ映像を元に操作を行なうことが妥当であると考えられるが、このように LPP（レーザーパターンプロジェクター）を付加した簡易なシステムにより、カメラ映像の 2 次元画面からは得ることができない対象物の正確な位置情報を提供することが可能となり、機械の操作性向上と作業能率の向上が期待できると考えられる。

オ 今後の問題点

試験で使用したレーザーパターンプロジェクターは投光角45°であり、その範囲内に入っている立木が測定対象であった。そのため周囲の立木情報を得るためには、少なくとも8回の計測が必要となる。森林内作業へ適用していくためには、車両周囲の立木情報が必要となる。今後全方位カメラへ応用する手法を検討するなど、さらなる簡素化と効率化を図る必要がある。

カ 要約

森林内において林業機械を遠隔操作する場合、オペレータは車両を確認することができない。遠隔操作による車両の走行や森林作業を安全で効率的に行なうためには、車両周囲の情報、特に立木位置や立木径等を瞬時に確認できることが望ましい。そこで、レーザー平面を照射するレーザーパターンプロジェクターとカメラを組み合わせた森林内立木位置計測装置を開発し、その計測精度について考察した。この装置を用いて森林内で立木の計測試験を行なった結果、およそ10m離れた位置にある立木については、3cm程度の誤差で位置計測が行えた。また、立木径については2cm程度の誤差であった。この誤差は、林業機械を操作する上では十分な精度であり、この装置が有効に機能することが確認された。

キ 引用文献

- 1) 田中良明、山口浩和、毛綱昌弘、陣川雅樹（2001）林業機械のテレコントロールのためのポインティングデバイスの開発、日林講 112：534
- 2) 山口浩和、田中良明、川崎達郎（2001）画像処理を用いたヘキサチューブ被覆苗の位置検出手法の検討、日林関東支論 54：241-242

（山口浩和）

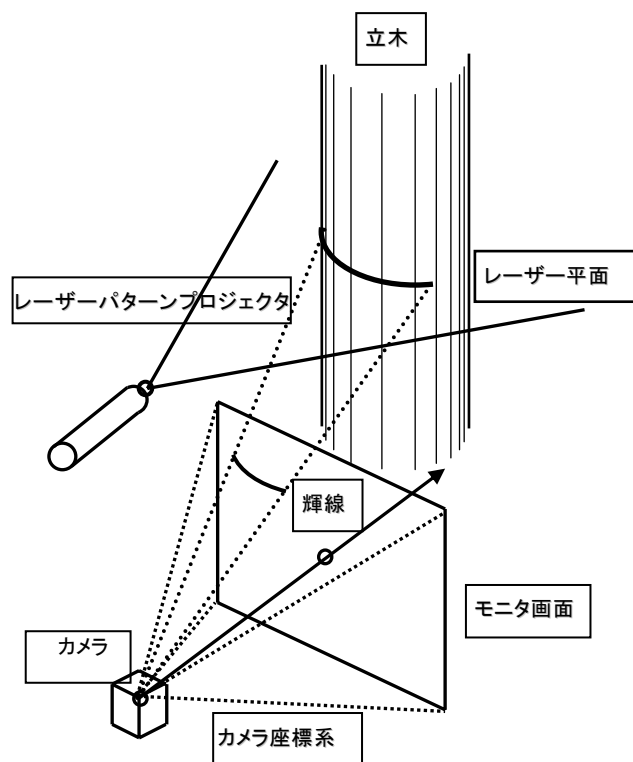


図 1-2-1 カメラとレーザーパターンプロジェクターを用いた立木計測

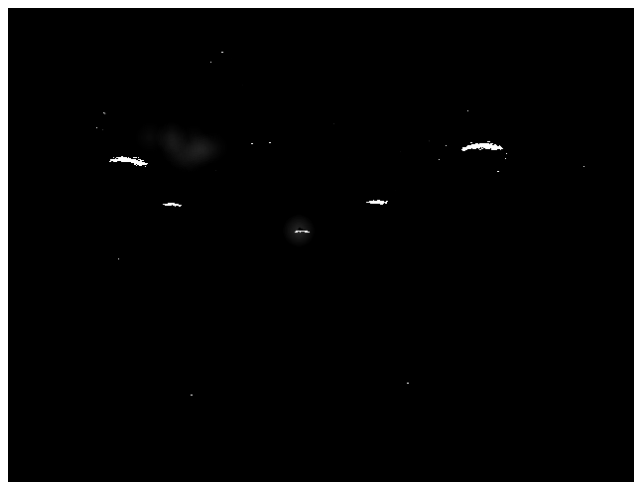


図 1-2-2 立木表面のレーザーパターンの抽出

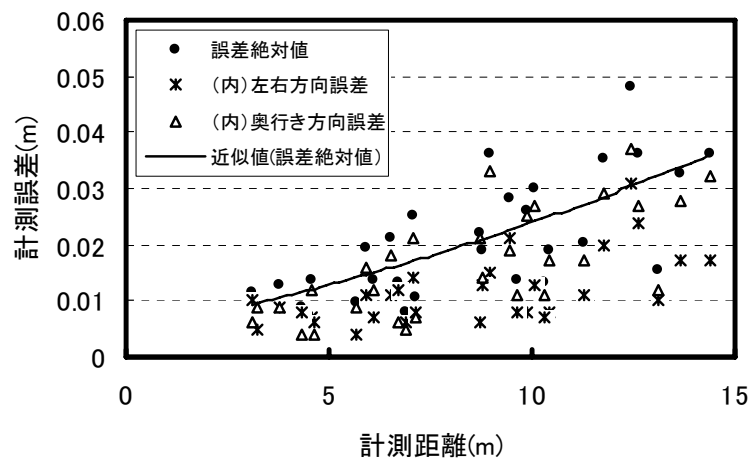


図 1-2-3 立木の 3 次元位置計測精度

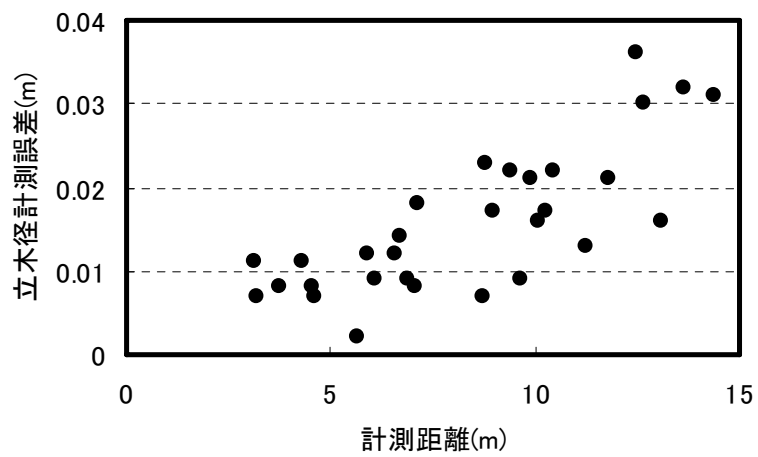


図 1-2-4 立木径の計測精度

3. 林業車両のための森林内ナビゲーションシステムの開発

ア 研究目的

テレコントロールシステムでは、オペレータは機械に搭載したカメラからの受信映像により、作業対象物の位置や作業機の状態など機械操作に必要な情報を得ることができる。しかしこれらは作業対象物と機械自身の局所的な情報であり、森林作業を効率的に進めるためには、「現在林道からどれくらいの位置にある、どの木を切ろうとしているのか」、「森林計画において次の作業対象木はどの位置にあり、どのような移動経路をとるべきなのか」などの機械の周辺も含めた大局的な情報が必要であり、その情報を得るためには、森林内における機械の現在位置および方向を把握する必要がある。建設現場などのような見通しの良い広い現場での作業では、外部に設置されたカメラ映像により機械位置情報を得ることができるが、見通しの悪い森林内では困難である。また、最近の研究では、車両の位置を把握するためにGPSと慣性計測装置を用いた手法が検討されているが、森林内においては、すべての地点であらゆる時間にGPSを利用できるという可能性は低い。そこで、車両に搭載したセンサのみを利用して森林内の三次元位置を特定する手法として、慣性計測装置とレーザー距離計を用いた方法について検討した。

イ 研究方法

試験に用いた車両は、車体寸法 1,800mm×1,500mm（長さ×幅）の履带式走行車両（図 1-3-1 左）である。履帯走行部は油圧モータにより駆動し、油圧モータへの流量の制御は、油圧サーボバルブにより行っている。

車両の計測部は、レーザー距離計を車体後部、慣性計測装置を車体中心部に取付けた。レーザー距離計には、オプテック社 RT-50S を使用し、車両周辺の任意の方向を計測できるように、パン、チルト方向へ回転可能な 2 軸の回転台に取付けた（図 1-3-1 右）。各軸は、ステッピングモータにより回転し、回転角の計測はロータリエンコーダにより行う。

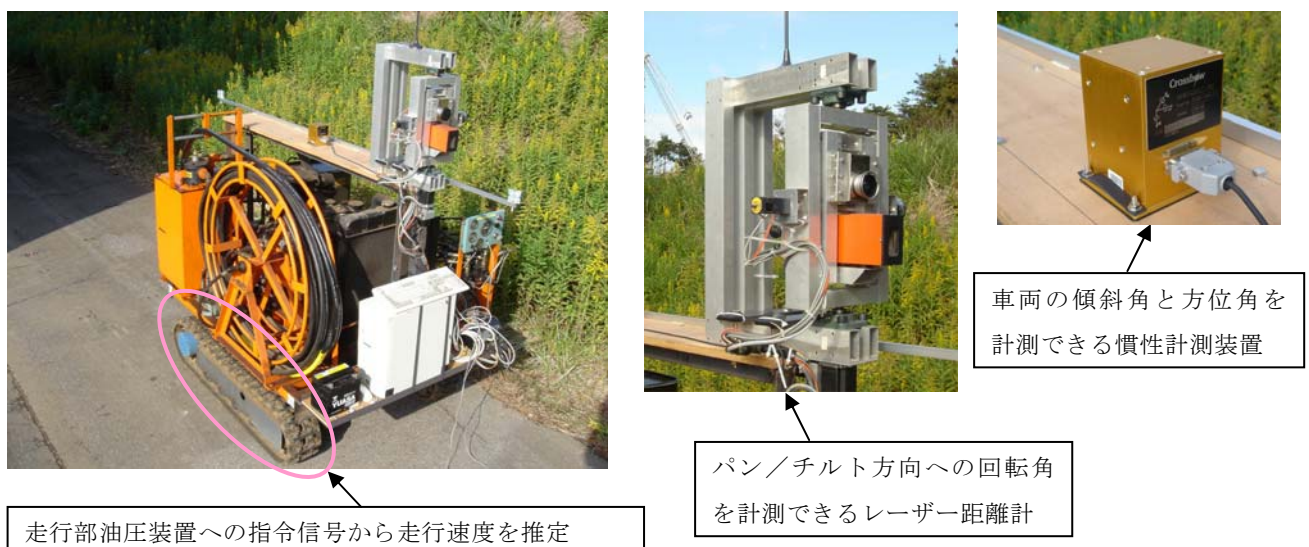


図 1-3-1 試験に用いた車両の概要と装備したセンサ

慣性計測装置には、3 軸ジャイロ、3 方向加速度計、3 軸磁気方位センサから構成される CROSSBOW 社製 AHRS400 を使用した。この装置は、各軸方向への加速度、各軸周りの角速度、姿勢角、方位角を計測できるが、本システムでは、姿勢角、方位角のみを利用している。慣性計測装置およびセンサ類の諸元を表 1-3-1 に、計測システムの概要を図 1-3-2 に示す。各センサからの計測値は、100ms ごとにサンプリングしてパソコンに取り込み、演算結果を記憶装置に記録する。

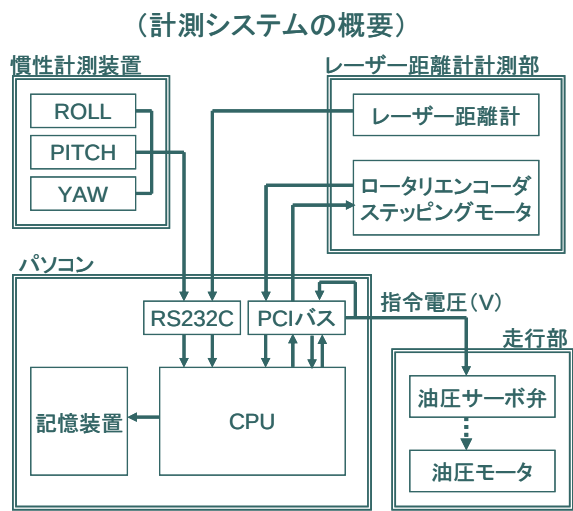


図 1-3-2 位置計測システムの概要

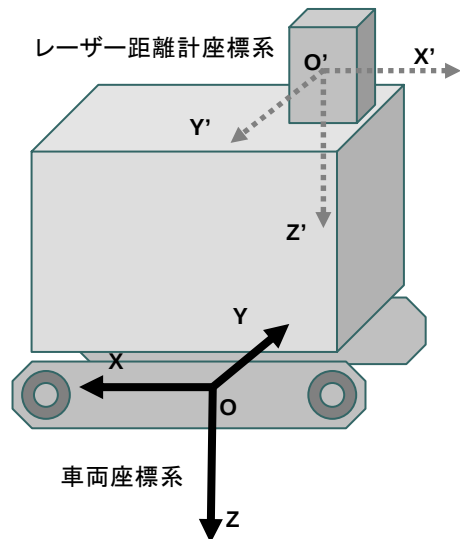


図 1-3-3 座標系の設定

表 1-3-1 車両に装備したセンサ類の精度

センサ種類	精度（分解能）
方位角(YAW)	$< \pm 1.5^{\circ}(\text{static}) < \pm 3.0^{\circ}(\text{active})$
姿勢角(ROLL, PITCH)	$< \pm 0.5^{\circ}(\text{static}) < \pm 2.0^{\circ}(\text{active})$
レーザー距離計	$< 3\text{mm}$
ロータリエンコーダ	$0.05^{\circ}/\text{pulse}$
AD／DA 変換	16bit
センサ値更新レート	100ms

森林内における車両の三次元位置の特定手法の概要は図 1-3-4 の通りである。森林内にあらかじめ測量を行った既知座標点を設定し、車両に搭載したレーザー距離計によりその既知座標点を視準することにより求められる車両と既知座標点の相対位置関係から、森林内における車両の絶対位置を逆算により求める。車両の移動を効率的に行うために、既知座標点の視準は一定距離走行ごとに行うものとし、その間は、慣性計測装置による車両の姿勢角、方向角および車両の走行速度から車両位置を推定する。この推定区間の精度により、既知座標点を確認する頻度（その間に走行できる距離）を求めることができる。一方、既知座標点の視準による三次元位置座標の計測精度は、森林内に配置する既知座標点の間隔を決定する基準となる。

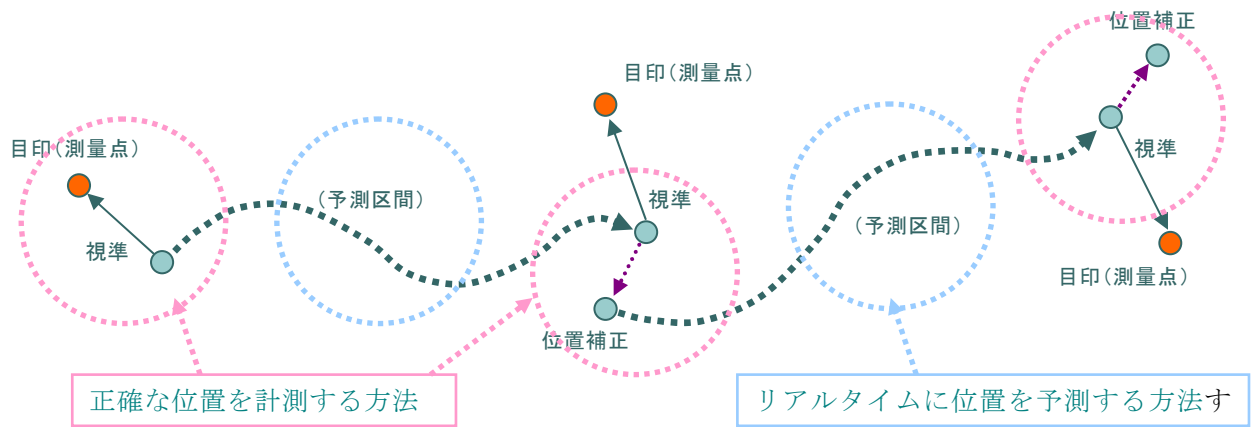


図 1-3-4 車両位置計測手法の概要

三次元位置座標計測を行う上で、図 1-3-3 のような座標系を車体上に設定した。1 つは、レーザー距離計による視準位置（輝点位置）を特定するための回転 2 軸の交点を中心とするレーザー距離計回転台座標系（L 座標系）、もう 1 つは、車両の姿勢や移動方向を計測するための、車両の履帯が地面と接する平面上に車両の進行方向と横方向をそれぞれ X 軸、Y 軸とする車体座標系（M 座標系）である。なお、M 座標系の原点を車両の特定位置とした。

$$\begin{aligned}
 \vec{P} &= \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \cdot B \cdot \begin{pmatrix} dist \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.864 \\ 0 \\ -1.690 \end{pmatrix} \\
 A &= \begin{pmatrix} C(\alpha+180) & -S(\alpha+180) & 0 \\ S(\alpha+180) & C(\alpha+180) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} C(\beta) & 0 & -S(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ S(\beta) & 0 & C(\beta) \end{pmatrix} \\
 \vec{P} &= \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -distC(\alpha)C(\beta) - 0.184 \\ -distS(\alpha)C(\beta) \\ -distS(\beta) - 1.690 \end{pmatrix} \quad \Lambda (1) \\
 \vec{P}' &= \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = C \cdot D \cdot E \cdot \vec{P} = CDE \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \\
 C &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C(\psi) & -S(\psi) \\ 0 & S(\psi) & C(\psi) \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} C(\theta) & 0 & S(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -S(\theta) & 0 & C(\theta) \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} C(\phi) & -S(\phi) & 0 \\ S(\phi) & C(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \vec{P}' &= \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\theta)C(\phi) & -C(\theta)S(\phi) & S(\theta) \\ C(\psi)S(\phi) + S(\psi)S(\theta)S(\phi) & C(\psi)C(\phi) - S(\psi)S(\theta)S(\phi) & -S(\psi)C(\theta) \\ S(\psi)S(\phi) - C(\psi)S(\theta)C(\phi) & S(\psi)C(\phi) + C(\psi)S(\theta)S(\phi) & C(\psi)C(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \Lambda (2)
 \end{aligned}$$

L 座標系は、M 座標系に対して、Z 軸周りに 180°回転し、(X, Y, Z) 方向へ (-0.864, 0, -1.690) オフセットされた位置関係にある。レーザー距離計の視準位置は、ロータリエンコーダの回転角度と計測距離値から L 座標系上の座標点として求められる。これを M 座標系上の座標点として変換し、M 座標系原点からのベクトル ($\vec{P}$) として表記すると (1) 式ようになる。

一方、M 座標系は、慣性計測装置により計測した姿勢角および方位角により回転変換することにより森林座標系（地球座標系：水平面かつ磁北を 0 度とする）に変換することができる。慣性計測装置の出力角は、オイラー角により定義されているので、ロール角、ピッチ角、ヨー角の順に回転座標変換を行うことにより、 $\vec{P}$ を森林座標系上のベクトル ($\vec{P}'$) として (2) 式のように表すことができる。 $\vec{P}'$ を既知座標点の位置ベクトルから減算することにより、森林内における車両の三次元座標位置が算出される。

ただし、 $\vec{P}$: レーザー輝点位置ベクトル（車体座標系）、 $\vec{P}'$: レーザー輝点位置ベクトル（森林座標系）、レーザー距離計回転台座標系上の Z' 軸周りの回転角（パン角） α 、Y' 軸周りの回転角（チルト角） β 、距離計計測値 $dist$ 、車体姿勢角 Y 軸（ピッチ軸）周りの回転角 θ 、X 軸（ロール軸）角周りの回転角 ψ 、Z 軸（ヨー軸）周りの回転角 φ とする。また、三角関数に関しては、たとえば、 $\cos(\theta) = C(\theta)$ 、 $\sin(\varphi) = S(\varphi)$ と簡易に記述することにする。

推定区間において車両の現在位置は、車両の姿勢角、方向角および走行速度から算出する。位置精度を高めるためには、車両の走行速度を正確に検出する必要がある。移動体の速度は、慣性計測装置で計測される加速度成分を時間で積分することにより求まるが、移動体の速度が極低速で林地のように走行にともなう振動の多い環境においては誤差が非常に大きくなる傾向にある。また、車輪の回転数をロータリエンコーダで計測する方法 (2) は、全旋回型の車両に応用することができない。そこで、履帯を駆動する油圧モータへの流量調整を行う電磁サーボバルブに送る指令電圧から車両の走行速度を推定することを試みた。その結果、指令電圧と走行速度の関係は、回帰分析により（相関係数： $R^2=0.999$ ）、(3) 式のように一意に求まることから、推定区間においては車両速度を指令電圧から推定することとした。

$$v = 0.002V^3 - 0.0484V^2 + 0.3316V - 0.0456 \quad \Lambda \quad (3)$$

v : 車両速度 (m/s) V : 指令電圧 (volt)

森林座標系上での車両位置は、車両の X 軸方向に設定した速度ベクトルを、車体姿勢角、方位角によって前述のように回転座標変換し、森林座標系上のベクトルとして求め、X、Y、Z それぞれのベクトル成分を時間ごとに積分していくことにより求めた。

ウ 結果

平坦地および傾斜地に車両を停止させ、既知座標点をレーザー距離計で視準し、車両の三次元位置を特定した。特定精度を評価するために、トータルステーションを用いて車両位置を測量した。図 1-3-5 は、測量値との比較による車両の三次元位置の特定誤差を示したものである。視準距離に比例して誤差絶対値が増加する傾向にあった。慣性計測装置の方位角誤差を検証したところ、平均で 1.7°程度誤差があったことから、誤差の多くは方位角の検出誤差に起因するものであると推定できる。

誤差の特徴については平坦地と傾斜地を比較した場合、傾斜地での視準時に誤差のばらつきが多く、また誤差の発生方向については、水平誤差に対する垂直誤差の割合が高い傾向にあった。

誤差絶対値を回帰分析した結果、視準距離を約 12.5m とすることにより、信頼度 95% で誤差が車両幅内（半径 750mm 球内）に収まる結果を得た。このことから、25m 間隔程度に森林内に既知座標点を設定（視準距離は最大 12.5m）することにより、車幅内に収まる精度で車両の三次元位置を特定できることが明らかとなった。

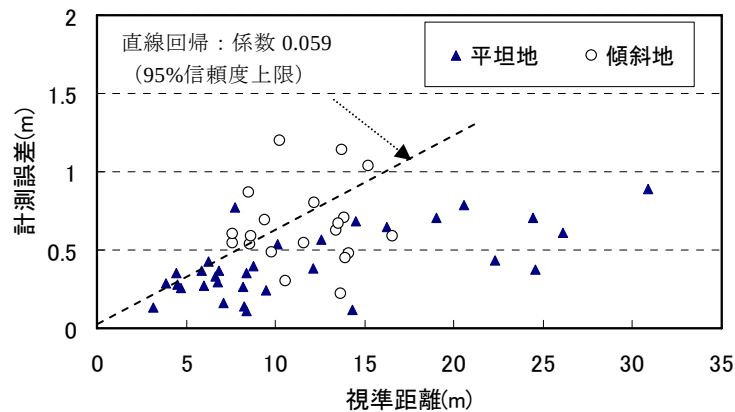


図 1-3-5 既知座標点視準による車両位置特定精度

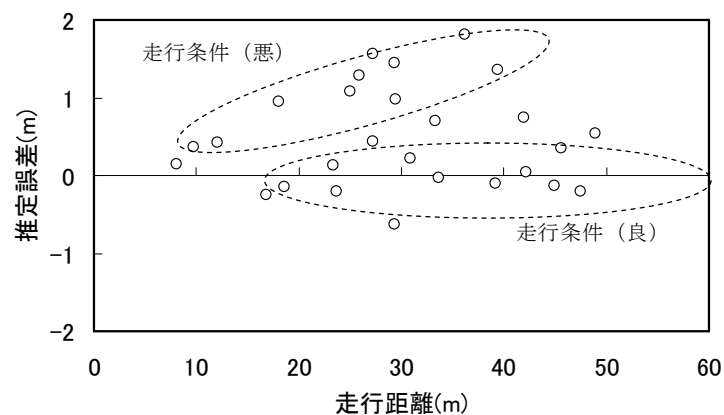


図 1-3-6 自律航法による車両位置推定精度

推定区間における位置推定精度を検証するために、走行条件の異なる走路において、走行時の車両位置推定試験を行った。図 1-3-6 は、走行距離に対する誤差を示したものである。走行条件により推定精度が影響される結果となった。走行条件の良いところでは誤差が少なく、走行条件の悪い箇所（傾斜地、軟弱地、荒れている林地など）では、位置推定誤差が増加する傾向であった。

森林総合研究所敷地内のヒノキ林において、前述の三次元位置特定手法を用いて試験車両の走行経路の記録を行った。既知座標点には黄色いテープで目印をつけた立木を利用し、前述の位置計測試験で得られた結果に基づいて林内に 25m 程度間隔で配置した。既知座標点はトータルステーションにより測量を行った。

スタート地点において、既知座標点を視準した後に走行経路の記録を開始した。図 1-3-7 は、車両の走行経路を記録した結果である（走行距離約 130m）。一定距離走行ごとに既知座標点を視準した場合と、視準せずに走行した場合の 2 通りについて示している。図に示すとおり、視準を行わずに走行した場合には、走行終了時点では立木列で 1 列ほどの誤差（約 3.0m）が生じた。また、走行経路の記録についても視準を行った場合に適正に記録されていることが確認できる。補正量大きい箇所は、推定区間での位置推定誤差が大きかったことを示しており、現地の踏破時に路面の凹凸が激しい区間であることを確認した。今回の走行において、各視準地点での位置計測誤差は平均 0.35m であった。

車両の位置情報を利用した森林内ナビゲーションシステムの例を図 1-3-8 および図 1-3-9 に示す。ここでは簡単な立木マップ上に車両の位置と移動経路、また車体と周辺木の 3D グラフィックスを表示した。今後は、車両の走行が困難な場所、障害物のある場所、また環境的な側面から車両の立ち入りが望ましくない場所等を示した森林情報マップを作成し、効率的かつ環境に配慮した車両移動を実現できるシステムとする予定である。

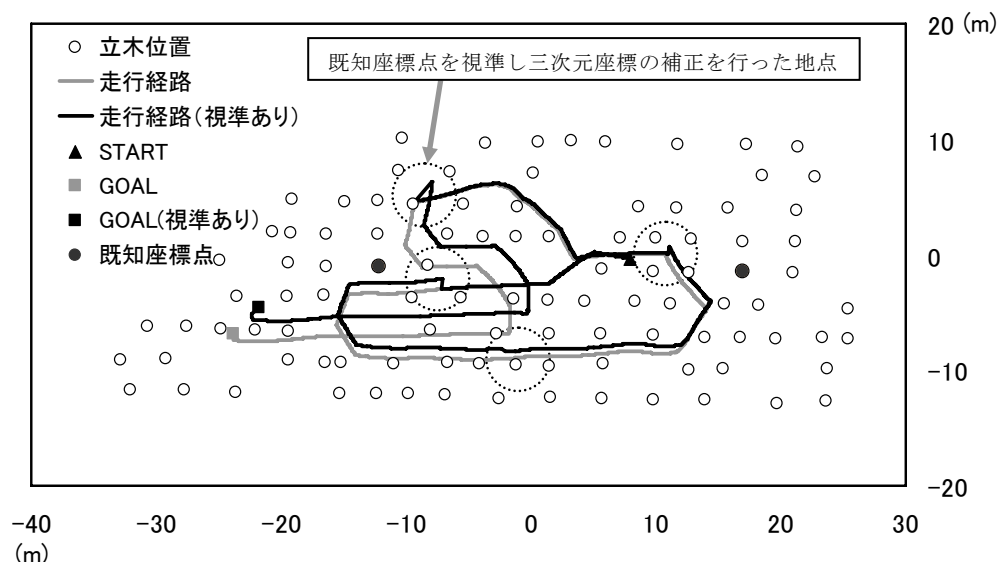


図 1-3-7 走行経路の記録結果

エ 考察

慣性計測装置とレーザー距離計を用いた三次元位置特定手法を用いることにより、森林内に ha あたり 16 本程度既知座標点を設定しておけば、車両幅内の精度で車両の位置計測を行うことができることが明らかとなった。

また、推定区間における走行については、走行条件の良い林地において、油圧サーボバルブに出力する電圧値から推定した走行速度と慣性計測装置の姿勢角、方位角から演算する手法が有効であることが分かった。

2 つの手法を併用することにより、森林内の走行において、連続して車両の走行経路を記録できることが確認できた。推定精度については、走行条件の良い場所では 70~80m 走行時にも車両幅内の精度で位置推定を行えた。

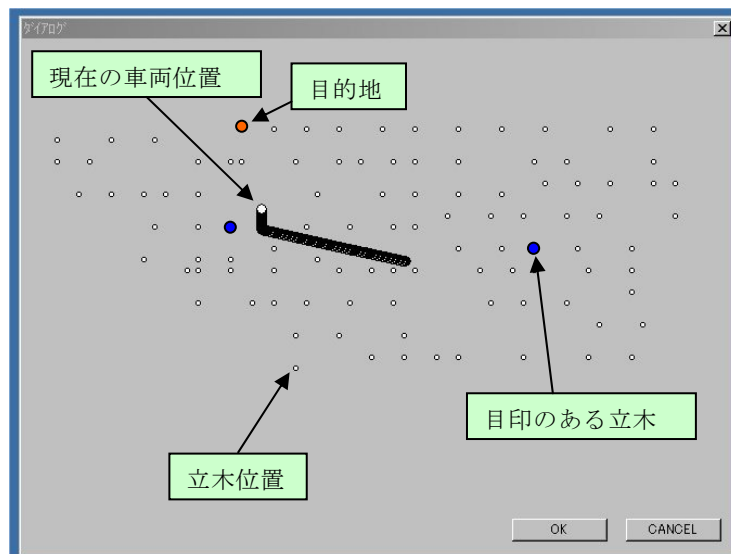


図 1-3-8 立木マップ上の車両位置と移動経路

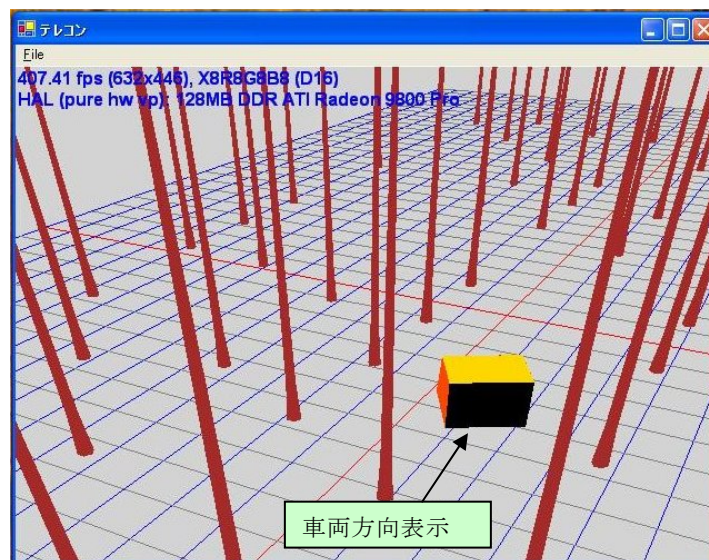


図 1-3-9 車両向きと周辺木の 3D グラフィックス表示

オ 今後の問題点

地形傾斜や土壌条件などの林地の地形条件が走行距離の算出精度に影響する問題が残った。これを改善するために地形条件の変化を慣性計測装置のピッチ角変化や油圧回路内の圧力変化等から、指令電圧と走行速度の係数を補正する必要がある。

このシステムの利用用途として次のようなことが考えられる。1) あらかじめ地図上に作業対象の位置を示しておくことで、効率的に到達することができる。2) 急傾斜地点や障害物、走行に適さない場所を地図上に示しておくことで、そのような地点を回避した走行経路を辿ることができる。3) 既知座標点を何点か視準することにより三次元位置計測精度の向上が期待できるため、移動しながら既知座標点周囲の測量にも応用できる。

カ 要約

森林作業を効率的に進めるために、森林内における車両の現在位置や作業対象の位置等を把握できる森林内ナビゲーションシステムの開発を行った。森林内においては、一般的に用いられているGPSを利用した測位システムが常時利用できるとは限らない。そこで森林内における車両位置の特定には、既知座標点を車両に搭載したレーザー距離計により視準して自己位置を計測する手法と、慣性計測装置と車両の走行速度から自己位置を推定する手法の2通りの手法を検討した。前者の手法では、計測距離に対して5%程度の誤差で位置計測が行えた。後者の手法では、地形の起伏や路面条件等にその精度が大きく影響を受ける結果となったが、走行条件の良いところでは、3%程度の誤差で車両位置の推定が行えた。

キ 引用文献

- 1) 有賀一広、仁多見俊夫 (2003) GPS・ジャイロ・加速度計併用センサの森林地域での利用、森利学誌 18(3) : 189-194
- 2) 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、森利学誌 15(3) : 197-204

(山口浩和)

第2章 遠隔操作に対応した自動制御技術の開発

1. 遠隔制御実験用グラップルローダの製作

ア 研究目的

労働災害を防止し、作業を安全に行うには、オペレータが機械に搭乗して作業を行うのではなく、離れた場所から遠隔操作によって作業を行うという方法が考えられる。この方法は危険地帯における特殊な作業に対して実際に採用されていたが、近年の通信技術の発展により、一般の産業にも十分に対応可能なインフラ整備が進んできている。このため、この遠隔操作を林業作業にも対応させることを目的として、林業機械操作に必要な情報および機械の制御方法について検討を行う。

現在でも、遠隔操作によって作業が行われている林業機械には、自走式搬器、林内作業車の木寄せ用ウインチなどがある。これらの機械では、離れたところから操作することによって、作業能率の向上などに貢献しているが、オペレータから機械への単方向通信によって操作が行われている。このような単方向通信では、高性能林業機械のような複雑な操作を必要とする作業を遠隔操作することは困難である。このため、機械から得られる作業姿勢や作業機の位置などの情報をオペレータへも伝達する双方向通信により、複雑な操作を可能とする遠隔操作システムの開発を目的に、遠隔制御実験用のグラップルローダを試作した。

イ 研究方法

作業を行うには走行、ナックルブームおよびグラップルを操作しなければならないことから、実験機にはグラップルローダを選定し、林内における荷役作業を対象として遠隔操作実験を行うこととした。制御および通信装置はグラップルローダに搭載されるコンピュータと、操作用のノートパソコンを無線 LAN で接続することにより、遠隔操作を行える構成としている。通信には IEEE802.11b 規格の無線 LAN を使用している。この規格は 2.4GHz 帯の周波数を使用しており、立木などの障害物が多い林内での使用には不向きである。しかし、実験機の製作時における制限から、林内での使用に適した無線機を導入することは困難であったため、試作段階では無線 LAN を用いて遠隔操作実験を行うこととした。このため、実験時には無線 LAN の転送速度の低下、通信不能などに対応する必要があるが生じるが、無線機同士の配置方法などにより対処した。

ウ 結果

グラップルローダは 8 つのアクチュエータを装備している（図 2-1-1）。各アクチュエータの動作は単純な ON/OFF 切り替えによる操作ではなく、操作量に応じてその動作速度を変化させる必要があることから、手動の操作レバーによって操作されている各アクチュエータのパイロットラインに電磁比例式圧力制御弁を付加することにより、電磁操作可能な構造とした。このため、実験機では搭乗して行う手動操作も従来通り行える。この方法により、電磁操作可能なアクチュエータは左右クローラ、タブレット旋回、ブーム、アーム、バケットリンク、グラップル旋回およびトング開閉である。さらに、遠隔制御用として、全てのアクチュエータのパイロット圧力と油

圧シリンダには圧力計を装備するとともに、スィベルジョイントを介して接続される以外のアクチュエータに位置センサを装備した（図 2-1-2）。

制御および通信装置はグラップルローダに搭載されるコンピュータと、操作用のパソコンを無線 LAN で接続することにより、遠隔操作を行える構成としている。通信には IEEE802.11b 規格の無線 LAN を使用し、アドホックモードで動作させている。遠隔操作はノートパソコンにジョイスティックを 2 台接続することにより、手動操作と同様な方法で行った。

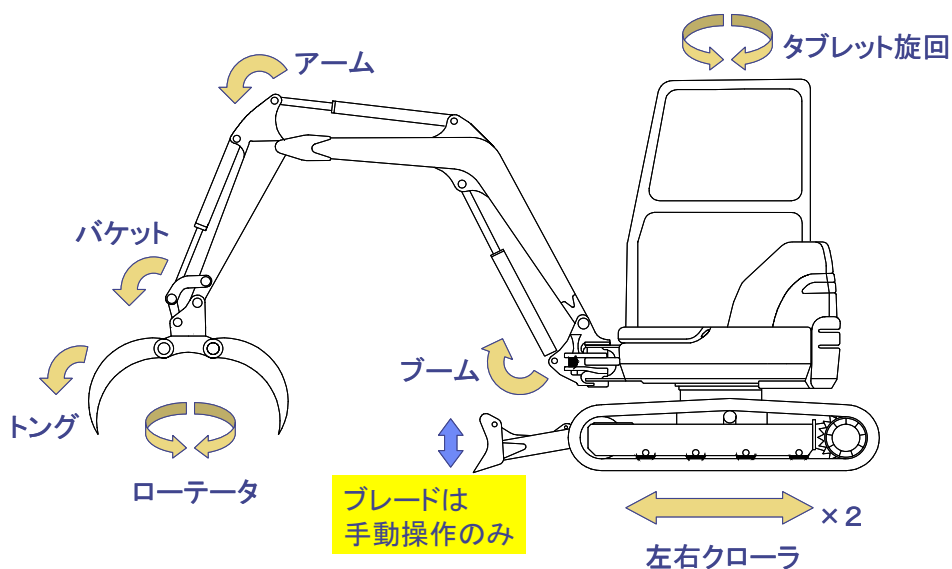


図 2-1-1 グラップルローダのアクチュエータ

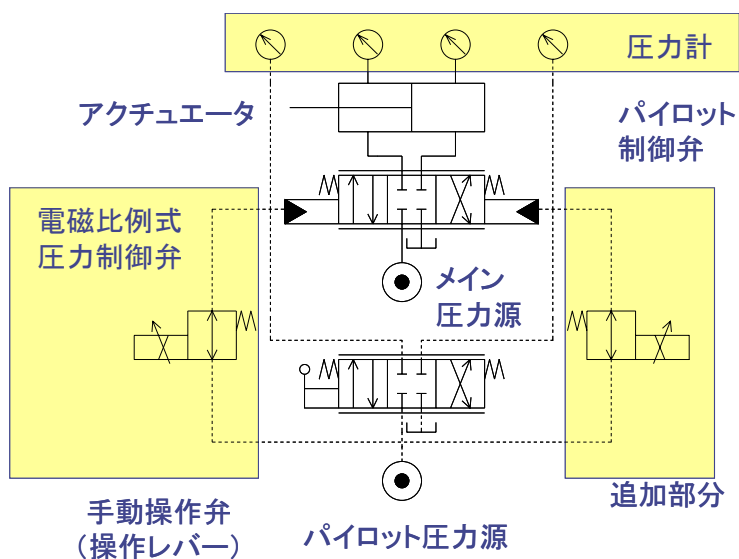


図 2-1-2 試作実験機の油圧回路図

エ 考察

試作したグラップルローダは、 0.09m^3 クラスの油圧ショベルに固定式のグラップルを装備している（図 2-1-3）。現行のグラップルローダとしては、小さいタイプである。ブレードを除く、すべてのアクチュエータ 8 個を遠隔操作可能とするために、改造を実施した。本実験機では標準品の手動による操作方法も残しながら、電磁操作化を図るために、手動操作弁のパイロットラインに電磁比例式圧力制御弁を組み入れている。このため、各アクチュエータに供給される圧油は手動時と同じラインを通して制御されることになる。この方法は油圧ショベルのパイロット式制御弁を取り替えることなく改造可能であることから、安価である特徴がある。この電磁比例式圧力制御弁を動作させることによって、手動操作と同様にグラップルローダを操作可能である。

グラップルローダのアクチュエータにはセンサとして、圧力計および位置センサを装備している。さらに、すべてのアクチュエータのパイロット式制御弁の圧力を計測することで、手動時および電磁操作時でも操作量が検出可能な構成としている。

これらのセンサには、油圧ショベルの移動式クレーン仕様車に使用されているセンサを利用した。これはセンサ単体に関しては、コスト、耐久性などの面で、各建設機械メーカーにおいて十分実証されていることから、林業用として十分に活用できると考えたからである。しかし、タブレットの旋回軸などには、クレーン仕様車でもセンサが装備されないため、別途改造を施している。各アクチュエータに装備されているセンサを表 2-1-1 に示す。タブレットの旋回軸にはエンドレス回転型のポテンショメータを、グラップルのローテータ旋回軸にはアブソリュートタイプのロータリエンコーダを装備することにより、両軸とも 360 度全旋回の位置検出が可能である。左右のクローラの回転数およびグラップルのトング位置検出に関しては、油圧回路のスイベルジョイントの加工が不可欠であることから、センサは装備していない。

実験用のグラップルローダには、ナックルブームの各可動軸に位置センサが装備されている。この位置情報を用いてグラップル先端部の位置座標を計測した結果、ナックルブームを最大に伸ばした場合、 80mm の計測誤差が存在した。この誤差が大きい理由は、軸の回転角検出に用いているポテンショメータのアナログノイズと分解能が低いためであり、クレーン仕様の油圧ショベルに搭載されている安価で導入が簡易なセンサでは、ブームの位置制御を行うには十分な精度は期待できないことが確認できた。

車載と操作用の 2 台のコンピュータを無線 LAN で接続し、データを通信するプログラム、およびセンサ、比例弁の入出力プログラムを作成し、グラップルローダの遠隔操作を行った。このとき、無線 LAN はアドホックモードで動作させている。遠隔操作はノートパソコンにジョイスティックを 2 台接続することにより、手動操作と同様な方法で行えるようにプログラムされている。実験時にはグラップルローダからオペレータに伝達されるセンサの出力値などの情報量は 1 ループあたり 100 バイト、逆に操作者から送られる操作量の情報量は 20 バイトとして実験を行った。これらのデータ量は、現在の実験機のセンサなどの構成を考慮すると、余裕のある転送量である。

見通し距離約 30m 以内では、無線 LAN の最大転送速度で通信可能であり、1 秒あたり 100 ループ以上の速度で転送可能であった。しかし、それ以上の距離および障害物によって見通せない場合には、転送速度の低下が確認できた。本実験機のパイロット式制御弁の応答速度は約 10Hz 程度であることから、最大転送速度を保てなくても十分にグラップルローダを制御可能である

と考えられるが、無線 LAN の転送速度が通信時の条件によって自動的に変化するため、この転送速度の低下に制御プログラムが対応する必要があることが確認できた。

表 2-1-1 試作実験機のセンサ仕様

	手動操作	位置センサ	パイロット圧力	シリンダ圧力
左クローラ	標準仕様	—	○	—
右クローラ	標準仕様	—	○	—
旋回	標準仕様	ポテンショメータ	○	—
ブーム	標準仕様	ポテンショメータ	○	○
アーム	標準仕様	ポテンショメータ	○	○
バケット	標準仕様	ポテンショメータ	○	○
ローテータ	左ペダル	アブソリュート型	○	—
	(スイング用)	ロータリエンコーダ		
トング	右ペダル	—	○	○



図 2-1-3 試作実験機の概観図

オ 今後の問題点

試作機製造時の制限から、機械操作用の無線装置として安価な無線 LAN を用いて制御システムを構築したが、実際の現場である林内では立木などの障害物、地形の凹凸、傾斜等の影響を受けやすいため、無線 LAN の使用は困難であることが予想される。このため、林内のような障害物が多数存在するような環境下でも、十分に通信可能な周波数帯の無線機に関して、検討を行う必要がある。

カ 要約

遠隔制御実験用としてグラップルローダの改造を実施し、搭乗時の操作方法と同様な手法で遠隔にて操作可能な制御システムの開発を行った。遠隔操作の通信装置には無線 LAN を使用したため、データの転送距離の問題は残るが、制御実験用の通信装置として、無線 LAN が十分活用可能であることが確認できた。また、試作実験機には双方向通信によるフィードバック機能として、位置および圧力センサが装備されている。これらのセンサにより、グラップルの位置などの情報が遠隔操作しているオペレータに伝達可能である。今後、グラップルローダに視覚装置などを装備し、遠隔操作実験を行うことで、操作に必要な情報の抽出、あるいは操作を支援する方法などについて検討を行う予定である。

キ 引用文献

(毛綱昌弘)

2. 実験機による遠隔操作の作業模擬実験

ア 研究目的

車両にカメラを装備し、そこから得られる映像情報だけを利用して林業作業を行うことは、地形傾斜などの作業条件が異なるため、車両に搭乗して行う場合と同等の速度、質で作業を行うことはほとんど不可能である。また、カメラから得られる二次元映像では、奥行き等の距離感が欠落することも、作業を困難にする理由の一つである。このため、機械に搭乗して行う作業と同等に作業が可能となるよう、遠隔操作では困難な操作の自動化を試みるとともに、作業対象物までの距離を計測するセンサを追加装備し、遠隔制御システムの構築を行う。その上で、遠隔制御システムによる操作と、搭乗して行う操作で模擬実験を行い、その作業の速度、質等について検証を行う。

イ 研究方法

遠隔で操作を行うオペレータに対して、機械からの作業映像を送信するとともに、二次元映像では欠落する距離感等の情報を検知することを目的に開発したビジュアルコントロール装置を実験機に架装するとともに、機械に装備された各種センサ情報、カメラ映像等を用いて遠隔で作業が可能となるように、遠隔制御による林業作業を支援する制御装置を開発した。また、試作したグラップルローダによる荷役作業を中心とした遠隔操作実験を行うとともに、遠隔操作に不備な点について改良を実施した。最後に、開発した実験機を用いて遠隔操作による林業作業の模擬実験を行い、開発した制御装置等の有効性を確認した。

ウエ 結果・考察

レーザー距離計およびビデオカメラを同一軸上に装備することにより、遠隔操作を行うオペレータに画像情報を提供しながら、その画像の中心点までの距離を計測可能なビジュアルコントロール装置を実験用車両のグラップルローダに装備した（図 2-2-1）。ビデオカメラとレーザー距離計は、ステッピングモータによってパンおよびチルト方向に同時に動作し、各駆動軸はロータリエンコーダによって角度検出を行っている。また、ビデオカメラにはズーム機能が装備されており、すべての操作は遠隔操作により行うとともに、ビデオカメラの映像の中心にはレーザー距離計の計測ポイントが設定されており、オペレータはカメラを操作すると同時に、目標対象物までの距離を計測することができる。センサから得られるカメラの角度とレーザー距離計から得られる目標対象物までの距離から対象物の 3 次元位置を算出、特定する。この装置をグラップルローダに搭載し、目標対象物の位置を計測した結果、グラップルローダの作業範囲である 5m 以内では、10mm 以内の計測精度で対象物の位置を計測可能であった。

実験用のグラップルローダには、ナックルブームの各可動軸に位置センサが装備されているが、この位置情報から得られるグラップル先端部の位置座標の計測結果には、前述のように約 80mm の計測誤差がある。このため、ビジュアルコントロール装置およびナックルブームの計測誤差をあわせると、目標対象物までの距離には最大約 0.1m の計測誤差が存在することになる。このような状態においても、グラップルローダによる対象物の把持作業を確実にを行うためには、目標対象物の位置情報に加え、対象物を把持することによって生じるブームへの反力の情報が必要とな

る。しかしながら、グラップルなどのブーム先端に装備される作業機に荷重計等を装備することは、構造上困難であり、さらにセンサが高価であるため、現実的な手法とはいえない。このため、先端部の荷重計測を、荷重センサを用いずに、先述のポテンショメータおよび各油圧シリンダに装備された圧力計から行う方法（毛綱、2001）を試みた。各リンクの質量、重心位置などの情報から、ブーム先端部荷重を推測した結果、その計測精度は約 5kN 程度の誤差が存在することが確認できた。

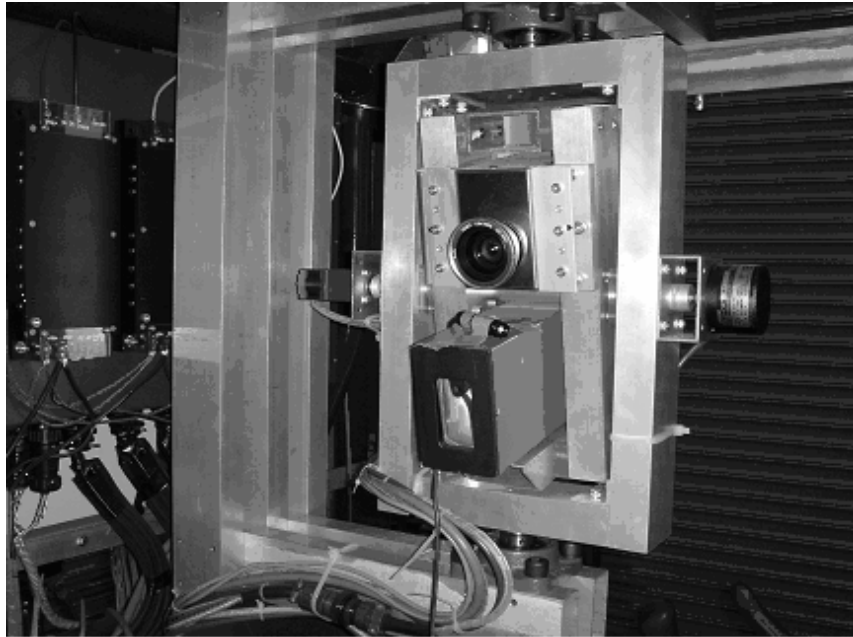


図 2-2-1 試作したビジュアルコントロール装置

立木をグラップルで把持する際、ナックルブームの位置制御機能を導入しているため、グラップルを立木に自動的にセットすることが可能である。しかし、このときグラップルと立木間には多少の隙間が生じる。グラップルのトングによって立木を把持すると、この隙間によってブーム先端部には反力が生じることになるが、この荷重は 10kN 以上である。その計測結果を図 2-2-2 に示す。立木を把持する際には、この荷重によりグラップルローダが不安定な状態になることから、遠隔操作でも車体が安定した状態で作業を行うためには、位置制御と同時に荷重も制御する必要があることが確認できた。

遠隔操作で立木を把持するには、ナックルブームを操作してグラップルを立木にセットしなければならず、遠近感の情報が失われる映像情報だけでは困難となる。このため、遠隔制御装置としてビデオカメラに写っている立木を自動的に把持する機能を組み込んだ。ビデオカメラの映像中心で立木を指定することにより計測される立木の位置から、ナックルブーム先端部のグラップルの位置制御を行う。その後、グラップルと立木間に作用する荷重を求めることで、位置制御を止める位置を決め、最後にグラップルを閉じて立木を把持する一連の動作を自動化した。

この遠隔制御操作を用いて、林内の立木を把持する作業を対象として遠隔操作による模擬実験を行った。操作方法には手動操作、カメラ画像のみを用いた遠隔操作および把持操作を自動制御化した遠隔制御の 3 通りの手法を用いて作業時間等を比較した。その結果、搭乗して行う手動操

作では個人差はあるが、およそ 1 サイクル 70 秒程度要するのに対し、映像情報のみで行う遠隔操作時には、150 から 200 秒必要となり、作業速度において平均約 2 倍以上の作業時間を要した。一方、遠隔制御による方法では 50 秒程度となり、手動操作と同様な速度で作業が行えることが確認できた。林内のように、作業対象以外の障害物が多数存在するような作業環境下においては、映像情報だけでは作業を十分に行えない一方、操作の一部を自動制御化することにより、十分な速度で作業が行えることが確認できた。

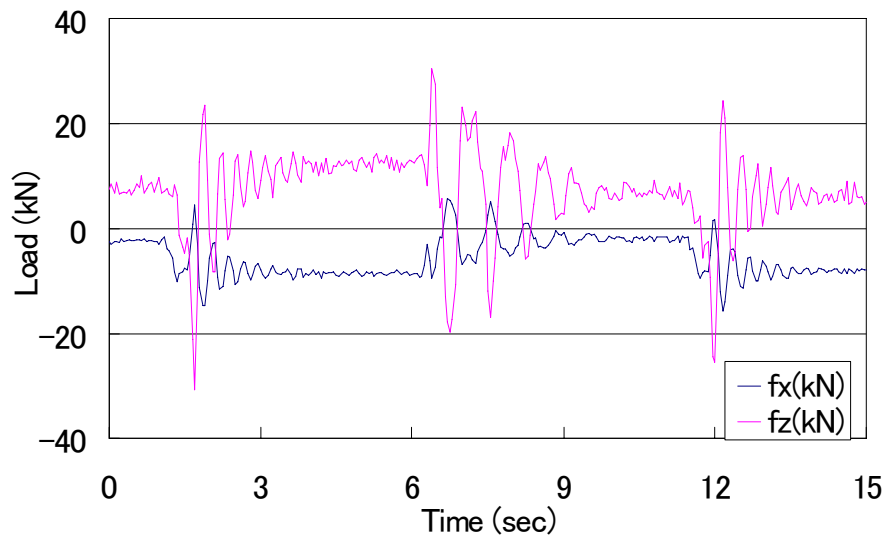


図 2-2-2 立木把持時の先端部荷重変化



図 2-2-3 遠隔制御による立木把持操作実験

オ 今後の問題点

作業の模擬実験に用いた荷役作業以外にも、遠隔操作による作業を対応可能とするためには、遠隔操作をアシストする制御機能の拡充が必要であり、ソフトウェアの充実を図る必要がある。

カ 要約

車載のカメラから得られる画像情報だけで林業作業を行うことは極めて困難であることから、遠隔操作をアシストする制御システムを構築した。このシステムの有効性を確認するため、グラップルローダで立木を把持する作業を対象として、搭乗して行う操作、遠隔操作および開発したシステムを用いた遠隔制御による操作を行い、その作業性を比較した。その結果、遠隔操作では搭乗操作に比べ、2 倍以上の作業時間を要するのに対し、遠隔制御では搭乗操作とほぼ同様な速度で作業を行うことが可能であり、開発した制御システムの有効性を確認できた。

キ 引用文献

- 1) 毛綱昌弘 (2001) 林業用ナックルブームの荷重制御、森林利用学会誌 16(2) : 121-128

(毛綱昌弘)

第3章 リアルタイム作業支援システムの開発

1. 林分情報と地形情報の収集とマッピングシステムの開発

ア 研究目的

テレコントロール作業においては、オペレータが機械に搭乗せず、モニターによるカメラ映像を介して機械操作を行うという特徴がある。そのためオペレータが機械に搭乗することによって、オペレータ自身が感覚としてとらえるさまざまな情報、機械の傾き具合や走行における障害物の状況といった情報が直接は得られなくなる。テレコントロール作業では、こうした情報をカメラ画像やセンサーから得ることになる。しかしながら、対象となる森林の地形情報や林分情報があらかじめ得られているならば、テレコントロールのコントロールプログラムに、こうした情報を活用した森林作業の計画と実行を支援するシステムを備えることによって、より適切な機械操作が実行できるものと考えられる。

ここでの目的は、テレコントロール作業であらかじめ与えられていることが前提となる森林の地形情報や林分情報を、実際に簡易に取得する方法を検討し、それをテレコントロールシステムへ取り込むためのマッピングシステムを作成することである。具体的には、スギ、ヒノキ等の針葉樹人工林の立木位置と幹直径を簡易に把握する手法を開発することを目的として、デジタル画像による立木位置の測定を行い、測定方法、精度といった基本的な問題を検討する。さらに取得した情報を3次元グラフィックスとして表示するマッピングシステムを開発する。

イ 研究方法

立木位置や幹直径の情報をデジタルカメラから得る方法を検討した。写真測量ではカメラの位置、傾きといったパラメータを求める必要があるが、そのためには、基準点と呼ばれる、座標（既知の点）が画像に含まれている必要がある。また、パラメータの解法には、非線形方程式を近似値のまわりに展開して収束解を求める方法が使われているので、パラメータの近似値が必要である。すなわち、各画像が、どの位置、傾きで撮影されたのか、ある程度、予測が出来ることが必要である。

さらに、見通しの悪い林内で、一定の面積の林分を測定しようとするのであれば林内を移動して撮影を行うことが必要である。その上、立木位置を測定するためには、個々の立木の識別がなされていなければならない、また、実際に測定を行うには2枚の画像上で測定点のマッチングが必要である。

以上の問題を考慮して、次のような測定方法を検討した。

まず、林内において直線上を移動しながら、移動方向とは直角にカメラを向け撮影するものとした。傾斜地においては、移動方向を等高線方向、撮影方向を谷側とすることを想定している。このように移動方向と撮影方向を一定に保つことにより、移動距離を地上に設けた目印等により把握できれば、パラメータの近似値を得る問題は解決する。

基準点には、立木を利用して、移動方向に沿って林内に2本の水糸を張り、それに等間隔で目印をつけるものとした。水糸の起点と終点を、何らかの方法で測定すれば、水糸を直線で近似して各目印の座標が確定、基準点とすることができる。これにより、林内で移動を行っても各画像

に基準点を確保することができる。

個体の識別の問題は、画像を連続的に撮影することにより対応することとした。つまり、カメラが右側へ移動すれば個々の立木は、画像の右側に現れて、左方向へ動いていくように見えるが、その動きを追跡することによって、どれがどの木であるのかを識別する。

2枚以上の画像で同一の立木が撮影され、基準点によりパラメータが定まれば、立木位置の測定が可能である。左右両側の画像で立木の輪郭を測定すれば、立木を挟む空間直線 $O_L L$ 、 $O_L L'$ と $O_R R$ 、 $O_R R'$ が確定する（図 3-1-1）。

これらの直線が作る角の2等分線は輪郭が同じ高さで測られていない限り3次元空間で交わることはないが、それぞれの空間直線のXY平面へ投影線は交わり、通直な幹を持つ立木であれば、平面位置が確定する。地際を含む輪郭の情報があれば、3次元測定も可能である。

カメラの数理モデルとそのパラメータを求める方法は文献³⁾の方法を用いた。このモデルには12個のパラメータが存在するが、撮影時に値が定まる位置と傾きを除く、焦点距離等の6つのパラメータは屋外に設置した32点の基準点を使ってあらかじめ測定した。

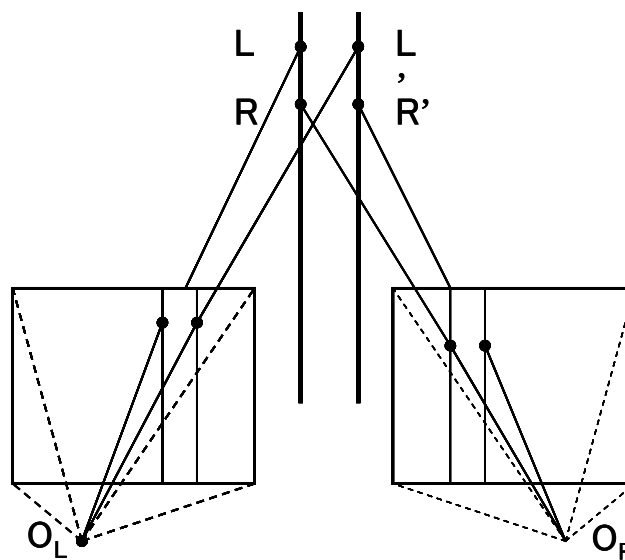


図 3-1-1 輪郭情報による立木位置の測定

森林総合研究所内のヒノキ林において実験を行った。林内に 20m 四方の試験地を設定、全立木 35 本を測定することとした。試験地の 1 辺から約 1 m 離れた線上を右方向に移動しながら移動方向に直角に撮影した（図 3-1-2）。

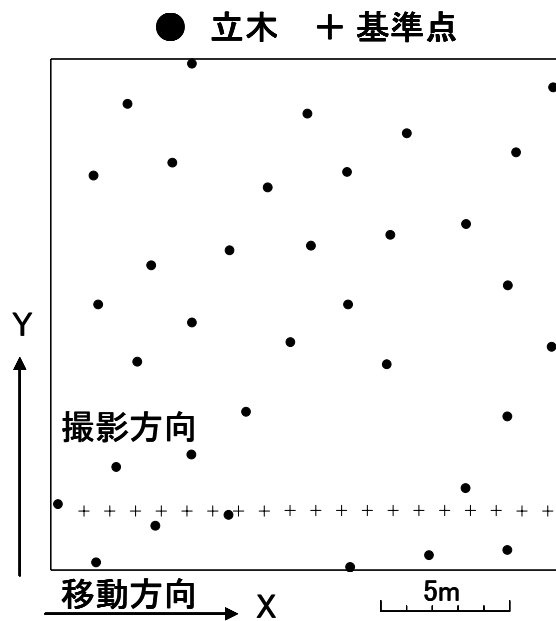


図 3-1-2 試験地の概要

基準点として、移動方向にほぼ平行に、地上高さ 2 m と 60cm に 2 本の水糸をはり、10cm の正方形の紙片から作った直角三角形で 1 m 間隔に目印をつけた。糸の起点と終点をトータルステーションで測定して最初の紙片までの距離はメジャーで測定した。撮影をより連続的に行うために、デジタルビデオ (SONY, DCR-TRV10) を使用し、測定にはその静止画像 (640×480 画素) を用いることにした。撮影は 20m を約 2 分かけて移動しながら行った。撮影された動画像から基準点を参照して約 50cm 間隔で静止画像を得て測定に使用した。各静止画像には最低でも 4 点、最高で 6 点の基準点を得ることができた。それら基準点の画素の位置をパソコン上で測定し、各画像のカメラのパラメータであるカメラ位置と傾きを求めた。

カメラの焦点距離を f ($\approx 3.3\text{mm}$)、撮影距離を D 、基線長を B として、カメラの移動方向である X 方向の誤差 σ_x と奥行き方向の誤差 σ_y は次式で評価できる。

$$\sigma_x = \left(\frac{D}{f} \right) \sigma_p \quad \sigma_y = \left(\frac{D}{f} \right) \left(\frac{D}{B} \right) \sigma_p$$

画像上の画素の読み取り精度は 0.3 程度とされ⁴⁾、これと CCD の画素の大きさ ($\approx 4 \mu\text{m}$) から σ_p は $1.2 \mu\text{m}$ である。

取得した情報は、形状モデルとして 3 次元に展開できる。3 次元モデルのフォーマットとしてはマイクロソフトが定めた X ファイルを使用した。このような公開されたファイルフォーマットを用いることによって、作成したモデルを公開されているプログラム上で簡易に見ることができる。

立木は円を 8 角形で近似した円錐台を積み重ね、頂上に円錐をおくモデルとして作成した。立木位置、胸高直径と樹高、地上部や幹の胸高直径に対する太り率や細り率を与えれば、X ファイ

ルのフォーマットにしたがった形状モデルを出力可能なプログラムを作成した。地表面は1 m四方の格子で構成され、測量によって得られた地表面から計算したDTMを与えればXファイルが作成できる。

ウ 結果

測定値とトータルステーションによる実測値との差の絶対値を誤差とした。表 3-1-1、図 3-1-3 に撮影距離別の誤差を示した。撮影距離 10m 以内では十分実用的な精度を保っているといえるが、10m 以上のところでは理論値を上回る誤差が生じている。例えば、Y 方向に最大誤差 64cm を生じた測点は、撮影距離 20m、基線長 3.5m で測定されたが、その場合の σ_Y の推定値は 14cm であり理論値の 3 倍以上の誤差が生じている。

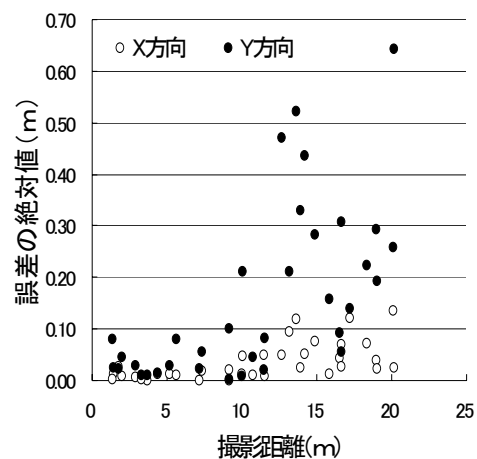


図 3-1-3 撮影距離と測定誤差

表 3-1-1 測定誤差

方向		撮影距離		全体
		10m未満	10m以上	
X	測点数	14	21	35
	最小(m)	0.001	0.009	0.001
	最大(m)	0.027	0.135	0.135
	平均(m)	0.010	0.053	0.035
Y	最小(m)	0.001	0.007	0.001
	最大(m)	0.099	0.643	0.643
	平均(m)	0.037	0.237	0.157

測定を行った森林総合研究所内のヒノキ林について、立木と地表面の形モデルを作成して出力

したものを図 3-1-4 に示す。樹高はコンパスを使ったサンプリング測定を行い、胸高直径との相関式をもとめて推定した。

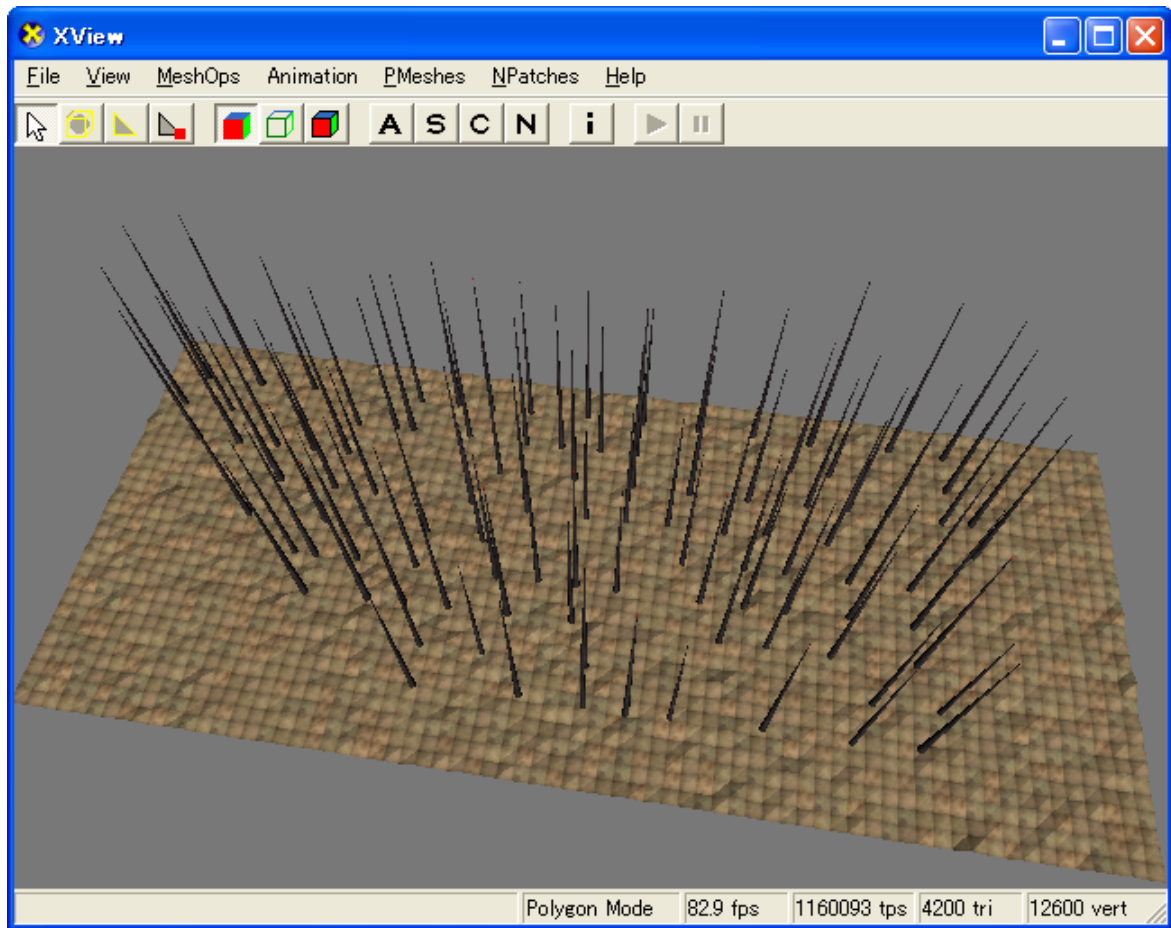


図 3-1-4 マッピングシステム

エ 考察

測定誤差の原因としては、基準点に誤差が含まれていて、パラメータの推定が正しく行われなかったことが考えられる。基準点に誤差が含まれるのは、水糸の垂下を無視して直線近似したこと、撮影時に風の影響により基準点が動いたことなどが考えられる。条件が悪い林内で精巧な基準点を設けることは困難が予測されることから、今後は、基準点にも誤差が含まれるものと仮定した誤差の調整法を検討する必要がある。

また画面の横方向である X 方向の精度はこの方法においてもセンチメートルのオーダーであり、Y 方向の精度を高めようとするれば、2 方向からの撮影が必要であることもこの測定結果から推測することができる。

ここで検討した測定法は現状では基準点の両側 10m 程度しか実用には適さないと考えられるが、ともかく、デジタル画像によって立木位置測定が系統的行えることが示せた。交差させる輪郭線を変えれば、幹の直径も測定できることは明らかであろう。

しかしながら、写真測量の本来の測定精度を十分に発揮できていない上に、立木の輪郭を測定

し、立木の個体を識別していくのはかなり煩雑な作業である。

このことを解決するために、森林画像の中から画像処理によって輪郭を識別する方法⁵⁾、さらには動画像を使って輪郭を識別する方法⁶⁾の検討も行った。特に動画像による方法はモノレールや架線集材の搬器など決められた経路を移動する移動体の上から撮影することによって自動的に立木の輪郭や位置を測定できる可能性があると考えられる。

オ 今後の問題点

デジタル画像を用いて森林の地形や林分情報を得るという作業は、20mから50m四方程度の林分であれば、基準点を作設、対話型のプログラムを使って立木の輪郭を手動測定すれば十分可能であると考えられる。この程度の面積であっても、小規模の伐採現場、森林作業の調査や、林業機械の性能調査のために必要な林分情報や地形情報は把握できる。しかし、中小規模の伐採現場のように、数ヘクタールの面域の地形情報や林分情報を入手するには、地形図の活用、航空機を用いた上空からの写真撮影やレーザースキャンのような方法を検討することが必要であろう。

カ 要約

デジタルカメラの画像を使って、立木とその直径を計測する方法について検討した。簡易な基準点を用いて、横方向への移動により一定の面域の立木位置と幹直径が計測できることを示した。画面の横方向の測定精度はほぼ理論上の誤差と一致したが奥行き方向では基準点の誤差に起因すると考えられる数十センチメートルの誤差が現れた。このような方法で取得された林分情報を3次元形状モデルとして展開して、xファイル形式で出力するプログラムを作成した。このファイル形式を読み込み可能なプログラムにより処理すれば、森林の3Dグラフィックスが描画できる。これをテレコントロールシステムのマッピングシステムとして採用した。

キ 引用文献

- 1) 田中良明、山口浩和（2001）デジタル画像の輪郭情報を利用した立木位置の測定方法、日林関東支論 53 : 197-198
- 2) 秋山実（2001）写真測量、271pp 山海堂、東京
- 3) 近津博文（1993）CCD カメラ、写真測量とリモートセンシング 32(6) : 22~24
- 4) 近津博文、中野一也（1996）ワイヤレス CCD カメラを用いた遺跡測量のリアルタイム化に関する研究、写真測量とリモートセンシング 35(4) : 18~26
- 5) 田中良明、山口浩和、吉田智佳史、岡勝、井上源基（2002）森林画像からの立木輪郭の抽出、日林関東支論 54 : 243-244
- 6) 田中良明、山口浩和、吉田智佳史、岡勝、井上源基（2003）動画像からの立木輪郭の抽出、日林関東支論 55 : 309-310

（田中良明）

2. 林分情報を用いた作業計画立案方法

ア 研究目的

テレコントロール作業では、森林の地形情報や林分情報を与えられることを前提としているが、そのような情報が利用できるのであれば、伐採搬出に先立って適切な作業計画が立案できるものと考えられる。ここではそうした作業計画の一例として間伐木の選木をとりあげる¹⁾。

間伐では、対象となる林分の各立木の大きさや形質を考慮して選木が行われるが、同時に、残される立木の分布を著しく偏ったものにしないことが求められる。目標とする伐採率になるように、いかにこれらを両立させるかが、選木の難しいところである。ここまで、人工林のデジタル画像から立木の平面位置を求める手法について検討してきた。こうした立木の位置情報を利用することによって、間伐後の立木の分布がどのように変化するか定量的に把握できるものと考えられる。ここでは、いくつかの選木法をアルゴリズムとして表現、プログラムとして実装することによってそれぞれの選木法を立木の平面分布の観点から評価することを試みた。

イ 研究方法

1) 選木の評価方法

立木の平面分布を評価する方法として、最近隣測度による方法とボロノイ領域による方法を使用した。

林分を構成する個々の立木には、それぞれに最も近い立木が存在する。際近隣の立木までの距離を各立木について求めて、林分での平均を r_1 とする。これを密度 D で立木がランダムに存在すると仮定した場合の理論上の期待値である

$$r_e = 1/(2D^{0.5})$$

で除したもの

$$R = r_1/r_e$$

が最近隣測度である。 r_1 が理論値 r_e に近づく場合、すなわち R が1程度であれば分布はランダム、1未満であれば集塊状の分布であるとされ、分布が一様になれば R は1よりも大きく、最大値は正六角形を敷き詰め、それぞれの中心に立木が存在する場合の R は2.149である²⁾。

人工林のように一定間隔で植栽される場合は、当然、この指数は1以上であるが、間伐後にこの値を高く保つ選木法が、分布を均等に保つという意味で優れた方法であると考えられる。

ボロノイ領域は平面上の任意の点 p から点 p_i までの距離が他の点 $p_j(i \neq j)$ より短い点の集合として定義される。これを立木の分布で考えた場合、ボロノイ領域は各立木の占める空間を平面に投影した領域としてとらえることができ、この領域の面積の分布が、著しく偏らないことが間伐後の立木分布に求められる。

ボロノイ領域の算定には、林分を0.1m単位の格子に分割、これに対応する整数の2次元配列を画像に見立て、コンピュータグラフィックスの円描画のアルゴリズム¹⁾で作成した。各立木から一定の刻み幅(0.05m)で同心円を次々に作成して格子位置を算定、各立木の識別番号を配列の中へ書き込む。すべての格子に識別番号が書き込まれるまで同心円を広げる(図3-2-1)。各立木のボロノイ領域から面積を算定、標準偏差を平均値で除した変動係数を評価値とした。

シミュレーションや林分への適用にあたっては、すべて 40m 四方の林分を対象としたが、最近隣測度は無限に続く領域での理論値に対する指数であるため、境界を設けることによる影響が考えられる。そのため、これらの評価値を求めるのは、林分中央の 20m 四方の領域とした(図 3-2-1)。つまり、最近隣距離の算定には全立木を使用するが、平均値と D は 20m 四方の領域で算定した。

2) 選木のアルゴリズム

検討したアルゴリズムは、ランダム法、経路法、距離法、面積法の 4 つである。ランダム法は林分からまったくランダムに指定された本数を選木するもので、一様乱数を各立木に与えて、値順にソート、値の小さなものから指定の本数を選んだ。経路法とは、選木のための経路をあらかじめ指定、経路順に立木をめぐり、3 本に 1 本というように、指定された割合でランダムに選木を行う。距離法は前述の最近隣距離の最小値を林分において求め、その対象となった 2 本の一方をランダムに選木するという操作を繰り返すものである。面積法は、ボロノイ領域の面積の小さいものから指定の本数を選ぶという方法である。これらのアルゴリズムでは乱数が必要となるが、乱数にはメルセンヌ・ツイスターを使用した³⁾。

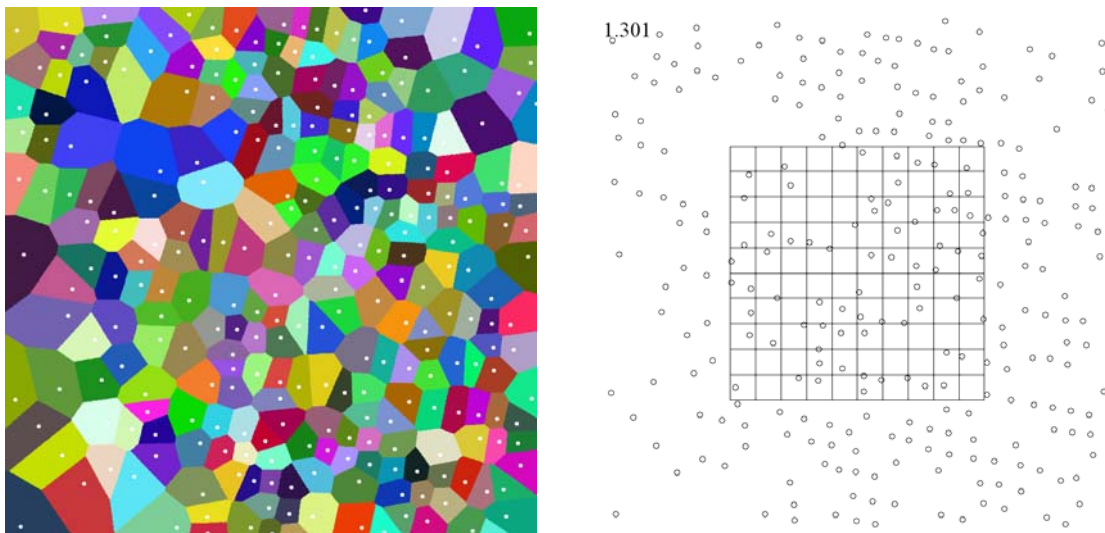


図 3-2-1 ボロノイ図と評価値の算定領域

ヒノキ林 36 年生 R=1.301

③選木のシミュレーション

それぞれのアルゴリズムの特徴を把握するためにシミュレーションを行った。40m 四方の林分を想定して、2m の格子に分割、合計 400 個の格子の中央に、標準偏差 0.1m の正規乱数を x, y 座標に与えて、立木位置とした。密度は 2,500 本/ha である。この立木からまず自然枯死や除伐として 10% をランダム法で消去、この初期状態に対して 3 分の 1 の割合となるように 120 本の選木をそれぞれのアルゴリズムで行い、残存する立木に対して最近隣測度と変動係数の算定を行った。経路法は左下隅から右へ向かい、端に達したら上に移り左へ向かうという経路である。

④林分への適用例

筑波山の国有林のヒノキ林23年生、36年生（いずれも測量当時）の林分の位置情報に対して選木を行った結果を図3-2-3、3-2-4に示す。立木密度はそれぞれ2906、1688本/haである。経路法では、シミュレーションと同様の経路を、おおよその植列に併せて手入力で与えた。伐採率は本数で33.3%であり、乱数を変えて100回の選木を行ったが、面積法では選木方法は1通りである。

ウ 結果

シミュレーションは乱数を変えて100回行った。結果を図3-2-2に示す。中央が100回の平均であり、上下に標準偏差分の横棒を示した。最近隣測度は距離、面積法の値が高く、変動係数は経路、距離、面積法がランダム法に比べて値が小さい。ばらつきを考えると両者の差は有意であると考えられる。

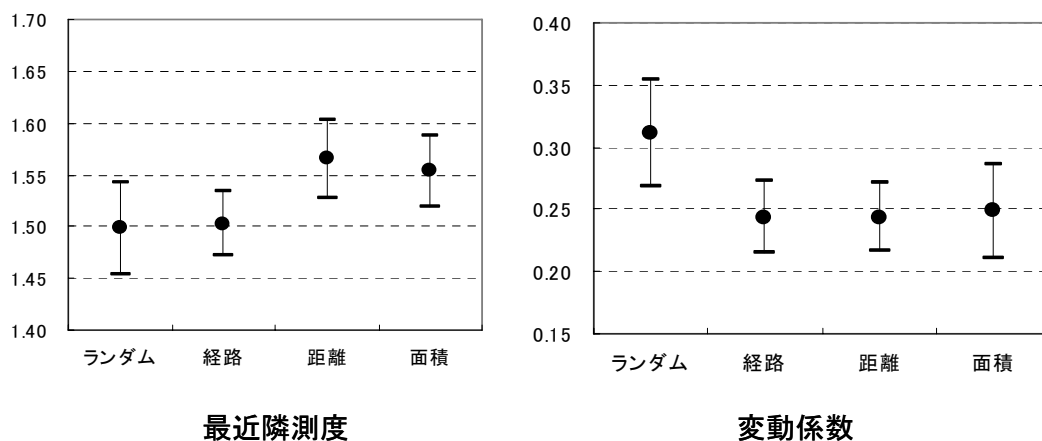
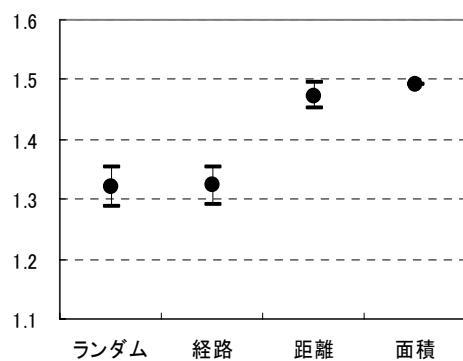
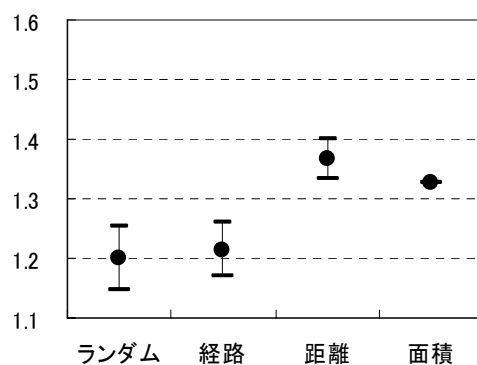


図 3-2-2 シミュレーションの結果

実際の森林への適応例の結果を図3-2-3、3-2-4に示す。最近隣測度は距離、面積法がランダム、経路法と比較して大きい。変動係数は23年生の林分でやや差が小さいが、やはり距離法や面積法の値が小さいことがわかった。

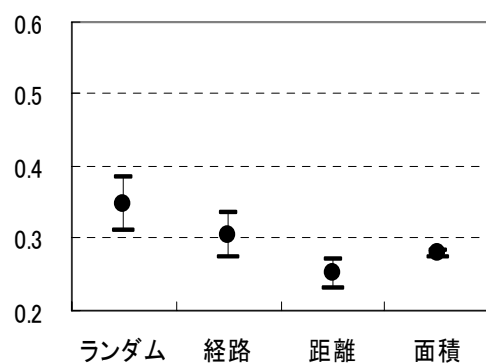


ヒノキ23年生

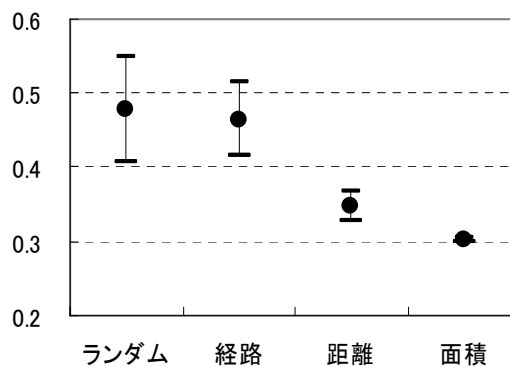


ヒノキ36年生

図 3-2-3 最近隣測度



ヒノキ23年生



ヒノキ36年生

図 3-2-4 変動係数

またランダム法によって選木した結果を、マッピングシステムで表示した例を図3-2-5に示す。

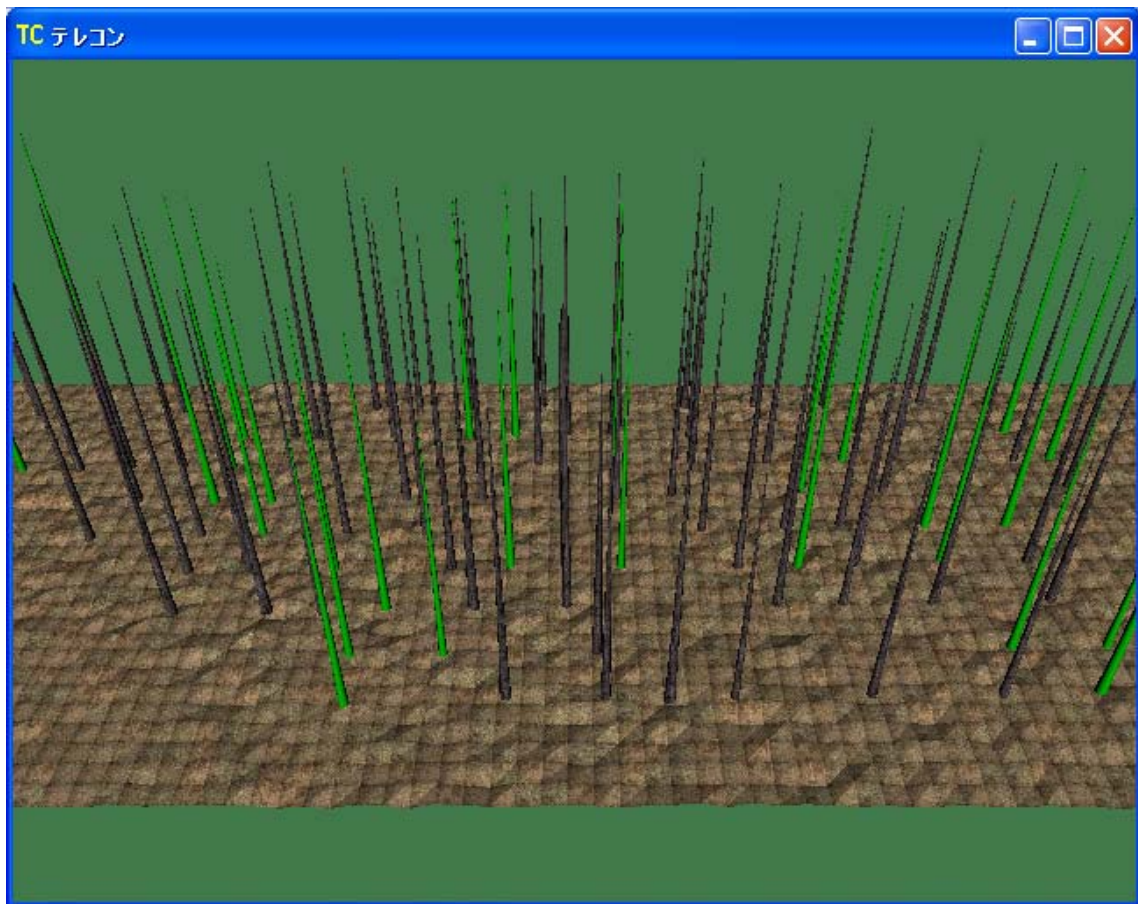


図 3-2-5 ランダム法による選木例

エ 考察

シミュレーション、適応例の両方において、位置情報をまったく考慮しないでランダムに選木を行った場合、立木の分布はランダム化、ボロノイ領域の面積もばらつきが大きくなる。それに対して、距離法と面積法では一様な分布が保たれる傾向があることがわかった。立木の分布の均等に保つという観点からは両者は優れた方法であると考えられる。適応例において、経路法がランダム法と比べて差がないのは、手入力による経路がシミュレーションのように立木配置の規則性を有していないことが原因として考えられ、現実の毎木調査で行われているように、複数の植列を含ませるなど経路に幅をもたせることが必要である。

オ 今後の問題点

ここで用いた距離法や面積法は林分の完全な位置情報を必要とするが、これらの方法が均等な分布を保つことから、立木の位置情報が得られない実際の選木においても近隣の立木間の距離を考慮することによって同様の選木が可能となることが推察される。さらに、実際の選木では立木の形質や大きさを考慮することが必要となる。切らなければならない

立木や残したい立木がどのような分布を有しているのか、あるいは、立木の大きさとボロノイ領域の関係等について今後検討する必要がある。

カ 要約

テレコントロール作業における作業計画立案の例として、間伐木選木の問題をとりあげた。残された立木が均等に配置されるような選木法を優れているとする観点から配置の均等性を評価する数値として隣近隣測度とボロノイ領域の面積の変動係数を取りあげた。4つのアルゴリズムをとりあげたが、位置情報をまったく考慮しないランダム法と比較して距離法や面積法は配置の均等性から優れていることをシミュレーションと実際の林分への適用例から明らかにした。また選木の結果はマッピングシステムを通じてオペレータに3次元グラフィックスとして表示される。

キ 引用文献

- 1) 田中良明、山口浩和、吉田智佳史、岡勝、井上源基（2004）間伐木選木のアルゴリズム、日林関東支論 56：83-84
- 2) 奥野隆史（1988）計量地理学の基礎、357pp、大明堂、東京
- 3) 奥野晴彦（2003）Java によるアルゴリズム事典、499pp、技術評論社、東京

（田中良明）

3. リアルタイム作業支援プログラムの開発

ア 研究目的

テレコントロール作業では、森林の地形情報や林分情報を与えられることを前提としているが、そのような情報が利用できるのであれば、伐採搬出に実行にともなってリアルタイムでオペレータに作業の指示を与えられるものと考えられる。ここではそうした作業支援の一例として障害物の回避を取りあげる。

ここではテレコントロール作業において、立木位置の情報と移動体の位置情報に基づいてリアルタイムでオペレータに対して障害物への接近を知らせる方法を検討するとともに、マッピングシステム、選木のアルゴリズム、障害物回避の作業支援を実装した作業支援プログラムを作成することを目的とする。

イ 研究方法

使用した移動体を図 3-3-1 に示す。移動体はこまかな凹凸をのぞいておよそ、幅 120cm、長さ 170cm、高さ 80cm であり、移動体の 3 次元形状モデルはこの大きさの直方体とした。また直方体の側面には実際の機械のそれぞれの方向からのデジタル画像をはりつけた。

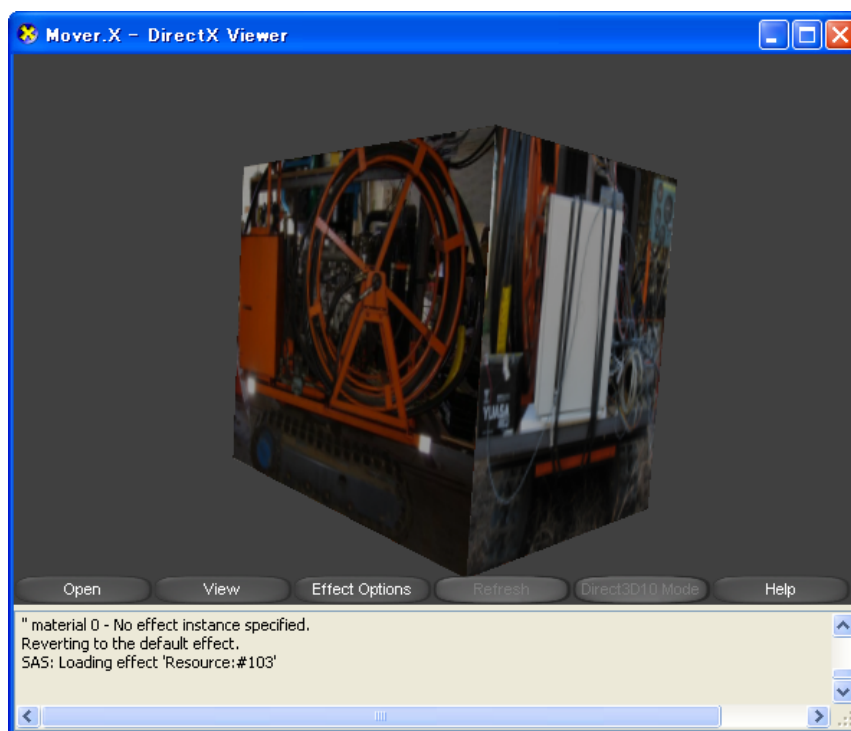


図 3-3-1 移動体

衝突の回避には障害物の位置と、移動体の位置をリアルタイムで把握することが必要である。この課題ではテレコントロールされる車両は GPS のようなリアルタイム測位は搭載されていない。かわりに、磁気方位センサーによる情報と、移動体の前進、後進移動量の情報から現在位置を推

測して、誤差が累計してきたところで立木位置から車両位置を逆算して誤差を補正する方式を採用している。移動体の前進、後進量は、コントロールシステムから与えられる信号の送信時間から推測可能なので、仮に車両が 10cm 単位で移動が行われるものとすれば、磁気方位センサーの方位角とこの単位移動量から車両の移動操作後の次の位置が推定できる。この次の位置と障害物の関係を事前にチェックすれば障害物の回避は可能になる。

この様子を示したのが図 3-3-2 である。立木の位置は円として塗りつぶされて描かれており、移動体は長方形として描かれており、三角形の頂点側が車両の前進方向である。障害物の検出は、車両の予定移動位置の境界線 ABCDA をむすぶ線上で行う。具体的には立木の描かれた画像の ABCDA を結ぶ線上のピクセルを検索してそこに立木を塗りつぶしている色が見つからなければ衝突なし、色を検出すれば衝突が予測されるということである。もちろんこうした操作は、ディスプレイに表示しなくてもメモリー上で判定できる。

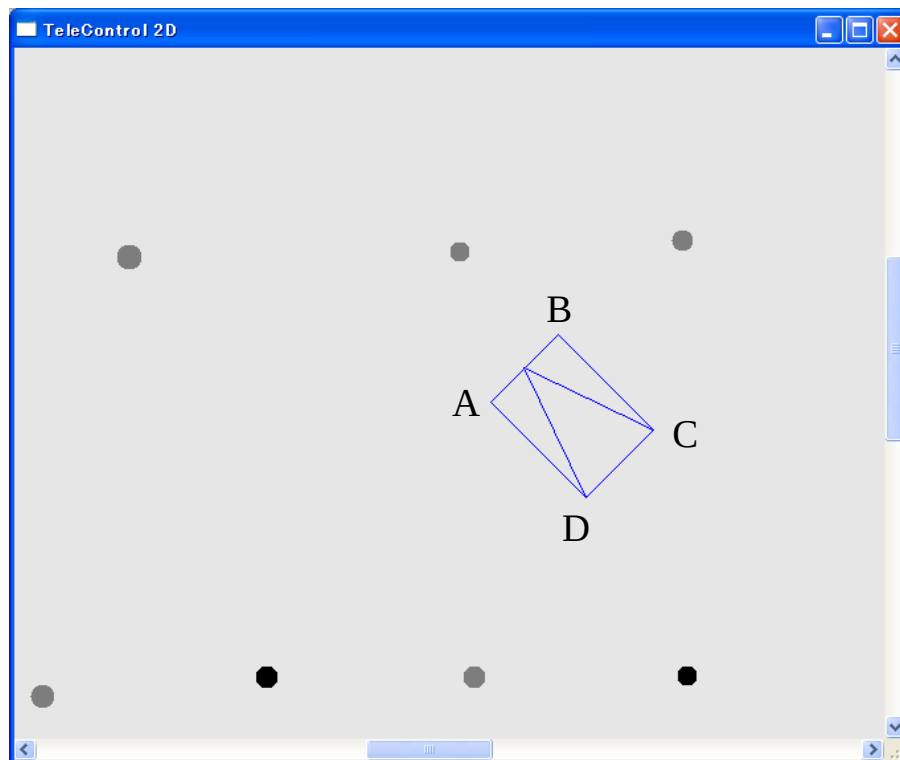


図 3-3-2 移動車両と立木位置平面図

なお、立木を塗りつぶす半径は、立木の根元の拡大や、車両位置測定の誤差を考慮して、大きくすることが望ましく、ここでは胸高直径の 2 倍の大きさの円で塗りつぶされている。

ここまで述べてきた、マッピングシステム、選木のアルゴリズム、障害物の検出を 1 つのプログラムとして実装した。本来ならばこれをさらに、コントロールプログラムと統合するべきであるが、双方のプログラムともに複雑化しているため、OS がマルチタスク可能であることを利用して、コントロールプログラムと支援プログラムはプロセス間通信¹⁾という手法を使って、連動させるものとした。

ウ 結果

検出の結果、衝突が予測されるのであれば、その移動信号は実際に機械には送信されず、移動体と立木との衝突は回避される。そのような実装例を示したのが図 3-3-3 であり、ここではビープ音による通知と、ダイアログボックスの表示により立木への接近を警告している。この実装方法では、オペレータが OK ボタンをクリックするまでは、アプリケーションのすべての実行がブロックされる。

作成したプログラムには伐倒木の表示、非表示の切り替えのほかに、3D グラフィックスの視点を鳥瞰図に切り替えたり、移動体に積載されたカメラとほぼ同じ視点に切り替えたりすることが可能である。デフォルトは移動体を後方から自動的に追いかけていく視点となっている。それぞれの様子を図 3-3-4～3-3-6 に示す。

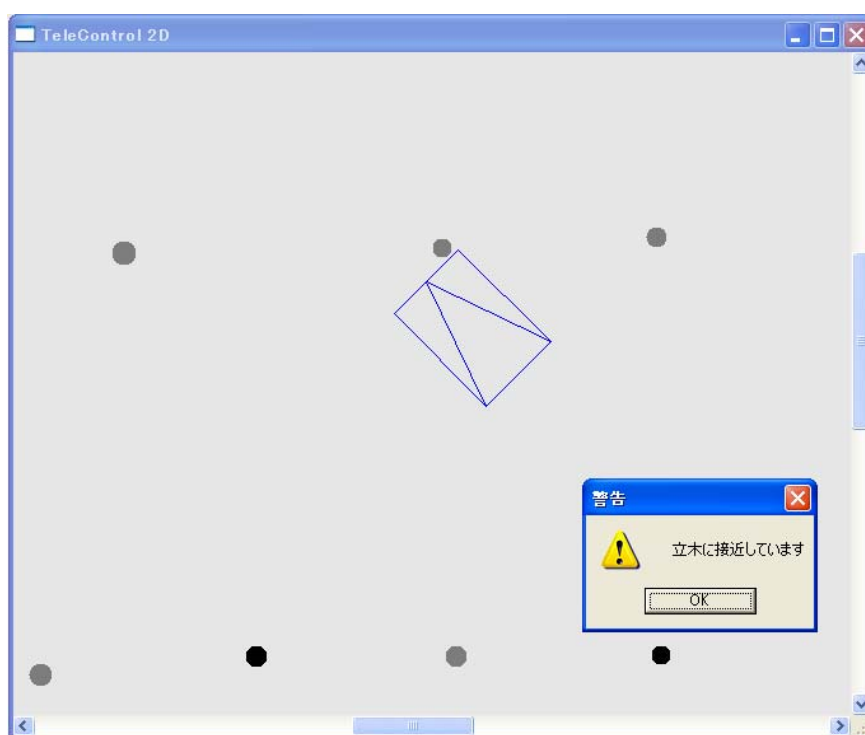


図 3-3-3 衝突の検出

このプログラムは、プロセス間通信を用いて、コントロールプログラムから仮の移動操作の命令がくるのを常に監視している。そしてその仮の移動操作の命令が送られてきたときに衝突の検出を行い、衝突がないと判定すればコントロールプログラムに移動操作が可能であることを伝えて、コントロールプログラムは実際の移動命令を移動体に送信する。同時に、支援プログラムはグラフィックスの位置と視点を更新する。図 3-3-7 には衝突の検出の様子をしめす。

選木のアルゴリズムは、立木の位置情報のほかいくつかのパラメータを入力しなければならないので、F1 キーの押し下げにより通常の 2D 表示画面に切り替えて操作を行う。もちろん実際のカメラ画像から判断して伐倒木を変更するようにすることは可能であり、変更後に、選木をやりなおすこともできる。

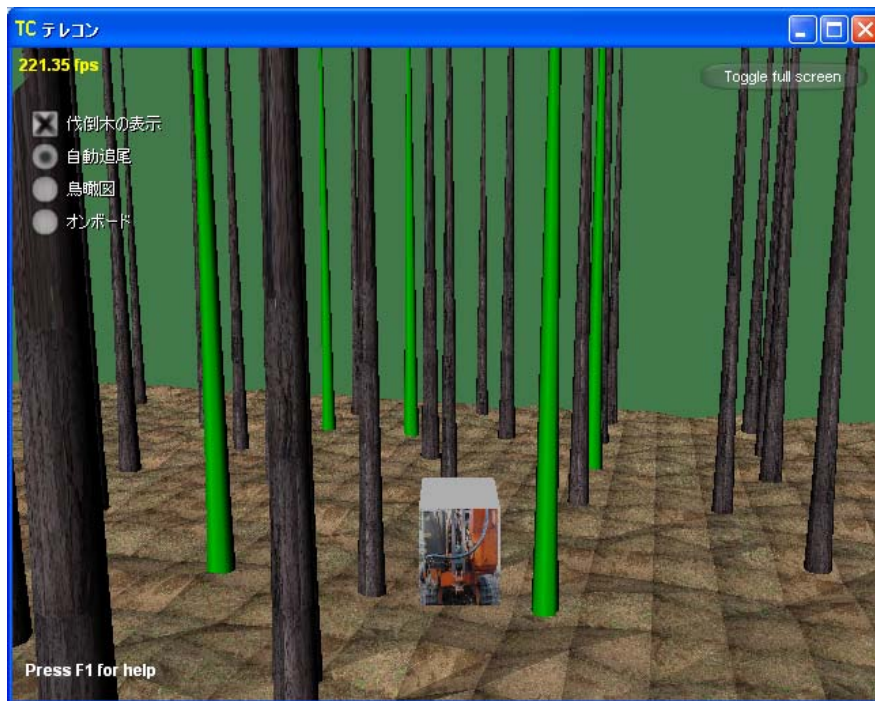


図 3-3-4 自動追尾による視点

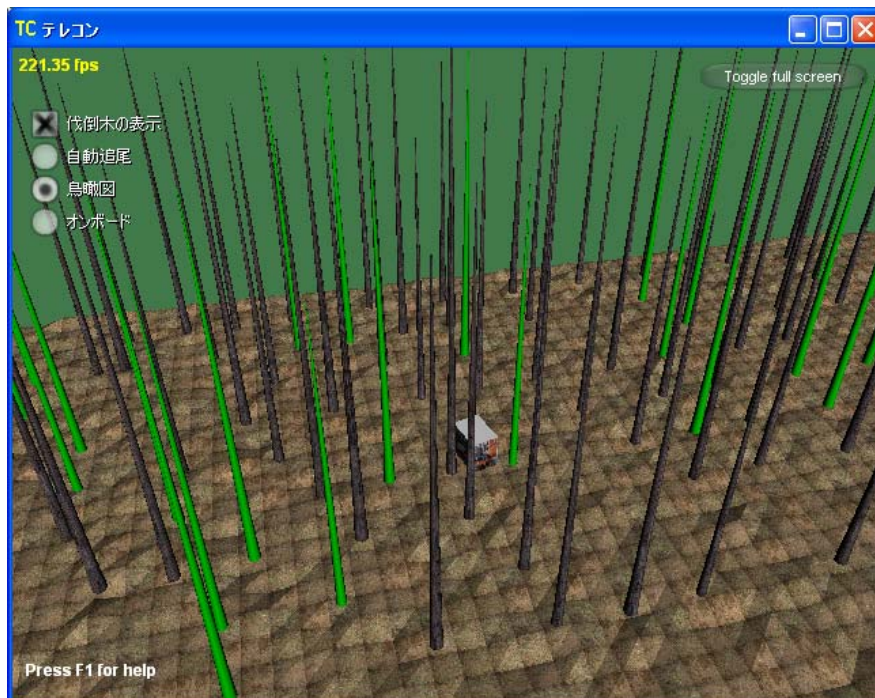


図 3-3-5 鳥瞰図による視点

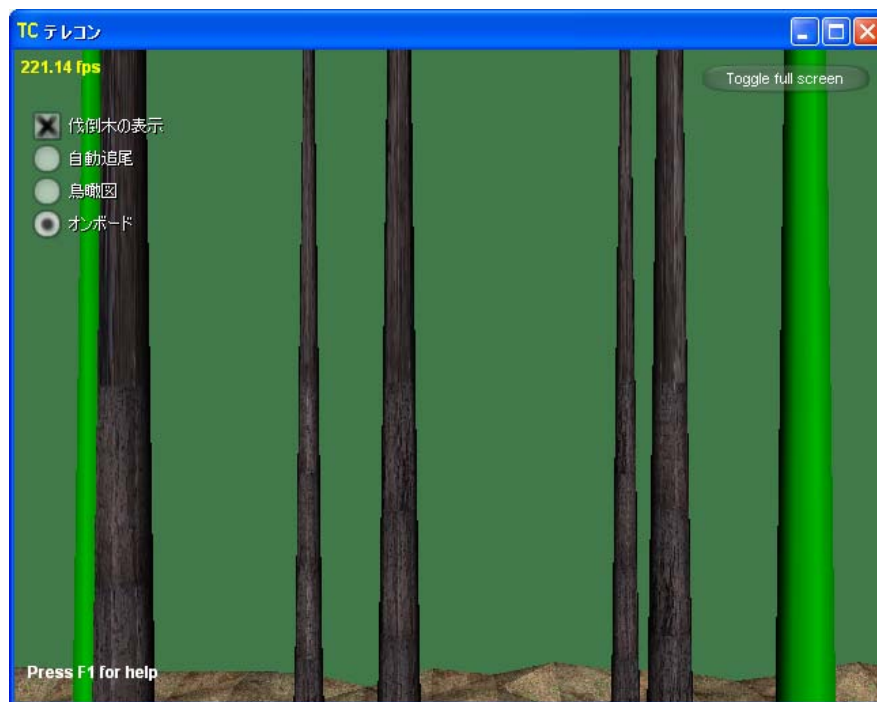


図 3-3-6 オンボードカメラの視点

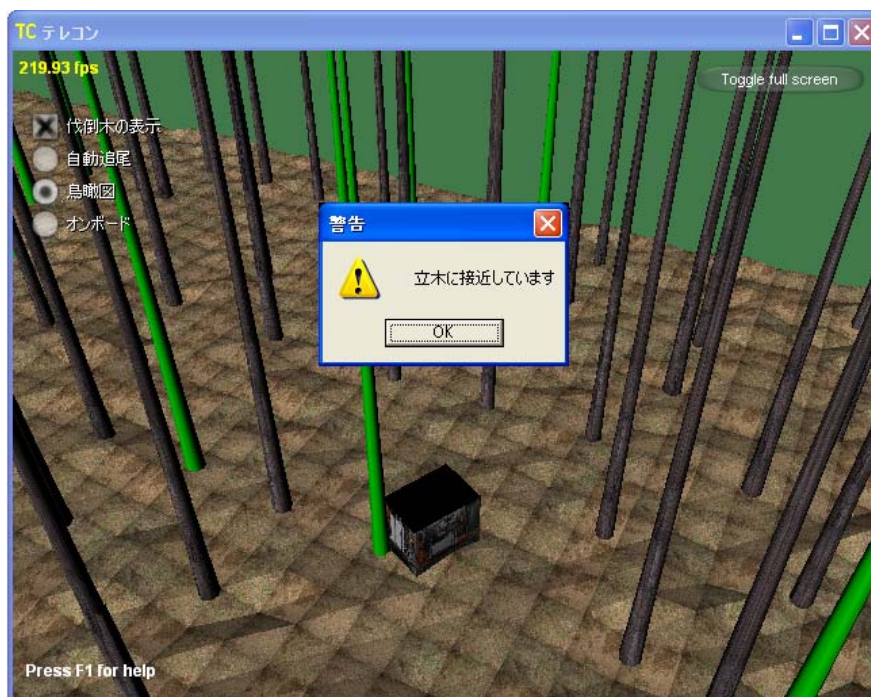


図 3-3-7 衝突の検出

エ 考察

障害物の回避は、立木位置の測定精度、移動体の位置測定精度に影響されるが、森林内の移動は低速度であるために、GPS を用いない擬似的な測位システムであっても十分に可能であると考えられる。また、コントロールシステムと支援システムのプロセス間通信は、通信のプロトコルさえ定めておけば、それぞれのプログラムは別々に改修や改良が行えるという観点から妥当であると考えられる。

オ 今後の問題点

この研究の前提は、森林の林分条件や地形条件を事前に把握しておくというものであった。このような前提は小規模の自営林業、高品質材の生産のための集約的施業では可能であっても、一般的な素材生産ではコスト的に厳しいものであろう。一方、この5年間の予期できなかった成果として挙げられることは、この研究期間においてもセンサーやコンピュータ等の性能が向上しており、すべての条件を事前に把握しなくても、機械に備え付けたセンサー類で作業を進めながら周囲の状況を把握していくことができることが明らかになったことである。そのため、今後の機械化施業においては、事前には大まかな地形情報などを林業機械に与えておき、機械周辺の条件を測定しながら作業を進めていく方法が可能となるであろう。ここで示した障害物の回避の問題であっても林業機械周辺の情報をもとにして適切な経路選択が行えるように改良を行うことが必要である。

カ 要約

立木位置の情報と移動体（林業機械）の位置情報に基づいて、リアルタイムでオペレータに対して障害物への接近を知らせる方法を検討した。具体的には、3D グラフィック上で作業実行中の立木、移動機械の状況をリアルタイムで鳥瞰表示し、障害物接近を警告音で知らせるプログラムを開発し、リアルタイム支援の一つとして障害物の回避が可能であることを示した。最後にマッピングシステム、間伐木選木のアルゴリズム、障害物回避を1つのプログラムとしてまとめ、プロセス間通信を用いることによってコントロールプログラムと統合した。

キ 引用文献

- 1) 北山洋幸 (2002) Win32API システムプログラミング、Java によるアルゴリズム事典、カットシステム : 197-244

(田中良明)

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として刊行するものである。

ISSN 1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 10

「林業機械のテレコントロールシステムの開発」

発 行 日 平成 18 年 9 月 1 日

編 集 ・ 発 行 独立行政法人 森林総合研究所

〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1 番地

電話, 029-873-3211 (代表)

印 刷 所 いばらき印刷

