

岐阜大学大学院博士學位論文

高速・軽量な枝打ちロボットの研究開発

Research on high speed and light weight pruning robots

2014年9月

工学研究科

生産開発システム工学専攻

石樽 康彦

目次

1	序論	1
2	研究背景と目的	2
2.1	研究背景	
2.1.1	日本の林業の現状	
2.1.2	枝打ち作業	
(1)	枝打ちの意味	
(2)	木材価格と枝打ち	
(3)	枝の巻き込みと節の形成	
(4)	枝打ちに関する幹の変色	
(5)	枝打ちと病虫害予防	
(6)	枝打ちの作業技術	
(7)	枝打ちの器具	
(8)	枝打ちの作業工程	
2.1.3	アンケート調査	
(1)	森林事業に関するアンケート	
(2)	林業技術に関するアンケート	
(3)	小規模育林業の聞き取り調査	
2.2	研究目的	
3	外部技術・先行研究	16
3.1	動力枝打ち機の導入と開発	
3.1.1	自動枝打ち機「やまびこ」	
(1)	製品概要	
(2)	動力枝打ち機の普及	
(3)	自動枝打ち機の作業効率	
(4)	自動枝打ち機の使用時期と材の異常変色	
(5)	自動枝打ち機の枝打ち品質	
3.1.2	動力挟み型枝打ち装置	
3.1.3	木登り枝打ちロボット WOODY-1	
3.1.4	ワシントン椰子の枝払い機	
3.1.5	枝打ちロボット MS-2	
3.1.6	自走式枝打ち装置	
3.2	昇降機構	
3.2.1	ノーバックドライブ機構を利用した垂直昇降移動機構の開発	
3.2.2	円筒及び円錐形の柱を昇降するロボットの設計	
3.3	切断機構	

- 3.3.1 枝打ちロボットのための切断機構の動作計画アルゴリズム
- 3.3.2 ロボットによる林業用枝打ちシステムに関する研究
- 3.3.3 ルーター刃による枝打ち機の試作
- 3.3.4 電動式小型チェンソーによる枝打ち機の考案
- 3.4 技術的課題

4 枝打ちロボットの開発

31

- 4.1 目標仕様
- 4.2 試作した枝打ちロボットの概要
- 4.3 軽量化
 - 4.3.1 昇降方法の原理
 - 4.3.2 設計コンセプト
 - 4.3.3 三次元モデル解析
 - 4.3.4 自重を利用した昇降機構
- 4.4 高速化
- 4.5 姿勢調整機能
 - 4.5.1 コンセプト
 - 4.5.2 設計目標
 - 4.5.3 シミュレーション
 - 4.5.4 試作した機体姿勢調整機構
 - 4.5.5 制御法
 - 4.5.6 評価実験
- 4.6 枝噛み防止機能
 - 4.6.1 枝噛みの原理
 - 4.6.2 予備実験
 - 4.6.3 直線切削の力の釣り合い
 - 4.6.4 円軌道切削の力の釣り合い
 - 4.6.5 評価実験
- 4.7 省電力化
 - 4.7.1 切断機構の設計
 - 4.7.2 ガイドバーの摩擦低減
 - 4.7.3 省電力駆動法のコンセプト
 - 4.7.4 評価実験

5 枝打ち実験

65

- 5.1 遠隔操作システム
 - 5.1.1 機体降ろし機構
 - 5.1.2 キックバック防止機構
 - 5.1.3 能動車輪
- 5.2 環境調査

5.2.1 樹木調査	
5.2.2 枝調査	
5.3 屋内実験	
5.4 屋外実験	
6 結論	76
6.1 課題解決	
6.2 今後の展開	
本論文に関連する発表	77
謝辞	80
参考文献	81
略語一覧	84

図目次

- 図 1 林業就業者数及び高齢化率の推移
- 図 2 労働災害発生比率
- 図 3 森林施業に要する経費の割合
- 図 4 枝の巻き込みと枝打ち痕
- 図 5 死に節と生き節
- 図 6 トビクサレ
- 図 7 目的に応じた枝の切断位置の一例
- 図 8 枝打ちの器具
- 図 9 枝打ちの目的
- 図 10 購入の際に重視する点
- 図 11 枝打ちロボットに対する不安
- 図 12 枝打ちに使用される道具
- 図 13 保有しているチェンソー
- 図 14 ツリー・モンキー
- 図 15 枝打ちロボット 439
- 図 16 自動枝打ち機「やまびこ」
- 図 17 林業機械の普及台数
- 図 18 固体あたりの枝打ち回数
- 図 19 枝噛み 1 回あたりの回避時間
- 図 20 動力挟み型枝打ち装置の構成図
- 図 21 WOODY-1
- 図 22 ワシントン椰子の枝払い機
- 図 23 枝打ちロボット MS-2
- 図 24 自走式枝打ち装置
- 図 25 垂直昇降移動機構
- 図 26 Pobot V2
- 図 27 エンドミルによる切断機構
- 図 28 ルーター刃による切断機構
- 図 29 ルーター刃による切断機構
- 図 30 電動チェンソー
- 図 31 開発したロボットの外観
- 図 32 概略図
- 図 33 ぶり縄を使った木登り
- 図 34 昇降機構(実験機)
- 図 35 能動輪を持った昇降機構のモデル図
- 図 36 必要な摩擦係数
- 図 37 昇降機構
- 図 38 操舵機構の構成

- 図 39 操舵角度
- 図 40 昇降・切替実験
- 図 41 幹径の変化による姿勢変動
- 図 42 姿勢調整機構のモデル
- 図 43 4 節閉リンク機構
- 図 44 リンク長さと姿勢の関係
- 図 45 幹径と関節角度の関係
- 図 46 幹径とタイヤ姿勢の関係
- 図 47 姿勢調整機構
- 図 48 姿勢調整制御ブロック線図
- 図 49 外観
- 図 50 実験の様子
- 図 51 細りを持つ円錐柱体
- 図 52 実験結果
- 図 53 枝噛み
- 図 54 枝噛み防止機構のコンセプト
- 図 55 ガイドバーの構成
- 図 56 エンジンチェンソー装着
- 図 57 実験環境
- 図 58 直線切削
- 図 59 円軌道切削
- 図 60 枝の撓み
- 図 61 枝径と必要な力の関係
- 図 62 環状実験装置
- 図 63 実験結果
- 図 64 枝切断機構の構成
- 図 65 減速比の効果
- 図 66 ガイドバーの試作品
- 図 67 実験環境
- 図 68 起動電流
- 図 69 試作品の摩耗，変形具合
- 図 70 制御法の概要
- 図 71 実験装置
- 図 72 定格出力の実験
- 図 73 省電力の実験
- 図 74 システム構成
- 図 75 リチウムイオンバッテリー
- 図 76 機構原理図
- 図 77 枝選別・キックバック防止機構
- 図 78 摩耗度試験

- 図 79 チューブレスタイヤの構成
- 図 80 枝調査の様子
- 図 81 採取した枝
- 図 82 ロボットの状態
- 図 83 チェンソーモーターの状態
- 図 84 屋外実験
- 図 85 ロボットの追従性
- 図 86 切断機構の追従性
- 図 87 チェンソー駆動系の追従性

表目次

表 1	標準枝打ち功程
表 2	枝打ちのスケジュール
表 3	自動枝打ち機「やまびこ」の製品仕様
表 4	林分概況
表 5	作業時間の測定結果
表 6	傷と変色状況
表 7	枝打ち作業評価
表 8	WOODY-1 の仕様
表 9	ワシントン椰子の枝払い機の仕様
表 10	MS-2 の仕様
表 11	外部技術の比較
表 12	技術的課題
表 13	開発目標仕様
表 14	開発したロボットの構成
表 15	重量配分表
表 16	3DM-GX3-25 の仕様
表 17	エンジンチェンソー用ガイドバーの仕様
表 18	枝径と切り残しの関係
表 19	摺動型・試作品・市販品の製作仕様
表 20	リチウムイオンバッテリーの仕様
表 21	チューブレスタイヤの仕様

1. 序論

日本は国土の 65%以上が山林である。林業分野の従業者は、減少と高齢化が進んでおり、人手による枝打ち等の重労働が年迫う毎に困難となってきた。このため放置される森林が多数あり、国土の荒廃を招いている。林業の再生には、木材の利用促進と木材価格の向上が必要である。枝打ち作業は、生枝では節のない優良材を作り木材の価値を高めるもとであり、枯れ枝ではスギノアカネトラカミキリの食害の低減効果が大きく、森林の環境整備にも不可欠な作業である。しかし、林業は製造業と比較して 10 倍程の労働災害率であり、森林作業における安全性への取り組みが遅れている。この森林作業の安全と効率化には、作業支援するロボット技術の開発が必要である。しかし、林業分野への応用例は少なく、森林の適切な整備・保全を通じて、国土の保全、水源のかん養、地球温暖化防止、生物多様性保全、木材生産など森林の有する多面的機能の持続的発揮を確保でき、安全で安心な国づくりにより、国民生活の向上に貢献する。豊かな森林が安全な日本と活気ある林産業を維持する、そのための、ロボット技術の開発が求められている^[1]。とりわけ、枝打ちは良好な森林環境を保ち、良質な木材の生産に貢献する重要な作業であるが、高所に上るため危険度も高い。一方で木材生産の効率化の観点から枝打ち作業の効率化が課題であり、従来の人手作業よりも高速に枝打ち作業のできるシステム開発が課題となっている。そこで、本研究では小型・軽量かつ汎用性の高い枝打ちロボットを開発し、人手に替わり利用しても十分に効率的な枝打ち作業が実現することを目的とする。

可搬性に乏しく軽量化であること。作業速度が遅く高速であること。幹の損傷防止と残枝長の最短など高品質な枝打ちであること。枝噛みの影響を受けないこと。省電力化であること。以上の 5 項目を本研究テーマの課題とし、これら諸課題について機構と制御法を研究開発した。自重を利用した昇降方式と操舵機能を有した能動輪による直動昇降と螺旋昇降の切り替えを実現し軽量化と高速化を実現し、機体姿勢調整機構と樹木の軸芯とロボットの中心軸を一致させる制御法の考案により高品質な枝打ちを実現した。そして、枝噛み防止機構とセンサーの省電力化駆動の制御法の考案により枝噛み問題の解消と省電力化を実現した。これらを搭載した遠隔操作型枝打ちロボットを開発し屋外実験でその有効性を確認することができた。

本論文は人手作業並みに確実な枝打ちを実現するための手法について章立てて述べ、第 1 章は、本研究の概要について述べる。第 2 章は、研究背景として国内林業の状況と枝打ち作業に着目した本研究の目的について述べる。第 3 章は林業機械の現状と柱体昇降機を含めた枝打ち作業に関連する先行研究の概要と問題点を列挙し、本研究で解決すべき技術的課題について述べる。第 4 章は、人手に替わり利用しても十分に効率的な枝打ち作業を実現するための課題解決の手法について述べる。第 5 章は、試作した遠隔操作型枝打ちロボットの作業環境の調査と枝打ちの作業効率や従来機の課題解決の検証実験について述べる。第 6 章は、本研究で得た知見や課題について述べ、本論文のまとめとする。

2. 研究背景と目的

本章では研究背景として国内林業の状況と枝打ち作業に着目した本研究の目的について述べる。人手による作業を機械化するため実態を把握する必要から、枝打ち技術の体系的な基礎理論と全国の森林組合を対象としたアンケート結果について触れる。

2.1. 研究背景

2.1.1 日本の林業の現状

日本は国土の 65%以上が森林である世界有数の森林大国である。国土の森林には天然林(天然生林:自然の推移に委ねた森林)と人工林(人工造林:人為的な方法により造成した森林)があり、人工林率は 41%である。戦後植林されたスギ・ヒノキを中心に利用可能な資源が充実しつつあり、10 年後には 50 年生以上の齢級が人工林面積の 60%を超えると見込まれている。しかしながら、木材自給率は近年増加傾向にあるものの約 23%にしか過ぎない。機械化の遅れや林業従事者の高齢化(図 1)などに加え、例えばスギの山元立木価格はピークの 7 分の 1 となるなど、国産材の価格の下落傾向による長期的な林業採算性の悪化や、欧州の森林国と比較し林業コストが著しく高いなどを背景として、森林の整備や木材の生産・加工を担う林業・木材産業は、大変厳しい状況にたたされている。この状況下、森林所有者の経営意欲の低下に伴う林業生産活動の停滞などにより、多くの森林が放置され荒廃が進んでいる。特に 90 年代後半からの木材価格のいっそうの低迷は、皆伐した後の、「植栽・保育・伐採」を繰り返す日本の従来型育成林業が成り立たない状況にある^[2]。

森林は貴重な再生可能資源であり、国土の保全、水源の涵養、地球温暖化防止等の多面的機能の発揮を通じて、国民が安全で安心して暮らせる社会の実現に貢献するとともに、木材等の林産物の供給源として地域の経済活動と深く結びついている。森林がこれらの機能を維持するためには持続可能な林業経営が求められ、経営の効率化、低コスト化が課題である。素材生産性の向上、労働強度の低減及び労働安全性の改善(図 2)のため高性能林業機械が実用化され導入が進められている。また、導入により若年労働者の参入を促進し林業の活性化に不可欠な手段ともなっている。しかし、伐採・造材・搬出・運搬といった一連の作業では素材生産の効率化が進んでいるが、林業作業の一部に過ぎず生産の低コスト化が十分ではない。森林施業にかかる経費を岐阜県が算出しており、育成にかかるものが 6 割、伐出にかかるものが 4 割を占めており、なかでも育成段階の植栽、下刈り、枝打ちなどの経費の占める割合が高く(図 3)、林内作業システムに応じた高性能林業機械の導入を進める必要がある。従来の自動枝打ち機は、自重で滑り落ちないようにするために能動車輪部を強く樹幹に押し付ける機構や抱きつき機構があるため重量化しており、急斜面での可搬性に極めて乏しい。さらに、枝がチェーンソー等のガイド板を噛む枝噛みがしばしば生じ、枝噛みが生じると作業者は樹に登って直すことになる。また、枝打ちを行わない区間も螺

旋昇降であるため作業速度が遅い。これらの理由により、多くの森林組合では十分に利用されず放置されている。人工林の手入れの 1 つである枝打ちは、計画的かつ適切に行うことで、節の無い高付加価値な木材の生産が可能となる。さらに、枝打ちにより森林が健全化し、風水害や土砂災害からの生活環境保全、生物多様性の保全、多様な自然環境や豊かな水資源の保全など多くの利益をもたらす。このように、枝打ちを行うことは、林業の活性化のみならず、地球温暖化防止への貢献へと繋がるのである。このような節のない優良材を作り木材の価値を高め森林の保育でもある枝打ち作業は、森林の環境整備に不可欠な作業である。しかし、大変危険を伴う作業であるとともに高齢化や採算がとれない重労働に対して、多くの林業従事者は人手による枝打ち等を控える状況が起きている。このような現状を踏まえつつ、高齢者でも急斜面で可搬でき、高速作業する枝打ちロボットの開発は必要であり、また需要は高まっていると考えられる。枝打ちロボットを導入することで、生産性の向上、省力化、労働強度の軽減のみならず労働安全性の改善、機械化による林業労働の魅力づくりによる若年労働者の参入を促進し、持続可能な森林づくりへの貢献が期待される。

これまでの枝打ち機の昇降方法には、車輪による螺旋昇降、車輪による直動昇降及び、把持機構による直動昇降に大別ができる。しかし、実用化されているのは螺旋昇降のみである。新しい技術開発は 2～3 の研究機関で実施されているが、新しい原理による昇降方式は検討されておらず、実用化には程遠い。また、従来機では、自重で滑り落ちないようにするために能動車輪部を強く樹幹に押し付ける機構や抱きつき機構があるため重量化しており、急斜面での可搬性に極めて乏しい。さらに、枝がチェーンソー等のガイド板を噛む枝噛みがしばしば生じるが、その対策は何ら示されていない。また、直動昇降か螺旋昇降のいずれかであるため作業速度が遅い。

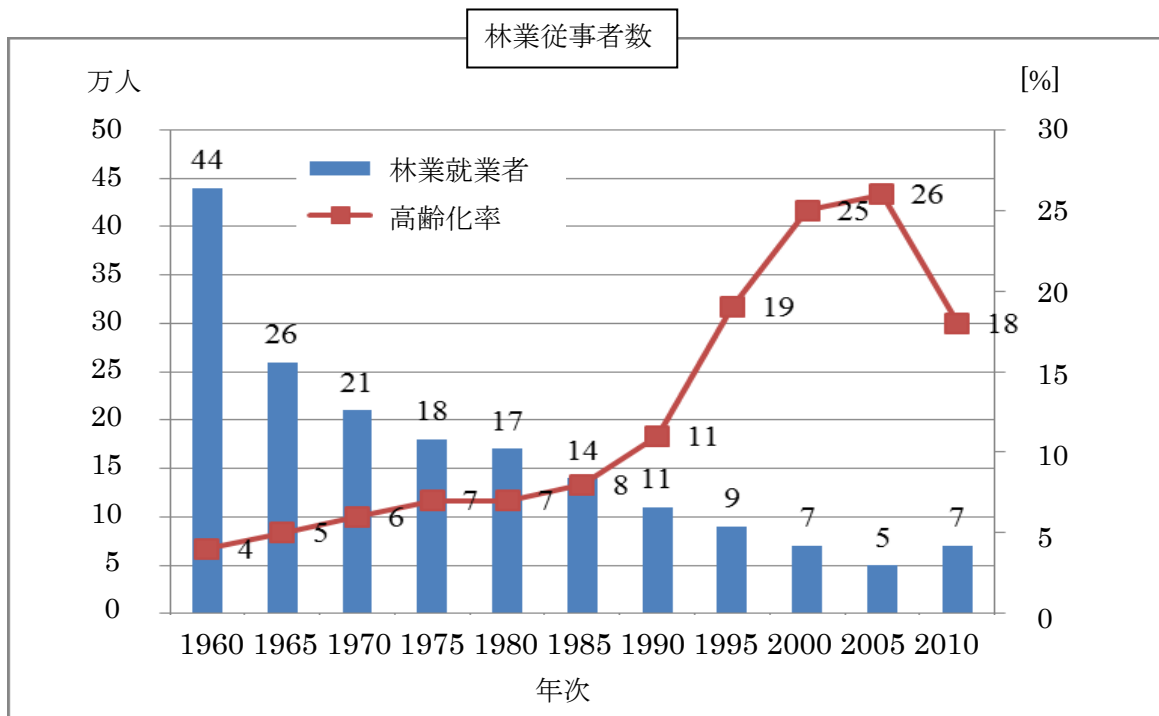


図 1 林業就業者数及び高齢化率の推移^[2]

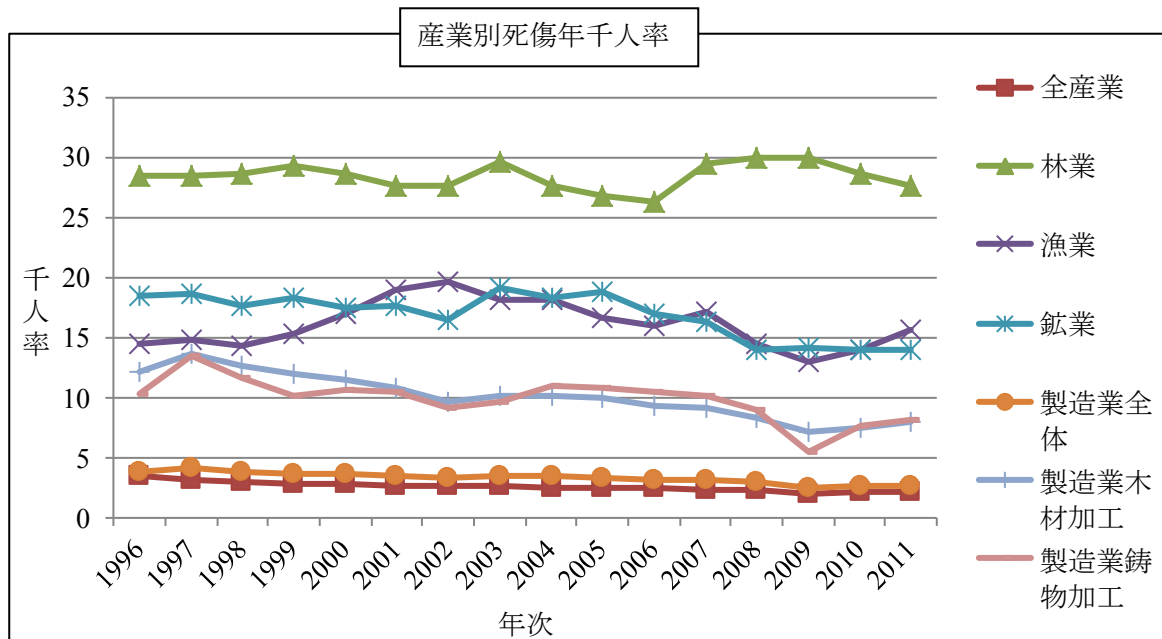


図2 労働災害発生比率^[3]

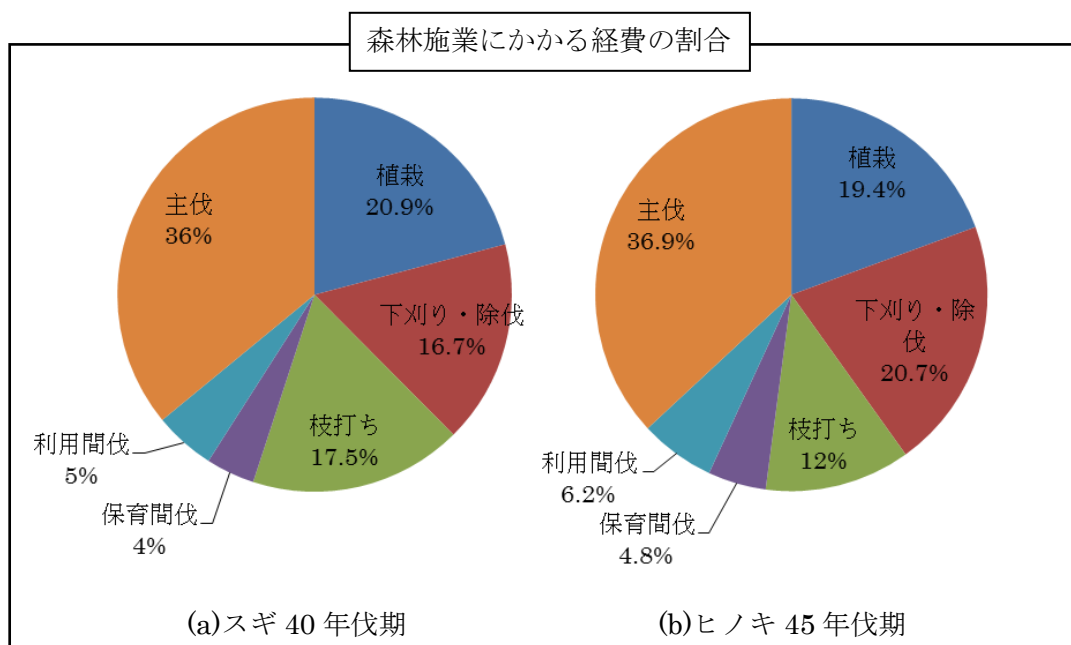


図3 森林施業に要する経費の割合^[4]

注 1) 従来の伐期設定での試算に基づく

注 2) 育林経費は補助金と相殺していない

2.1.2 枝打ち作業^{[5][6]}

ここでは、藤森隆郎氏著書「枝打ち-基礎と応用-」を引用し、枝打ち技術の基礎理論について述べる。枝打ちは造林技術の一つとして古くからあるものである。日本には数百年の枝打ちの歴史があるが、枝打ち技術を体系的な理論として確立されたのは40年くらい前からである。

(1) 枝打ちの意味

枝打ちとは林業における保育作業の一つで9月中旬から11月下旬と3月中旬から4月上旬頃が最も適した時期とされている。一般的には目的に応じて枯れ枝、または生枝を幹の付け根の付近から除去することをさし、その主な効果には節の長さを制御でき、死節の形成を防ぐことができる。また単木生長を抑制でき林分の固体サイズや年輪幅、樹幹形の頻度分布や偏差を調節することができる。そして、木材の材質は遺伝的性質と傷などの欠点の有無を除くと、無節性の高さや年輪幅の均一性などによって決まり、良質な木材を合理的に生産ができる。さらには良質材の生産に役立つだけでなく、枝打ちをすることによって多くの利益を森林にもたらす。若齢段階の林内の光不足を改善し、下層植生の欠乏を防ぐことで土壌保全に役立つ。また、枯れ枝から幹に侵入する穿孔虫などの害虫被害の防除、そして、林内の歩行と見通しが良くなることで、林内作業性と安全性の向上がある。このほかに条件付で雪圧害または冠雪害の被害軽減や山火事の樹冠火への拡大軽減の効果などもある。

(2) 木材価格と枝打ち

枝打ちをすることで節は樹心から一定距離に収まり、挽き材面に表れる節の数を減らし、節の直径を小さくすることができる。特に、材の大きな欠点となる死に節の発生を防ぐことができる。死に節は、材に穴が開く抜け節の原因となるため、商品価値を著しく下げる。また、幹の直径成長は、生きている枝の付いている部分（樹冠）で大きく、それから離れるほど小さくなる。そのため、計画的に枝打ちを行うことで、年輪幅のそろった材を生産することができる。枝打ちは、早く樹冠を上方へ移行させて樹冠材の量を少なくする。樹冠材は枝下材より50%くらい比重が小さく材価が低い。そのため、枝打ちにより商品価値の高い枝下材を多くする効果がある。

有名林業地や昔から枝打ちを行っていた地方では、買い手側に認められ、丸太が高く取引される。長期的な枝打ち作業の克明な記録が、その林分の材質を判断するための重要な役割を果たす。岐阜県では、枝打ちの記録が公的に記録され、県の方針に沿った枝打適期が知らされるとともに、丸太の販売にあたっては枝打歴が保証されるようになっている。このように長期的に管理された枝打ちを行うことで、材質の信頼性を高め丸太の価格を上げることにつながる。

(3) 枝の巻き込みと節の形成

枝や葉は成長点近くにある組織から発生する．そのため枝の中心にある髄は幹の髄とつながっている．樹木の幹が太くなるにつれ，枝は元の方から幹の中に包み込まれて節となる(図4参照)．枝が生きているうちに幹に包み込まれた部分を生き節といい，枝が枯れてから幹に巻き込まれた部分を死に節という．生き節は成長過程で木部と結合するが，死に節は樹皮を巻き込みながら成長するため木部と結合できず，抜け節として節が抜け落ち木材に穴が開いてしまう原因となる(図5参照)．

枝打ちから年輪平滑までの長さには残枝長さが関係しており，短いほど平滑になるまでの年数がかからないということになる．年輪平滑にならないと表面に節枝痕が残ることになる．



図4 枝の巻き込みと枝打ち痕



図5 死に節(左)と生き節(右)

(4) 枝打ちに関する幹の変色

幹に傷をつけたり，強い打撃を与えたりすると，その周辺の材に変色が発生する．これは傷の刺激により化学物質の合成と変化が起こるとともに，細胞の壊死と細胞中への物質沈澱が生じるため，材が着色する現象である．そのため，枝打ちの際に枝の付け根の盛り上がっている部分（枝隆）を傷つけたり，樹皮を剥がしたりすると変色が発生する．

(5) 枝打ちと病虫害予防

病虫害予防のために最も評価をを得ているのはスギノアカネトラカミキリの被害から主要な生産部分を守ることへの枝打ち効果である．スギノアカネトラカミキリは枯れ枝に産卵し，幼虫は枯れ枝から幹に穿孔する．この幼虫の食害部から変色，または腐朽が生じ，図 6 に示すような幹の症状はトビクサレと呼ばれ大きな損害となる．幹の主要な生産部分に枯れ枝が生じないように，または枯れ枝が残らないように所定の高さまで枝打ちをすることで被害を回避することができる．なお，枝打ち後の残枝長さを大きくすると，枯れ枝を残したことと同じになるので，できるだけ短く，幹に傷をつけないように丁寧に枝打ちすることが大切である．残枝長さを 1cm 以内に収めるとスギノアカネトラカミキリの産卵対象とはならない．



図 6 トビクサレ^[7]

(6) 枝打ちの作業技術

枝打ちをする場合は節を短く、巻き込みの仕上がりが良くなるようにと考える。そのため、残枝長さを短くしようとするが、幹に傷が付く危険性が高まる。したがって、枝をどの位置で打つかは、幹に傷がついて良いか否かが重要なことになる。枝隆の発達した枝で、変色を避けたい場合は枝隆の末端付近(a)、残枝長さを抑えたい場合は枝隆の基部(b)と目的によって切断位置が異なる(図 7)。

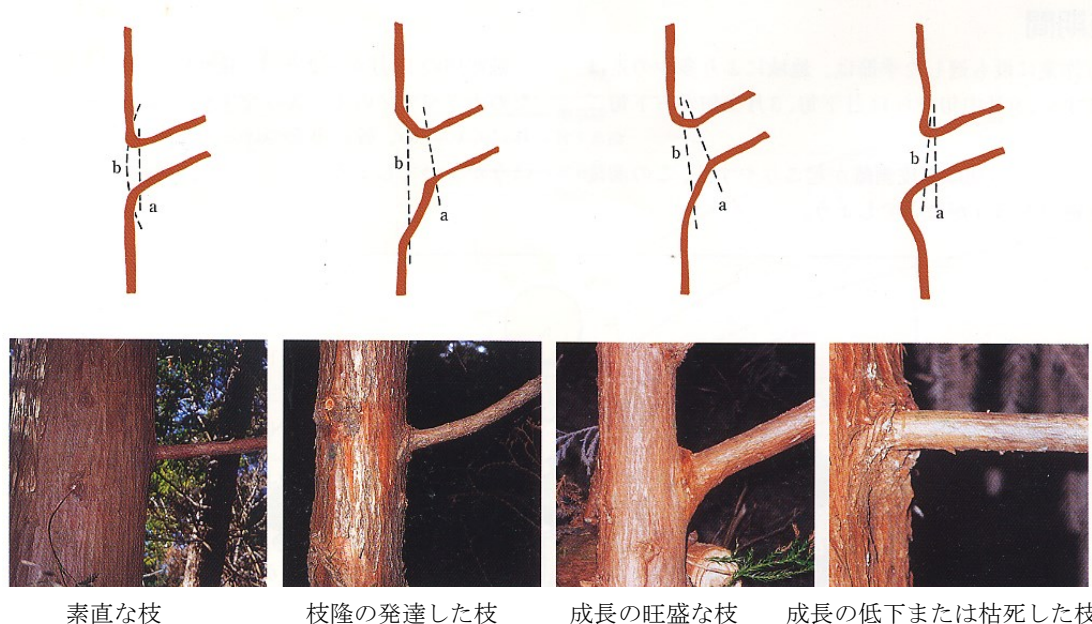


図 7 目的に応じた枝の切断位置の一例[6]

(7) 枝打ちの器具

刃物にはノコ、ナタ、オノ、カマ、ハサミなどがある。一般的には図 8-1 の枝打ち用のノコが使用される。これは、枝の付け根の切断すべき正しい位置を正確に切断できる。そのため、幹に傷がつくことが避けられる。図 8-2 のナタは、枝の上から切断場所を狙って打ち落とす作業であり、習熟した技術が要求される。また、図 8-3 のオノもナタと同様の使用方法であるが、オノの重みを生かして、桧の堅い枝や太い枝に使用される。これも高い技術が必要である。図 8-4 のカマは枝の付け根に刃を当てて引き切るように切断する。そのため、幹に傷が付いて変色が生じてもよい材の生産に使用される。図 8-5 のハサミは、50 [cm] くらいの 2 本の柄を両手で操作する。残枝は少し生じるが、幹に傷をつけることがなく、安全で疲れを伴わない。図 8-6 のエンジン付き枝打ち機は、エンジンを背中に背負い、スイッチを入れて刃物を枝に当てて切断する。狙いとした位置で正確に切断することができ、幹に傷をつけることもなく、作業能率も優れる。図 8-7 のチェーンソーは、ハンドルの位置や小型軽量なタイプで、枝打ち専用ではないが伐採木の枝払いとして広く使用されており、斧や鉋に比べて作業が早いという意見もある。

手持ち用具のほかに高い位置の枝打ちの場合は、木登用具が必要である。一般には梯子類が広く使われているが、ブリ縄や木登器が使われることもある。ブリ縄はロープと足場棒を使い、木登器には鋭利なツメがついた装具やブリ縄を応用したような器具などいろいろとある。



図 8-1 手鋸

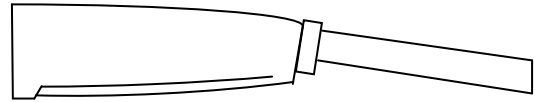


図 8-2 鉋

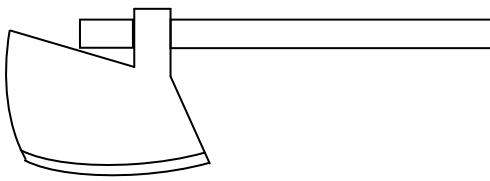


図 8-3 斧

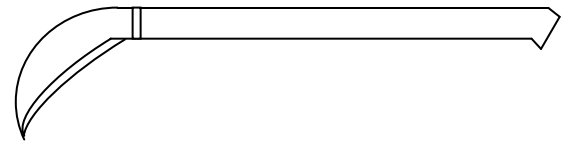


図 8-4 鎌

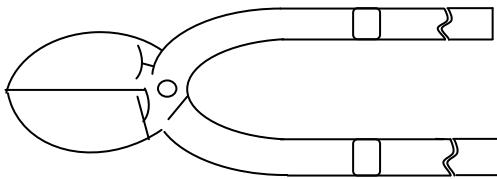


図 8-5 鉗



図 8-6 枝打機^[8]



図 8-7 チェンソー^[9]

図 8 枝打ち器具

(8) 枝打ちの作業工程

枝打ち作業の工期(捗り具合)は作業の丁寧さ、熟練度、樹種、使用器具、環境などによって異なる。最も差の出る要因は枝打ちの位置の高さである。そこで、枝打ちの高さと 1 人が 1 日に枝打ちができる本数の関係について藤森らが調査をしている。これによると、枝打ちの作業位置が高くなるにつれて枝打ち本数は指数関数的に減少しており、バラツキは大きいものの枝打ち作業の高さ(x)と枝打ち本数(y)との関係式を導出している。この関係式を基に算出した結果を表 1 に示す。ただし、使用した器具はオノの一例を除きナタである。また、10.5[cm]心持正角柱材生産のため、7~5[cm]前後の太さの幹を毎回 1.5[m]前後打った場合の資料である。

表 1 標準枝打ち工期

枝打ち回数	枝打ち高さ	本数/1 人・1 日
1	0~1.5	250
2	1.5~3.0	160
3	3.0~4.5	110
4	4.5~6.0	70
5	6.0~7.5	45

2.1.3 アンケート調査

人手による作業を機械化するため実態を調査する必要がある。造林技術の一つでもある枝打ちは地域の自然的、社会的条件に即した林業経営による施業であり、枝打ちの実態調査には幅広い意見を求める必要がある。そこで、全国 200 の森林組合を対象に「森林事業に関するアンケート」と「林業技術に関するアンケート」を実施し、小規模育林業には聞き取り調査を実施し、その結果を示す。

(1) 森林事業に関するアンケート

アンケート方法について、無作為抽出による全国の 200 の森林組合を対象とし郵送と FAX で回収をした。期間は平成 22 年 11 月 24 日~平成 23 年 1 月 31 日、回収の結果は有効回答数 91 組合、回答率 45%、集計は自由回答方式の平均値を示す。

Q1) 枝打ちを定期的実施をしているか。 20/91 組合(23.3%)が定期的実施

Q2) 最初の枝打ちは、 植木から 11.8 年後、
もしくは高さ 290cm、直径 9.5cm

Q3) 枝打ちのサイクルは何年間隔か。 8.1 年

Q8) 枝打ちロボットがあるとすればどのような利用目的か. 図 9 に示す.

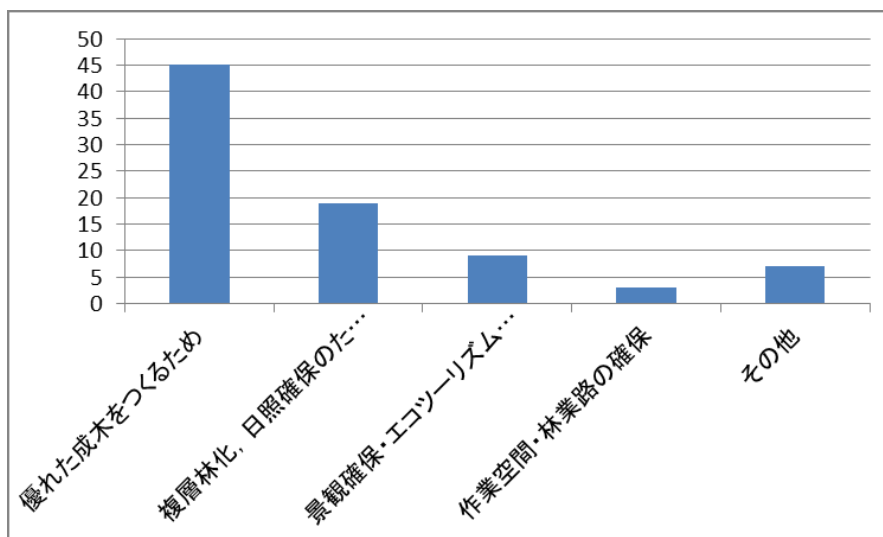


図 9 枝打ちの目的

・購入価格(平均) 254,167 円

Q10) 枝打ちロボットを購入するとすれば、どのような点を重視するか。図 10 に示す。

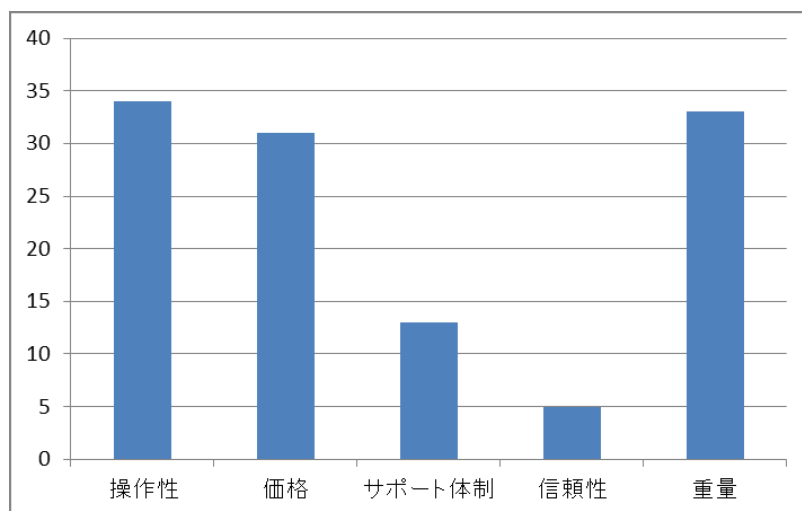


図 10 購入の際に重視する点

Q11) 枝打ちロボットに対する不安について. 図 11 に示す.

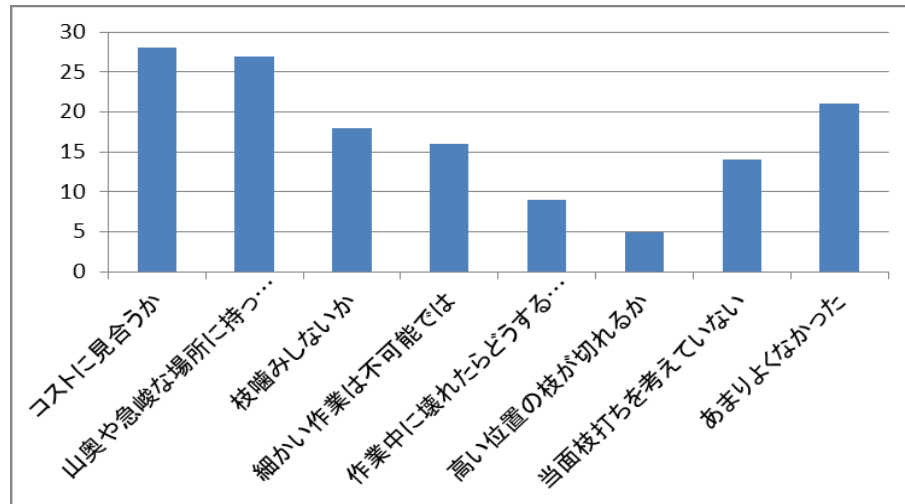


図 11 枝打ちロボットに対する不安

アンケートのまとめとして, 斜面を 1 人の林業技能者によって全システムが運搬可能であり, 様々な立木や枝に対応し, そして樹表を傷つけない. これらが現場のニーズである.

(2) 林業技術に関するアンケート

アンケート方法について, 森林管理を積極的に行っていると判断した 100 の森林組合を選択抽出し, 郵送と聞き取りによる情報収集をした. 期間は平成 23 年 11 月 9 日～平成 11 月 25 日, 回収の結果は有効回答数 26 組合, 回答率 26%, 集計は自由回答方式の平均値を示す.

Q1) 枝打ちのスケジュール(表 2)

表 2 枝打ちのスケジュール

	1 回目	2 回目	3 回目
植栽後	11.0 年	15.4 年	18.8 年 最長 25 年
高さ	2.4m	3.8m	5.7m 最長 13m
直径	9.4cm	14.2cm	17.9cm 最大 25cm

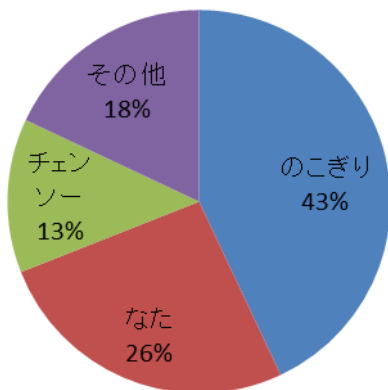
Q2) 枝打ち作業について

- ・作業員編成(何人編成で枝打ちするか) 3.8 人
- ・作業員の平均年齢 49.6 歳(最年少 18 歳, 最年長 75 歳)
- ・一人あたりの伐採量/日(低木) 115 本
- ・一人あたりの伐採量/日(高木) 58 本

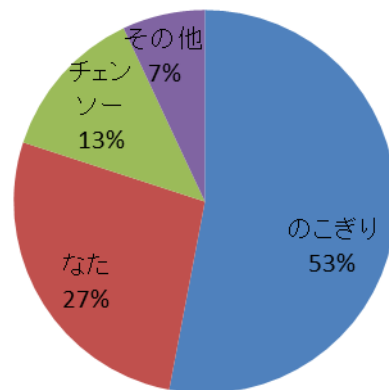
Q3) 節の有無による価格差はどのように

・ 原木販売では価格の差はない	50%
・ 50～150%の上昇	30%
・ 200%以上の価格差	5%
・ 現在取り扱っていないので不明	20%

Q4) 枝打ちに使用される道具(図 12)



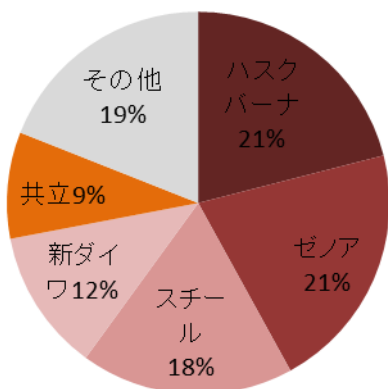
(a)1 回目の枝打ち作業



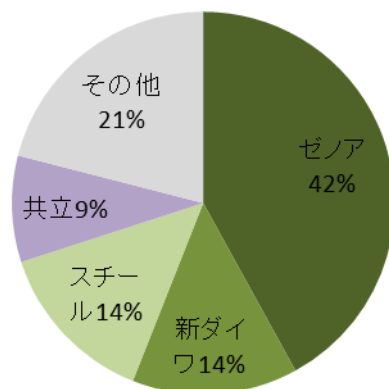
(b)2 回目の枝打ち作業

図 12 枝打ちに使用される道具

Q5) 保有しているチェーンソー(図 13)



(a)伐採用



(b)枝打ち用

図 13 保有しているチェーンソー

Q6) 故障の場合の対応(どこまでなら自分たちで行うか)

- ・ 部品交換のみ 50%
ソーチェン交換, プラグ交換(シリンダー等はメーカー)
- ・ 組合で修理をする 30%
基本的には全部組合で修理
キャブレターの整備, エンジン回りの点検整備
- ・ 各自でメンテナンス 20%
部品取りとして古いチェンソーの部品を取って直す

Q7) 使用上の安全対策や故障した場合に備えて

- ・ チェンソーを 2 台持っていく. 鋸, 矢, ヨキを持っていく.
- ・ チェンソー防護ズボン・チップス(足カバー)着用を徹底する.
- ・ チェンソー操作は基本どおりに使用するよう徹底する.
- ・ 毎日使用前後はメンテナンスを各自で行うようにする.

Q8) 燃料やバッテリーの予備品の量

平均 4.2 リットル

枝打ち作業の過程や使用する道具について操作性, 機能性, 安全性という点から, 枝打ちロボットに求められる環境条件をまとめた.

枝打ち作業に持参するものとして道具の他にベルト, 安全帯, ロープ, 梯子, 脚半, 手甲, 帽子など, 運搬時の重量はおおよそ 10kg くらい(ただし, チェンソーを使用する場合は 15kg 以内)である.

(3) 小規模育林業の聞き取り調査

Q1) 枝打ち対象の樹の直径の変化

- ・ 太い樹のとき: 根元 (機械取り付け部) 450[mm]
切るべき最も細い部分 枝の直径 10~50[mm]
- ・ 細い樹のとき: 根元 (機械取り付け部) 100[mm]
切るべき最も細い部分 枝の直径 10~30[mm]

Q2) 切り始めの枝の高さ (ロボットのとき)

- ・ 最も低い枝の高さ: 3[m]
- ・ 最も高い枝の高さ: 10[m]

Q3) 一回の枝切りで昇降する最大の高さ

- ・ 3 乃至 4 度目の枝打ちは GL より 7[m]から 10[m]程度

Q4) 市販の枝打ちロボット「やまびこ」の保守について

- ・ 保守契約有 (消耗品以外)
- ・ 保守契約は使用頻度などによって契約内容や契約金額は異なる.
- ・ 殆どのユーザーは販売店での修理・点検を行う.
- ・ 故障の具合により保証内で修理したり, 実費で行うなど様々である.

2. 2. 研究目的

人工林の手入れの 1 つである枝打ちは、計画的かつ適切に行うことで、節の無い高付加価値な木材の生産が可能となる。さらに、枝打ちにより森林が健全化し、風水害や土砂災害からの生活環境保全、生物多様性の保全、多様な自然環境や豊かな水資源の保全など多くの利益をもたらす。しかしながら、大変危険を伴う作業であるとともに高齢化や採算がとれない重労働に対して、多くの林業従事者は人手による枝打ち等を控える状況が起きている。そこで、人手作業に替わる自動枝打ち機の開発がされてきたが、自重で滑り落ちないようにするために能動車輪部を強く樹幹に押し付ける機構や抱きつき機構があるため重量化しており、急斜面での可搬性に極めて乏しい。さらに、枝がチェンソー等のガイド板を噛む枝噛みがしばしば生じ、枝噛みが生じると作業者は樹に登って直すことになる。また、枝打ちを行わない区間も螺旋昇降であるため作業速度が遅い。これらの理由により、多くの森林組合では十分に利用されず放置されている。

これまでの枝打ち機の昇降方法には、車輪による螺旋昇降、車輪による直動昇降及び、把持機構による直動昇降に大別ができる。しかし、実用化されているのは螺旋昇降のみである。新しい技術開発は 2~3 の研究機関で実施されているが、新しい原理による昇降方式は検討されておらず、実用化には程遠い。枝がチェンソー等のガイド板を噛む枝噛み問題の対策は何ら示されていない。また、直動昇降か螺旋昇降のいずれかであるため作業速度が遅い。

そこで、本研究では小型・軽量かつ汎用性の高い枝打ちロボットを開発し、人手に替わり利用しても十分に効率的な枝打ち作業が実現することを目的とする。枝打ちロボットを導入することで、生産性の向上、省力化、労働強度の軽減のみならず労働安全性の改善、機械化による林業労働の魅力づくりによる若年労働者の参入を促進し、持続可能な森林づくりへの貢献が期待される。

3. 外部技術・先行研究

本章では林業機械の現状と柱体昇降機を含めた枝打ち作業に関連する先行研究の概要と問題点を列挙し、本研究で解決すべき技術的課題について述べる。

3.1 動力枝打ち機の導入と開発^[10]

動力枝打ち機は、昭和40年にドイツ製の自動木登枝打ち機(商品名:ツリーモンキー(図14))が輸入され使用が試みられたが、重量が48[kg]あり、かつ適用樹幹径が12~23cmと細いほうの限界が大きいことなどから普及には至らなかった。その後、国内でも動力枝打ち機の開発が進められ、昭和50年代後半には2社(枝打ちロボット439(図15)とシルバックス18A)が比較的低価格で市販を始めた。重量は25.6kgに改良され、適用樹幹径も7~8cmから20cm前後までと、より細くまで打てるようになってきた。しかし、心持正角表面無節の柱材生産のための枝打ちは10.5cm正角の場合7~5cm、または、それより細い太さの範囲の枝打ちの繰り返しであるため、この目的では使えなかった。その後も新規参入による競争や改良などが施され後述の「やまびこ」へと発展していった。



図14 ツリーモンキー^[10]



図15 枝打ちロボット439^[11]

3.1.1 自動枝打ち機「やまびこ」^[12]

(1) 製品概要

セイレイ工業株式会社が市販していた自動枝打ち機やまびこ^[12]の外観を図 16 に、その仕様を表 3 に示す。一定の角度を持たせた能動車輪で、樹幹を螺旋上昇しながら本体に取り付けられたチェンソーで枝を切断していくしくみである。操作方法はラジコンによるリモート式となっており、上昇・下降の 2 段変速機構である。

自重で滑り落ちないように能動車輪を強く樹表に押し付ける機構があるため重量化しており、急斜面での可搬性に乏しい。さらに、枝がチェンソーなどの切刃を噛む枝噛みを生じ、その都度作業が中断し復旧する必要がある。また、枝隆の発達した枝は枝隆が切除され幹に傷がつき、変色を生じさせるなどの問題を抱えているため、あまり使用されていない。

表 3 製品仕様



図 16 やまびこ

			AB232R	AB351R
機体寸法 (全長×全幅×全高)[mm]			483×567×850	548×643×1040
重量(本体総重量:乾)[kg]			28.0	32.8
エンジン	型式		TH48D	
	排気量[cc]		48.6	
	最大出力[PS]		1.90	
	始動方法		リコイルスタート	
	燃料タンク容量[ℓ]		1.0	
速度	作業	上昇[m/min]	1.8～2.5	
		下降[m/min]	3.2～4.9	
	走行	上昇[m/min]	3.3～4.6	3.3～5.1
		下降[m/min]	5.9～8.9	7.0～10.7
切断	ソーオイルタンク[ℓ]		0.6	
	バー長さ[mm]		300	337
対応幹径[mm]			70～230	150～350
切断枝径[mm]			檜:3.0 杉:3.5	檜:4.0 杉:4.5
無線受信距離[m]			30	

(2) 動力枝打ち機の普及

動力枝打ち機は、1980年代に入ってから普及し始め、ピーク時には1万台を超えていた(図17 参照)。その後は減少傾向で現在では7000台以下に落ち込み、近年、セイレイ工業は自動枝打ち機「やまびこ」の製造販売を中止している。

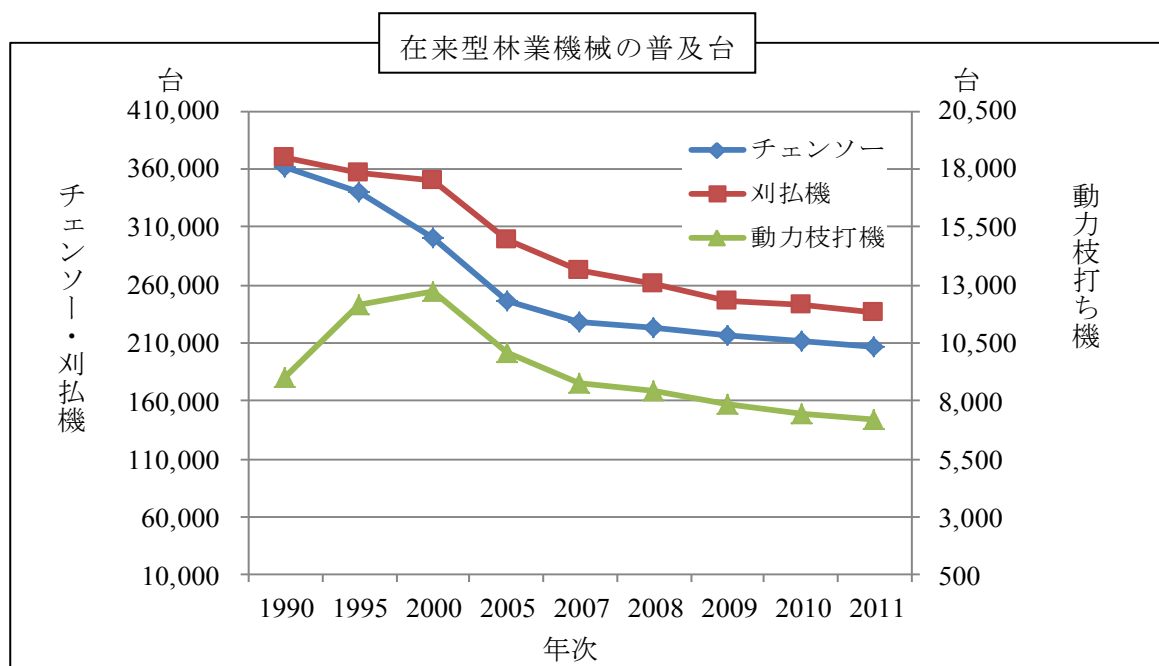


図 17 林業機械の普及台数^[2]

(3) 自動枝打ち機の作業効率^[13]

引用した論文『自動枝打ち機の作業効率』は、全国に6カ所ある東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林の技術職員の報告書である。概要は、自動枝打ち機 AB230R を使用して枝打ちをした場合の、枝打ち作業の時間観測結果から作業時間の推定と、枝噛みが発生した回数や、発生した枝噛みからの回避時間について述べている。

試験地の林分概況を表4に、各作業の内訳の平均時間を表5に示す。これらによると、全体の中で一番時間を費やしている行程は作業時間であることがわかる。また、各行程(枝下高さ・作業長さ・枝打ち高さ)の速度を算出しているが、作業速度は仕様よりやや遅い結果である。

表 4 林分概況^[13]

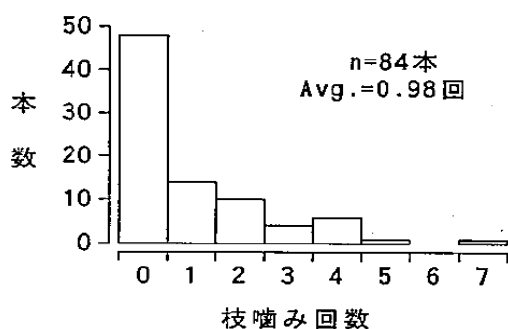
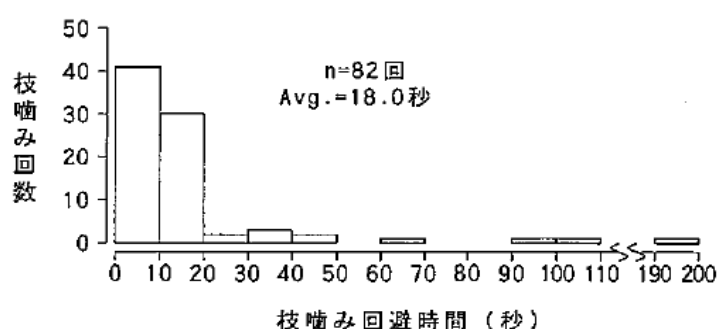
	1 い 31	3 い 6
樹 種	スギ	スギ
林 齢 (年)	39	18
枝打ちの本数	38	46
平均胸高直径 (cm)	21	15
(Min~Max)	(12~27)	(10~21)
平均樹高 (m)	17.4	12.3
平均枝下高 (m)	5.0	3.3
平均枝打高 (m)	13.2	8.9

表 5 作業時間の測定結果^[13]

	1 い 31	3 い 6	全体
取付[sec]	30.11	23.63	26.56
上昇[sec]	48.18	25.09	35.54
作業[sec]	270.58	135.87	196.81
下降[sec]	83.05	40.06	59.73
取外[sec]	25.76	25.54	25.64
合計[sec]	457.68	250.54	344.27

*作業長さ=(枝打高)-(枝下高)

作業時間を費やした一因として、図 18 と図 19 に示すとおり、1 個体につき 0.98 回枝噛みが発生すること、発生した枝噛みの 88%が枝噛みを回避するのに 20 [sec] 程度要していることが挙げられる。

図 18 個体あたりの枝打ち回数^[13]図 19 枝噛み 1 回あたりの回避時間^[13]

今回の測定結果をもとに、枝打ち木 1 本あたりに要する時間 Y_0 を式(1)として導出している。

$$Y_0 = -21.65X_1 + 41.52X_3 - 18.42 \quad (1)$$

枝下高 X_1 と枝打高 X_3 より推定式が求められ、事前に枝打ち対象の林分概況を調査しておくことで、枝打ち作業に要する合計時間が推定できる。

(4) 自動枝打ち機の使用時期と材の異常変色^[14]

引用した論文『スギ・ヒノキの枝打ちに関する試験(自動枝打ち機の使用時期と材の異常変色)』では、自動枝打ち機 AB230R を使用して成長休止期と成長期に枝打ちを行い、7 年後の巻き込み状況、傷と材の異常変色発生状況について述べている。

このなかの「傷と変色状況」を表 6 に示す。これによると、成長休止期(12 月)と成長期(4 月, 7 月)の間に若干の差はみられるが、統計的な有意差は認められず、タイヤ痕による変色も確認されていない。なお、ヒノキに比べスギの方が異常変色の発生率が高く、変色面積も大きい傾向はナタやノコの枝打ちでも同様としている。

表 6 傷と変色状況

樹種	枝打ち時期	傷の長さ [mm]	傷の発生率 [%]	変色面積 [mm ²]	変色発生率 [%]
スギ	1983.12	5.0	35.4	505.4	29.2
		(0~399)		(0~18,750)	
	1984.4	4.1	48.3	212.0	32.8
		(0~120)		(0~4,500)	
	1984.7	3.5	44.0	182.3	30.8
		(0~70)		(0~5,000)	
ヒノキ	1983.12	3.2	25.0	39.0	10.2
		(0~45)		(0~1,500)	
	1984.4	1.9	28.5	9.1	4.3
		(0~30)		(0~375)	
	1984.7	5.6	24.3	91.4	15.1
		(0~160)		(0~2,350)	

(5) 自動枝打ち機の枝打ち品質^[15]

引用した論文『枝打ち機(自動枝打ち機)の最適使用方法に関する研究』では、枝打ち機「ロボット 439」の機械性能と枝打ち品質を他の枝打ち器具との比較している。このなかの枝打ち品質を表 7 に示す。これによると、幹の外傷は機械枝打ちの方が多く、切り口の状態も劣っている。また、ヒノキ場合、変色の大きさや枝の巻き込み率は機械枝打ちと人手枝打ちの差はあまりなく、スギの場合では機械枝打ちの方が良い結果となっている。

表 7 枝打ち作業評価

樹種	枝打ち器具	平均残枝長 [mm]	平均枝径 [mm]	平均幹の傷 縦×横 [mm]	切り口 良/否	平均変色 縦×横 [mm]	枝打ち巻き込み率[%]
スギ	機械	3.9	16.0	52.4×21.1	30/70	26.8×15.0	27.8
	人手(ナタ)	0.3	17.9	24×0	55/45	66.2×15.4	19.5
ヒノキ	機械	2.6	18.2	61.9×32.7	45/55	45.3×22.3	15.4
	人手(ナタ)	1.1	16.2	0×0	100/0	17.0×10.0	15.2

注) 「切り口 良/否」の数値は良：否の割合を示す。

注) 巻き込み率は材面にでてきた節数に対する巻き込んでいる節数の比率を示す。

3.1.2 動力挟み型枝打ち装置^[16]

三菱重工業株式会社が平成 8 年に特許取得した動力挟み型枝打ち装置(図 20)は、圧縮空気を動力媒体とした携帯型直流発電装置を動力源とした旋回式切断機構と直動昇降機構を備えた装置である。昇降機構は 3 輪の鼓状の車輪を樹木に挟持し、直動昇降を実現している。切断機構は 2 つの切刃をもつせん断方式であり、緻密な切断面を実現している。

特徴、効果を下記に示す。

- ・緻密な切断面を得ることで枝切断面からの腐食を防ぐことができる。
- ・枝の切り残しがほとんどない状態にできる。
- ・主要部を分離することができ運搬容易性が良い。
- ・携帯用エンジンを駆動源にした切断能力が高い。
- ・切刃が樹木の表面を密接することができ常時正常な切断性能を保つことができる。

なお、本装置が普及したかどうかは不明である。

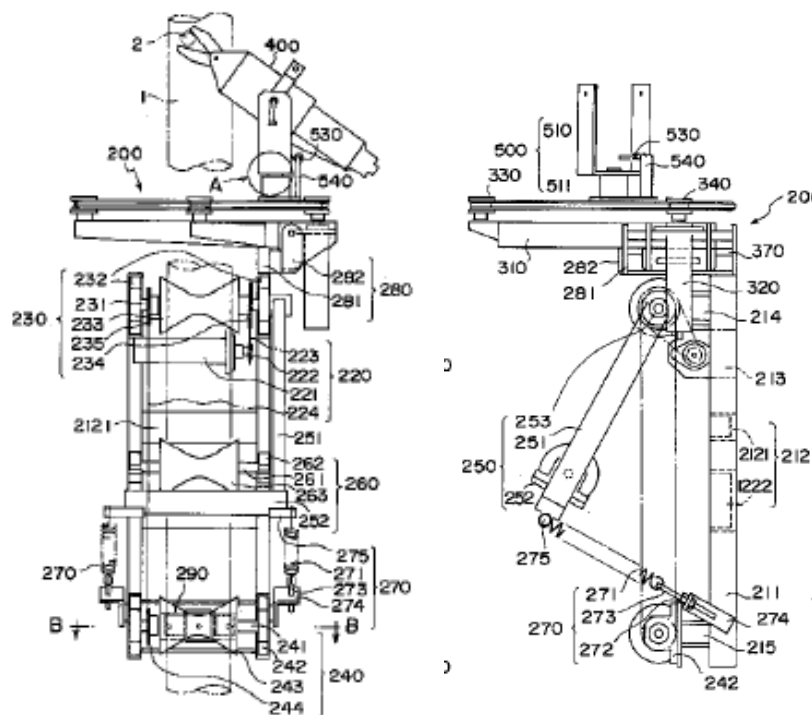


図 20 動力挟み型枝打ち装置の構成図^[16]

3.1.3 木登り枝打ちロボット WOODY-1^{[17][18]}

早稲田大学で研究・開発されている枝打ちロボット WOODY-1 の外観を図 21 に、その仕様を表 8 に示す。本体の上部と下部に配置された開閉機能を備えた把持機構を樹木の鉛直方向にスライドさせることによって、尺取虫のように本体の昇降を実現している。切断目標の高さで本体を旋回させて目標の枝を丸鋸にて切断をする。また、これらの一連の動作は、本体に搭載したカメラで視認しながら手動で操作をする。

自重で滑り落ちないようにアーム型の抱き付き機構があり、上下を交互に抱き付くために構造上、高速化が容易ではない。また、枝噛みへの対応がされておらないことに加え、構成する部品点数が多く複雑であるため、剛性などに問題を抱えている。

近年は、把持機構を改良した街路樹剪定用の WOODY-2 を開発しているが、昇降は尺取虫方式である。



図 21 WOODY-1

表 8 仕様

	WOODY-1
機体寸法 (全長×全幅×全高)[mm]	310×310×750
重量[kg]	13.8
対応幹直径[mm]	100～150
昇降速度[mm/sec]	19.4
回転速度[mm/sec]	63.8

3.1.4 ワシントン椰子の枝払い機^[19]

鹿児島工業高等専門学校とトヨタ車体研究所が共同開発した常緑高木であるワシントン椰子の枯れ枝除去作業を行う枝払いロボットの外観を図 22 に、その仕様を表 9 に示す。

開発 2 号機は昇降機と枝払い装置で構成され、昇降機は片側 4 輪と対向する 1 輪のローラー型タイヤで保持され二等辺三角形に配置されており、締め付け機構により幹直径の変化に対応している。枝払い装置はチェーンソーを備えた剪定部が幹周に沿って 360° 旋回させる構造となっている。枝払い作業は、椰子の最上部に生える枝まで直登し、チェーンソーを取り付けたアーム部の旋回と、チェーンソーと幹との角度調節と、チェーンソーと枝との角度調節と、ロボットの昇降とで行う、また、枝払い装置にはカメラを取り付けモニターしている。

検証実験で課題をあげているが、重量が重い、準備時間がかかる、枝噛みが生じるなどの問題を抱えている。



図 22 ワシントン椰子の枝払い機

表 9 製作仕様

		枝払い機
機体重量[kg]		100
駆動用モータ[Watt]		52.1 (5 個)
旋回用モータ[Watt]		6
チルト用モータ[Watt]		6 (2 個)
切 断	バー長さ[mm]	250
	旋回速度[mm/sec]	15
	旋回直径[mm]	550
無線受信距離[m]		5

3.1.5 枝打ちロボット MS-2^[20]

(有)村田ソフトウェアの村田誠氏が 2008 年ごろから開発を行っている枝打ちロボットの外観を図 23 に、その仕様を表 10 に示す。複数のセンサとマイコンを組み合わせで姿勢制御を行いながら昇降し、複数の超音波センサと赤外線 PSD センサを用いて枝位置を認識しながら丸鋸による枝の直線切断を実現している。

機体は円筒状をしており一部を開閉することで樹幹に取り付けることができ、能動輪は 3 方向から樹幹に押し付けられている。切断部は丸鋸を取り付けたベースが回転し、枝の真下にくるように操縦をする。下から押し上げるように枝に接触させ、丸鋸を樹幹接線方向にスライドしながら枝を切断する。枝を下から押し上げることで枝噛みの回避を試みているが、その効果は示されていない。



図 23 枝打ちロボット MS-2

表 10 仕様

	MS-2
機体寸法 (全長×全幅×全高)[mm]	600×600×440
重量[kg]	12.9
対応幹直径[mm]	70～210
対応枝径[mm]	37
最高速度[m/sec]	0.12

3.1.6 自走式枝打ち装置^[21]

アメリカの企業(CLOUSTON Inc.)が 1999 年に特許取得した自走式枝打ち装置の外観を図 24(a)に刃物を図 24(b)に示す。装置の上下に各一对の能動輪とこれに対向する 2 輪の従動輪で幹を挟み込んで樹幹に接地する。本体内蔵のエアータンク内の空気を充填することで接地圧を生み、空気を抜くと滑り落ちる格好で下降する。切削工具はルーターで行っている。遠隔操作で動力源はガソリンエンジンで重量は 85 ポンド(≒38.5kg)である。



(a) 外観

(b) 刃物

図 24 自走式枝打ち装置^[22]

3.2 昇降機構

3.2.1 ノーバックドライブ機構を利用した垂直昇降移動機構の開発^[23]

秋田県立大学は、枝打ち作業を視野に入れた垂直昇降移動機構を開発している(図 25). 駆動ユニットと把持ユニットから構成され、把持ユニットの 3 箇所接続部に駆動ユニットを 3 つ取付ける. 駆動ユニットにはウォームギヤの逆駆動を抑制するノーバックドライブを利用した樹木からの滑落を防止する機構を取り入れている. また、把持ユニットにはスライドレールと定荷重ばねを用いた立木の直径の変化に対応した締め付け機能が備わっており、重量は 5.4[kg]である. 直径 320[mm]の丸棒での実験において、上昇速度 0.2[m/s]、下降速度 0.23[m/s]を実現している.



図 25 垂直昇降移動機構

3.2.2 円筒及び円錐形の柱を昇降するロボットの設計^[24]

フランスで研究されている PobotV2 を図 26 に示す. 街路灯の柱の昇降を目的として設計され、実験では鉄製の円錐柱や木製の円柱の昇降に成功をしている. 自重を利用して摩擦により円柱上で静止ができる構造をしている. 車輪配置は 3 箇所とし、質量重心に近い側の車輪にウォームギヤを介した操舵機能付きの能動輪(1 輪), 遠い側に受動輪(2 輪)としている. 円柱直径の変化には機体が傾斜することで姿勢を保つしくみである.

主な性能に、対応する円柱直径 100~300[mm]、重量 10.5[kg]、上昇速度 0.066[m/s]である.



図 26 PobotV2

3.3 切断機構

3.3.1 枝打ちロボットのための切断機構の動作計画アルゴリズム^[25]

岩手県立大学曾我研究室は枝打ちロボットの切断機構を開発している(図27). 切断機構は切断機とその駆動部を搭載した切断機部, 切断機部を上下するスライド機構, 上昇時の幹への接触を防止する切断機部待避機構から構成される. また切断にはエンドミルを使用し, 不要な幹への食い込みを防ぐガイドローラを付加している.

移動プラットフォームも開発しており主な性能として, 機体寸法(全長×全幅×全高)1136×984×440[mm], 重量39.6[kg], 速度2.2[m/min], 対称樹木の直径150~350[mm], 昇降方法はソフトタイヤによる螺旋昇降である.



図27 エンドミルによる切断機構

3.3.2 ロボットによる林業用枝打ちシステムに関する研究^[26]

鹿児島工業高等専門学校はロボットによる枝打ちシステムを開発している(図28). 切断刃物にルーター刃を採用し, 動力源のモータからプーリ, ベルトを介し, ルーター刃を回転させて枝を切削するしくみである. 切削実験において, 切断面は枝をえぐり取るように切削し, 切り口はきれいであったことを確認している.



図28 ルーター刃による切断機構

3.3.3 ルーター刃による枝打ち機の試作^{[27][28]}

大分県臼杵事務所林業課は、木工用のルーター刃を利用した動力による枝打ち機の開発を行っている(図 29)。切断機の構造は、直径 8[mm]、直刃、刃数 2 枚、刃長 50[mm]のルーター刃を両端で支持している。手持ち式の動力枝打ち機であり、操作性を考慮して押し出す操作とするため、12[V]の DC モータと刃の回転軸角度を 90[deg]としている。そのため、モータのシャフトからベベルギアケースにプーリーとベルトを介して動力を伝え、ベベルギアで回転軸角度を 90[deg]変換している。また、ルーター刃は食い込み接点で反発力が働くため、幹に接着させて切り口の高さを調整するストッパの役目をする安定板を装着している。検証実験において、切削面は鉋をかけたように平滑で、枝座をえぐり取るような切削ができ理想的な切り口となったことを確認している。

また、電動式とガソリンエンジン式を試作し、枝打ちを実施している。杉・桧の幼齢林で枝径 10～15[mm]程度であれば、電動モータで 1[sec]位で切断が可能である。枝径が 20～30[mm]程度になると、大きなトルクを要し、ガソリンエンジン式が有利で切削時間は 1～2[sec]であった。また、駆動方式はタイミングベルトよりオールギアとした方が堅牢確実であったと報告している。

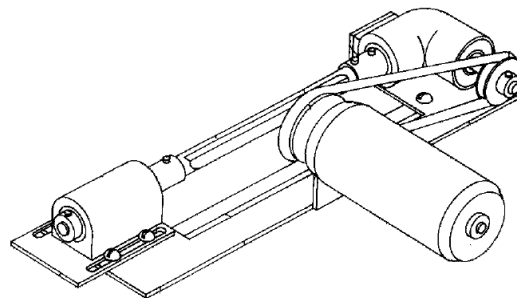


図 29 ルーター刃による切断機構^[29]

3.3.4 電動式小型チェーンソーによる枝打ち機の考案^[30]

熊本南部森林管理署と(株)森和は伐採で使用するチェーンソーを取付けた電動式枝打ち機を開発した。伸縮する操作棒の先端に電動チェーンソーが取付けられ作業者は地上で操作をする。バッテリー駆動とし、立竹用ソーチェンを採用し切断時の消費エネルギーを抑えた。また、チェーンソーの切断進入角が調節でき枝噛みを防止する構造である。

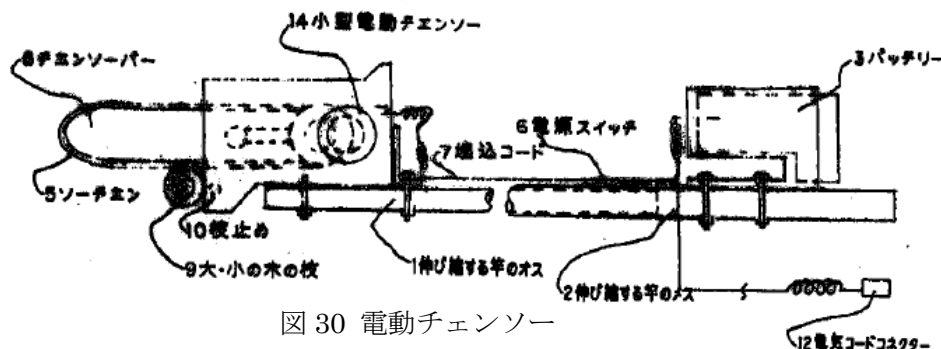


図 30 電動チェーンソー

3.4 技術的課題

外部技術の仕様と問題点を表 11,12 に示す. 自重で滑り落ちないようにするために能動車輪部を強く樹幹に押し付ける機構や抱きつき機構があるため重量化し, 急斜面での可搬性に極めて乏しく, 直動昇降か螺旋昇降のいずれかであり, 作業速度が遅い. また, 切削ツールにルーター刃を採用し枝に挟まる枝噛みを問題化しない方法をとっているが, 作業速度が枝の太さに影響を受けるなど, 枝噛みの根本解決には至っておらず, 人手作業並みの枝打ちを実現していない. この他に, 幹の損傷や切り残し枝長さや省エネルギー化(省電力化)が課題として存在している. そこで, 本研究で解決すべき課題を表 10 に示す. 1.可搬性に乏しく軽量化であること. 2.作業速度が遅く高速であること. 3.幹の損傷防止と残枝長の最短など高品質な枝打ちであること. 4.枝噛みの影響を受けないこと. 5.省電力化であること. これら諸課題について解決を図る.

表 11 外部技術の比較

	自動枝打ち機やまびこ	動力鋏型枝打ち機	自走式枝打ち機	木登り枝打ち機	椰子の枝払い機	MS-2
昇降方法	螺旋	直動	螺旋	直動	直動	直動
切断方法	チェーンソー	鋏	ルーター	丸鋸	チェーンソー	丸鋸
切断機構	固定	旋回	固定	直動	旋回	旋回
本体重量 [kg]	A:28 B:33	不明	38.5	13.8	100	12.9
対象幹径 [mm]	A:70 ~ 230 B:150~350	不明	不明	100~150	不明	70~210
対象枝径 [mm]	A:30 B:40	不明	不明	不明	不明	37
動力源	エンジン	エンジン	エンジン	モーター	モーター	モーター
問題点	重い 枝噛み 幹の損傷	構造上重い 構造上遅い	重い 切り残し	構造上遅い 枝噛み	重い 枝噛み 遅い	耐久性 枝噛み 作業性

注) 開発された順番に左から並べる.

表 12 技術的課題

	技術的課題	問題	解決すべき課題
1	可搬性に乏しい	滑り落ちない把持機構により重量化	軽量化
2	作業効率が悪い	作業速度が遅い	高速化
3	幹に損傷を与える	幹表面と刃物との距離の維持	姿勢調整機能
4	切り残し枝が長い		
5	枝噛みが生じる	原理的な解決をしていない	枝噛み防止機能

4. 枝打ちロボットの開発

本章では、人手に替わり利用しても十分に効率的な枝打ち作業を実現するため、解決すべき課題の解決手法について述べる。

4.1 目標仕様

前章の外部技術の技術的課題やアンケート結果などに基づき要求事項を挙げ、表 13 に目標仕様を示す。

- ・ 急峻な山林で容易に持ち運びができる軽量小型な機体とする。
- ・ 人手作業と同じくらいの作業能率とする。
- ・ ロボット 1 台で枝打ちを対象とする樹木の幹径に対応する。
- ・ 幹への損傷による木材の変色を防ぐため、樹表と接する車輪をソフトタイヤとする。
- ・ 巻き込み長さを短くするため、残枝長さを 5mm 以下とする。
- ・ 平均傾斜 25° といわれる急峻で山間での作業で電源事情も悪いため、省消費電力化とする。
- ・ 枝隆や樹皮などで樹表は平滑ではないため、凹凸の変化に対して車輪の接地を均一とする。
- ・ 樹幹は根元から梢に向かって徐々に細くなっているため、機体の姿勢や走行を安定とする。
- ・ 屋外環境の使用に適した構造とする。

表 13 目標仕様

	試作機
機体重量	15[kg]以下
対応幹径	60～250[mm]
最大昇降速度	0.2[m/s]
最大切断枝直径	50[mm]
切断速度	0.03[m/s]
残枝長さ	5[mm]以下
消費電力	500[W]以下

4.2 試作した枝打ちロボットの開発

目標仕様に基づき，昇降機構，枝切断機構及び制御装置から構成される枝打ちロボットの外観を図 31 に，概略図を図 32 に示し，構成を表 14 に表す．機体構成は，機体の姿勢を修正し，自重を利用し直動と螺旋の切り替えを可能とする昇降機構，枝噛み防止機構及びセンサーを枝の根元に調整する 2 自由度の位置・姿勢調整機構から成る切断機構，制御装置には無線通信可能な CPU ボードを搭載し無線式遠隔操作が行える．全体の重量は切断機，バッテリー，カバーを含め約 16.5[kg](表 15 参照)であり，質量中心は，バッテリーや制御基盤等を収めた制御装置に位置する．樹表面から質量中心までの距離 w は 0.22[m]，上下車輪の中心間距離 h は 0.15[m]である．タイヤは直径 0.075[m]のチューブレスタイヤを用いている．本体フレームは，外径 16[mm]のステンレス製の中空パイプをベンダー製法にて半円状にし，開閉ができる構造とする．本体フレームの上部と下部にそれぞれある 2 つの能動車輪はリンクアームに固定され，各々は 1 つの能動関節で左右に配置した 4 節リンクを同時に動かすことができる 1 自由度 2 リンクアーム機構である．車輪はウォーム減速機構を介してサーボモーターで駆動され，操舵機能を有している．

表 14 構成



図 31 外観(外装付き)

枝打ちロボット		
昇降機構	能動輪	上/下
	能動輪取付角	45°
	補助輪	操舵連動
脚機構	チューブレスタイヤ	
	ゴム硬度	70°
切断機構	ソーチェンによる切削	
	制振対策	有り
制御	無線式遠隔操作	
外装	全体カバー，機構カバー	
電源	Li イオンバッテリー搭載	

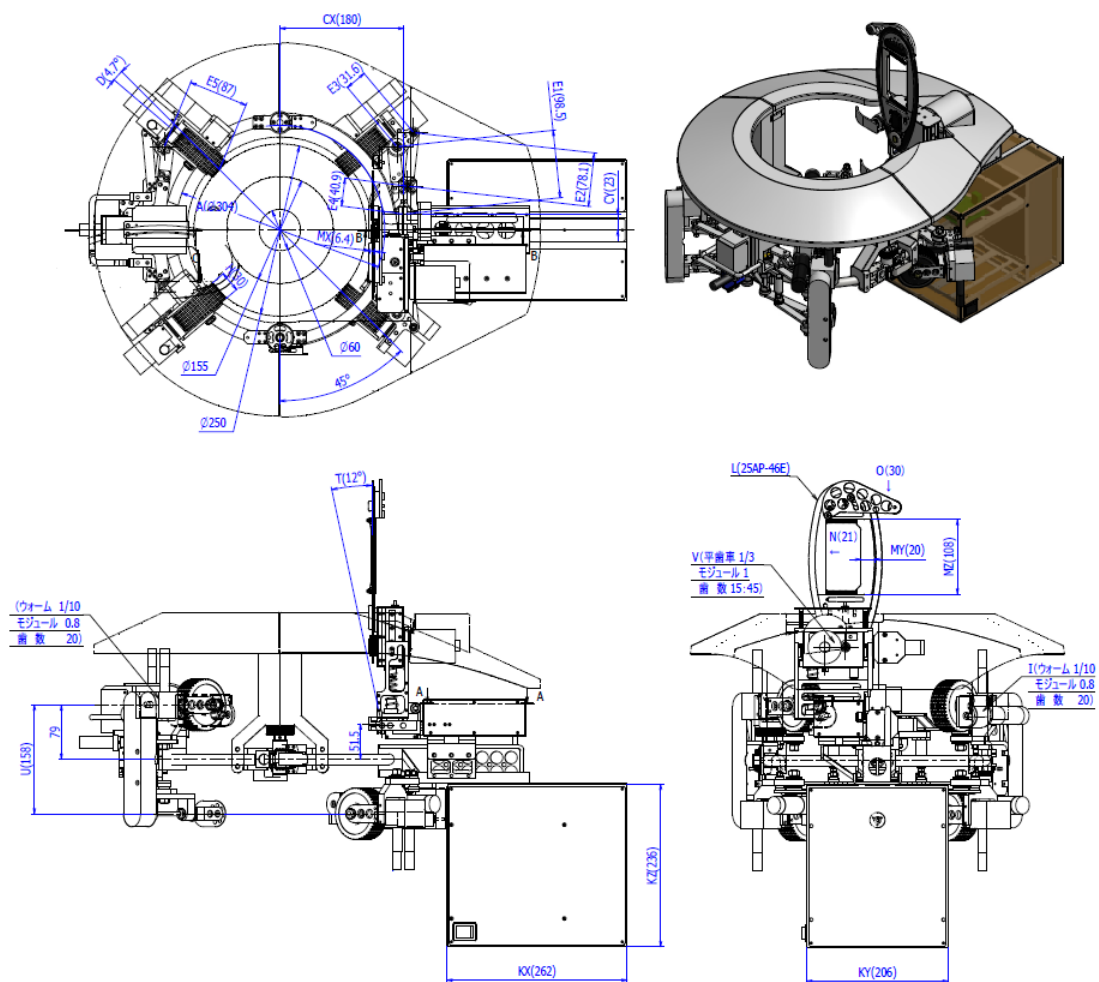


図 32 概略図

表 15 重量表

	重量[kg]	数量
本体フレーム部	1.05	1
上側姿勢調整部	2.15	1
下側姿勢調整部	1.10	1
能動車輪部	0.72	4
枝切断機構部	2.50	1
アーム解放機構部	0.30	1
制御装置部	1.75	1
バッテリー	2.30	1
カバー類	1.00	1
ケーブル, ねじ等	1.47	1
合計	16.50	1

4.3 軽量化

本項では動力枝打ち機は自重で滑り落ちないようにするために能動車輪部を強く樹幹に押し付ける機構や抱きつき機構があるため重量化し、急斜面での可搬性に極めて乏しい。この問題を解決する手段について述べる。

4.3.1 昇降方法の原理

円柱体を昇降するロボットは移動ロボット的一种である。斜面や壁面を移動するロボットには車輪型^[31]、クローラ型^[32]、足による歩行型^[33]、脚車輪型^[34]、吸着型^[35]、蛇型^[36]など様々な移動方法がこれまでに研究開発されてきたが、垂直に立つ円柱の昇降には適さない。一方、円柱体を昇降するロボットは車輪型^{[12][16][19]・[24][37][38]}、尺取り虫型^{[17][18]}が研究開発されている。いずれの方式も機体が自重で滑り落ちないようにするために、前者では能動車輪部を強く幹に押し付ける機構を備え重量化しており、後者では腕型の抱き付き機構があり、上下を交互に抱き付くために高速化が容易でない。

森林作業者が木登りするときは、図 33(a)に示すように、木の棒の一端に縄を固定したぶり縄を樹幹に巻きつけ、木の棒の他端を縛り固定し、それに足をかけて梯子として利用する。木の棒に森林作業者の体重がかかることで、巻きつけた縄に摩擦が発生し、滑ることなく静止できる。腕は、身体を軽く支え、枝打ちのためのナタ打ちができる。このようにして、伝統的な木登り(図 33(b))では、縄と樹との摩擦力で作業者を支える。この摩擦力は作業者の重心位置が樹幹の外部にあるために生じているといえる。この木登りをヒントに、図 34 に示すように縄と木の棒に該当する箇所にモータとバックドライバビリティのない減速機構を用いた能動車輪を配置することで、押し付け機構等を用いることなく、ロボットの自重を利用して樹幹に対し滑ることなく静止でき、モータ駆動により上昇が可能となることが示されている。昇降機構部は、静止時には、エネルギーを必要としないことも特徴としている。



(a)ぶり縄^[39]



(b)伝統的な木登り^[40]

図 33 ぶり縄を使った木登り^[6]

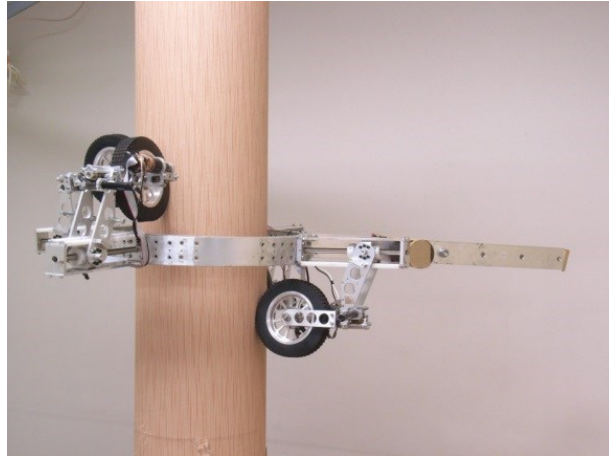


図 34 升降機構(実験機)

4.3.2 設計コンセプト

升降機構部は、車輪の滑りを考慮すると少なくとも 2 つ以上の能動車輪が望ましく、多い程安定な昇降になると期待できる。そこで、下部と上部にそれぞれ 2 個ずつ、合計 4 個の能動車輪を、図 35 に示すように配置することとした。上部を車輪番号 1,2, 下部を車輪番号 3,4 とする。円柱の上面からみると、これらの車輪は図中の x 軸に対して、角度 $\pm \pi/4$ の等間隔で配置される。能動車輪はウォーム減速機構を介してサーボモータで駆動される。これにより、サーボモータの入力電流が零のとき、能動車輪はバックドライバビリティのないウォーム減速機的作用により回転しない静止状態となる。ロボットの質量中心は、制御装置を下部の能動車輪の側に集中して配置するなどして、円柱の外部にあるように設計する。また、能動車輪には操舵角を可変とする操舵系がある。操舵系も、ウォーム減速機構を介してサーボモータで駆動される。このような設計は、次の特長がある。

- 1) 機体を円柱に固定するための押し付け機構や抱きつき機構を必要としないため、軽量化ができる。
- 2) 4 つの能動車輪が同時に滑らないように制御することで、一気に滑って落下することを防止できる。
- 3) 円錐状の柱であっても、機体は傾くが昇降が可能である。
- 4) 直動昇降と螺旋昇降の両者が実現できる。
- 5) 円柱表面の凹凸や外乱により、機体が円柱まわりで回転することを防止できる。

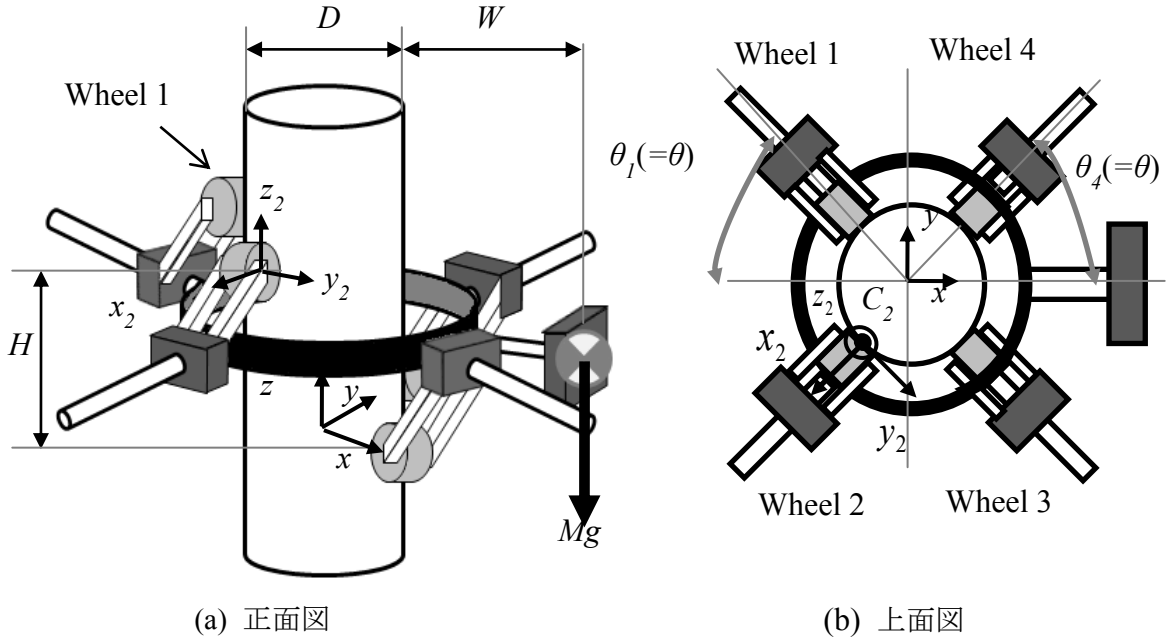


図 35 能動輪を持った昇降機構のモデル図

4.3.3 三次元モデル解析

昇降ロボットの3次元静力学解析のため、図35に示すように、鉛直方向を z 軸とする円柱の中心軸上に基準座標系 $\Sigma\{x,y,z\}$ を設定し、各能動車輪と円柱との接触点 C_i に接触点座標系 $\Sigma_i\{x_i,y_i,z_i\}$ ($i=1, \dots, 4$)を設定する。添字1,2は、上部の接触点であり、添字3,4は下部の接触点を表す。ここで、 x_i 軸は、接触点での円柱の外に向かった法線方向とする。また、 D , W , H は2次元の解析のときと同じ定義であり、車輪と円柱は剛体とする。各能動車輪が円柱に接触しているとき、力とモーメントの釣り合いは、次式で表される。

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{R}_i^T \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_g = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{p}_i \times \mathbf{R}_i^T \mathbf{F}_i + \mathbf{p}_g \times \mathbf{F}_g = 0 \quad (2)$$

ここで、 ${}^i\mathbf{F}_i = (f_{ix}, f_{iy}, f_{iz})^T$ は第 i 接触点での第 i 座標系であらわした力ベクトル、 $\mathbf{F}_g = (0, 0, -Mg)^T$ は、質量中心に作用する重力ベクトル、 \mathbf{p}_g は基準座標原点から質量中心への位置ベクトル、 \mathbf{R}_i は基準座標から第 i 座標への回転行列である。

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta_1 = \pi - \theta, \theta_2 = \pi + \theta, \theta_3 = -\theta, \theta_4 = \theta \quad (4)$$

接触点 C_i での摩擦力は摩擦係数を μ_i とすると、車輪が滑らない状態を保つには

$$\sqrt{f_{iy}^2 + f_{iz}^2} \leq \mu_i f_{ix} \quad (i=1, \dots, 4) \quad (5)$$

を満たす必要がある。力の変数の数は 12 であるが、関係式の数 は 6 であるため、不静定問題となり接触点における力は一意に定まらない。ここで、機体が円柱に静止するための条件を導くため、次の 3 つの場合について解析する。

- ・ 上部の 2 輪が受動車輪，下部の 2 輪が能動車輪
- ・ 上部の 2 輪が能動車輪，下部の 2 輪が受動車輪
- ・ 4 輪とも能動車輪

受動車輪は解析を簡単化するため球状の剛体車輪とし、接平面での摩擦力は零とする。

1) 上部の 2 輪が受動車輪，下部の 2 輪が能動車輪のとき

接触点 $C_i (i=1, 2)$ で摩擦がないとすると

$$f_{iy} = f_{iz} = 0 \quad (i=1, 2)$$

であり、バランスよく釣り合っているとして

$$f_{3y} = f_{4y} = 0, \quad f_{3z} = f_{4z}$$

が成り立つとすると、次の解を得る。

$$\begin{aligned} f_{3z} &= f_{4z} = Mg/2 \\ f_{ix} &= \frac{Mg(D(1 - \cos\theta) + 2W)}{4H \cos\theta} \quad (i=1, \dots, 4) \end{aligned} \quad (6)$$

を得る。この解が、式(5)の摩擦条件を満たすには

$$\mu_3, \mu_4 \geq \frac{2H \cos\theta}{D(1 - \cos\theta) + 2W} \quad (7)$$

この式は 2 次元解析の同様に、小さな摩擦係数でも静止ができるようにするのは、 H を小さくし、 W を大きくすることが機構設計の要件となることを示す。

2) 上部の 2 輪が能動車輪，下部の 2 輪が受動車輪のとき

接触点 $C_i (i=3, 4)$ で摩擦が生じないことから

$$f_{iy} = f_{iz} = 0 \quad (i=3, 4)$$

であり、バランスよく釣り合っているとして

$$f_{1y} = f_{2y} = 0, \quad f_{1z} = f_{2z}$$

が成り立つとすると、次の解を得る。

$$\begin{aligned} f_{1z} &= f_{2z} = Mg/2 \\ f_{ix} &= \frac{Mg(D(1 + \cos\theta) + 2W)}{4H \cos\theta} \quad (i=1, \dots, 4) \end{aligned} \quad (8)$$

この解が、式(5)の摩擦条件を満たすには

$$\mu_1, \mu_2 \geq \frac{2H \cos \theta}{D(1 + \cos \theta) + W} \quad (9)$$

この式もまた、小さな摩擦係数でも静止ができるようにするのは、 H を小さくし、 W を大きくすることが機構設計の要件となることを示す。1)と2)を比較すると、2)の場合の方が滑りが生じにくいといえる。

3) 4 輪とも能動車輪のとき

質量中心が図 35(b)のロボット中心線上とし、4 つの能動車輪がバランスよく接触し、次の条件を満たすとする。

$$\left. \begin{array}{l} f_{1j} = f_{2j}, f_{3j} = f_{4j} \quad (j = x, z) \\ f_{iy} = 0 \quad (i = 1, \dots, 4) \end{array} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $\alpha = 2f_{4z} / Mg$ において 4 つの接触点で静止する条件を求めると

$$\left. \begin{array}{l} \mu_1, \mu_2 \geq \frac{2(1 - \alpha)H \cos \theta}{(1 + (1 - 2\alpha) \cos \theta)D + 2W} \\ \mu_3, \mu_4 \geq \frac{2H\alpha \cos \theta}{(1 + (1 - 2\alpha) \cos \theta)D + 2W} \end{array} \right\} \quad (11)$$

を得る。ここで、 α は未定であるが $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲にある。 $\alpha = 0$ のときは 1) の場合と一致し、 $\alpha = 1$ のときは 2) の場合と一致する。このことから、4 輪駆動は、上下の一方の 2 輪駆動と比較し、滑りの観点から有利である。実際には、剛体での 4 点接触は難しく 3 点接触となる。しかし、円柱や車輪の剛性が低いときには 4 点接触が維持される。

ここで、式(11)に機体パラメーターとして $D=0.13[\text{m}]$, $W=0.138[\text{m}]$, $H=0.3[\text{m}]$, $M=13[\text{kg}]$ を代入し、 $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲における必要な摩擦係数を図 36 に示す。適当な α に対し、必要な摩擦係数(0.8)より低い範囲となり、質量中心を機体の外側におくことで自重により樹幹に静止ができる。なお、ここで示す摩擦係数 $\mu=0.8$ の値はゴム製車輪と樹木との摩擦力の測定結果から求めた値(10 回平均値)とした。

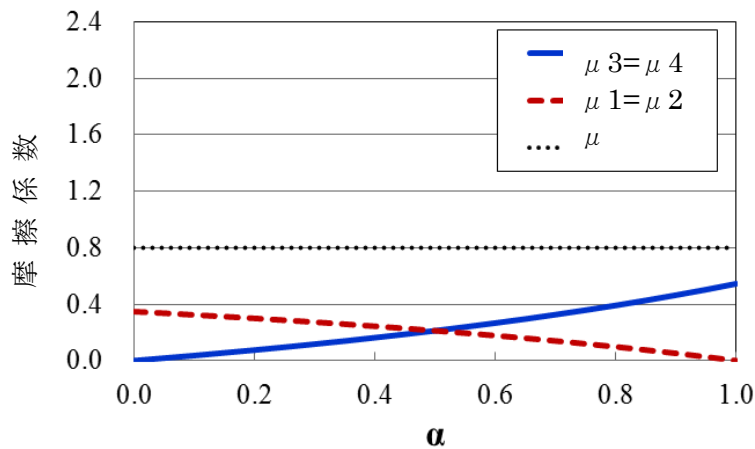


図 36 必要な摩擦係数

4.3.4 自重を利用した昇降機構

三次元静力学解析により，外側に質量中心をおくことで，幹に自重により静止ができることを示した．すなわち，自重を利用したロボットは，樹表面で適度な摩擦係数があれば樹幹にエネルギー消費することなく，4つの能動車輪で幹に静止ができる．そこで，図37に示すとおり機体フレームの上下にバックドライバビリティのないウォーム減速機構を用いた能動車輪を配置し，機体の質量中心を樹の外側となる設計により，機体の自重でロボットは樹にエネルギーを消費することなく静止ができる昇降機構を考案した．これにより，樹への押し付け機構や抱き付き機構が不要となり機体重量15kg以下を実現した．駆動系の配置について述べる．姿勢調整機構には2.5WのDCモーターを用い，その先端に能動車輪がある．能動車輪は20WのDCモータで駆動される．そのDCモータには，エンコーダと減速比1:20の遊星歯車減速機が直結し，車輪との間に減速比1:10のウォーム減速機がある．各能動車輪には3WのDCモータと減速比1:10ウォーム減速機からなる操舵機構が備わっている．

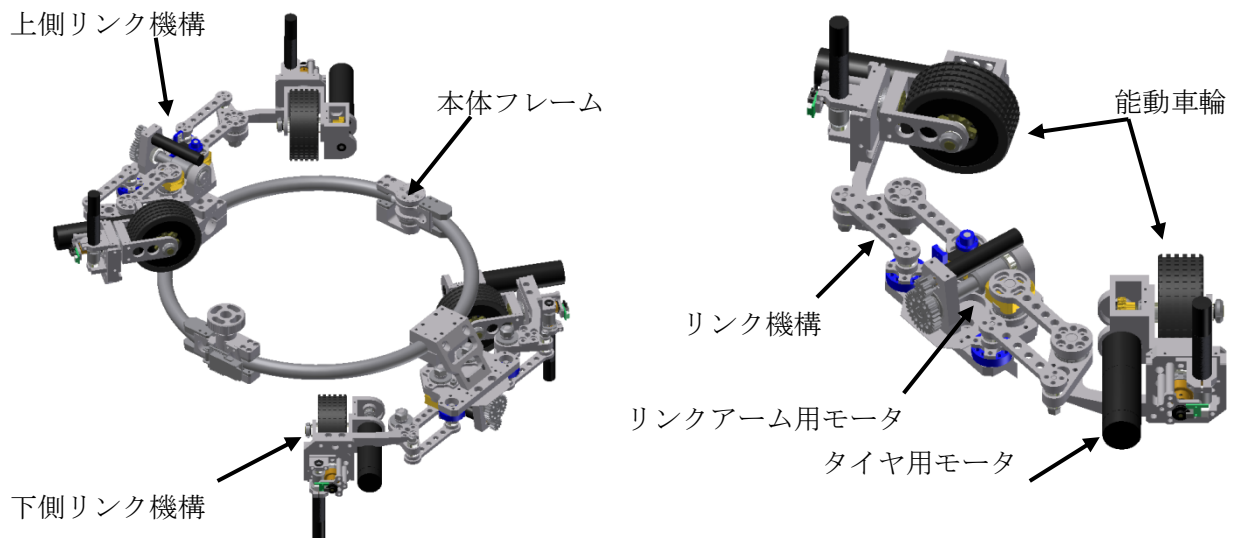


図 37 昇降機構

4.4 高速化

本項では動力枝打機の昇降方法には、車輪による螺旋昇降、車輪による直動昇降及び、把持機構による直動昇降に大別ができ、動作は直動昇降か螺旋昇降のいずれかであり、作業速度が遅い。この問題を解決する手段について述べる。

樹表面で適度な摩擦係数があれば樹幹にエネルギー消費することなく、4つの能動車輪で幹に静止することができる昇降機構を示した。この昇降機構の各能動車輪には図38に示す車軸と直交する軸まわりにウォーム減速機構を介した操舵系を組み込み、図39に示す操舵角 θ_s を制御することで螺旋昇降ができる。屋内の実験環境において目標速度と操舵切替制御の実験を行い、上昇時の目標速度を0.2[m/s]としたときのロボットの位置と速度の追従を図40(a)に示す。速度のPI制御で能動車輪を制御している。目標値をDesiredで、4か所のモーター回転と車輪の外径から求めた位置と速度の平均値をWheelで、能動車輪の上昇距離を3次元位置計測器(OPTOTRAK)の測定を3D-measureでそれぞれ示す。位置は3D-measureとWheelはほぼ一致しているが、Desiredとは誤差がある。目標昇降高さ1.25[m]に対し約0.1[m]の位置誤差が生じている。速度は3D-measureとWheelとも漸近的に目標速度に収束している。下降時の位置追従を図40(b)に示す。測定条件は上昇時と同じとする。位置追従ではDesiredとWheelはほぼ一致しているが、3D-measureとは差が生じており車輪の滑りが起きている。1[m]の直動上昇の後、操舵角を与え螺旋上昇に切り替えている時の上昇変位を図40(c)に示す。Wheelと3D-measureとは差があるものの車輪の軌道がほぼ一致している。

能動車輪に操舵系を設け操舵制御を行うことで、直動上昇から螺旋上昇への切り替えを実現し、これにより枝打ちをしない区間は直動昇降、枝打ちをする区間は螺旋上昇に切り換える枝打ち方式が確立し高速化を可能とした。

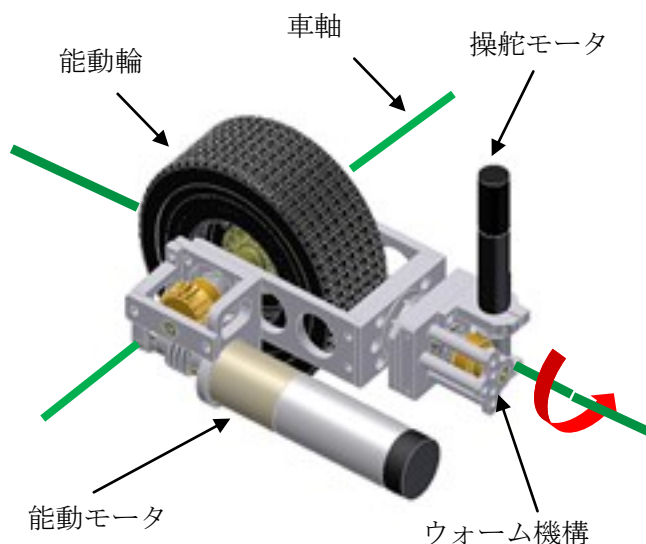


図38 操舵機構の構成

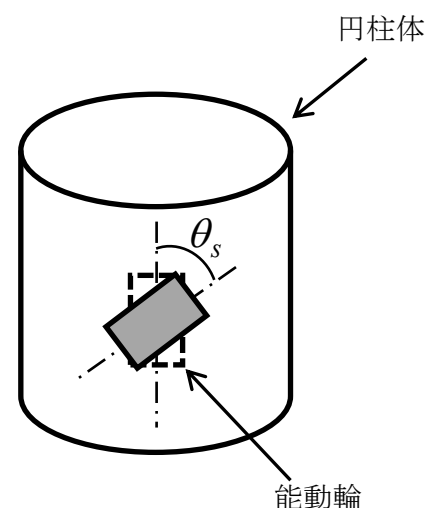
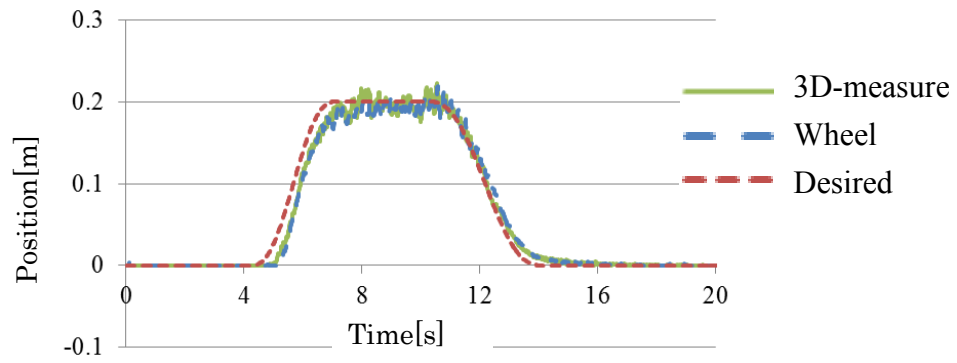
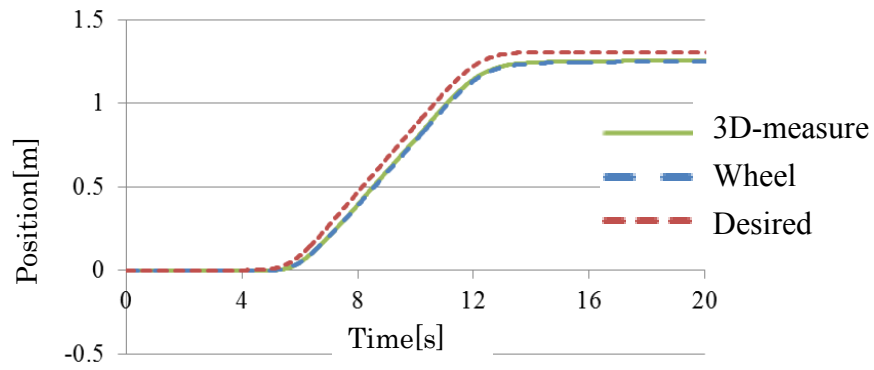


図39 操舵角度

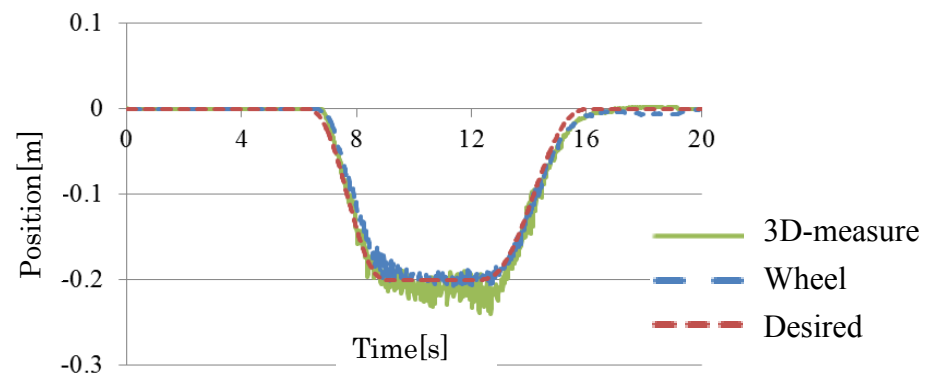


(1)Velocity

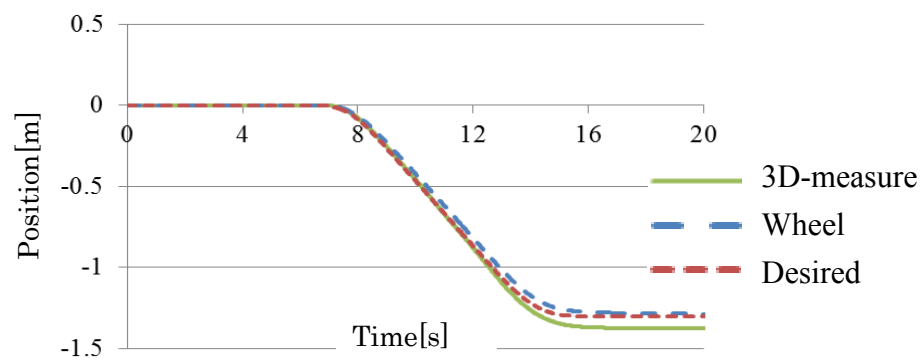


(2)Position

(a) 直動上昇

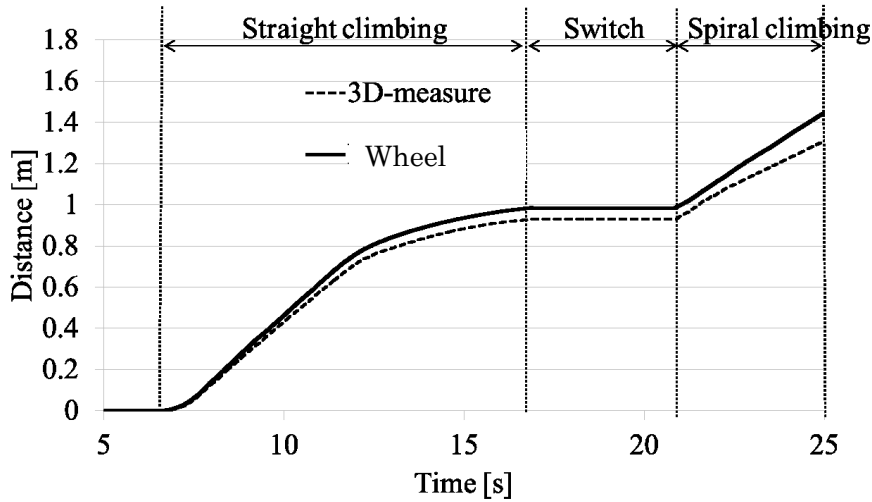


(1)Velocity



(2)Position

(b) 直動下降



(c) 上昇変位

図 40 昇降切替の実験

4.5 姿勢調整機能

本項では動力枝打ち機は機体と刃物の取付け角が固定であり、機体が傾くと切断位置が定まらず樹表面を削ったり枝を切り残す。また、能動輪に過大な負荷がかかり操舵ができない状態に陥る。この問題を解決する手法について述べる。

4.5.1 コンセプト

樹幹は梢端に近づくほど幹の直径が細くなり円錐形状をしている。この樹幹が次第に細くなることを「細り」と呼んでいる。一般に杉や檜の人工林は、下部から上部に向かい 1m 高くなると凡そ 0.01m 程直径が小さくなる細り^[41]がある。円錐状の柱を昇降するとき、昇降につれて機体が傾くことで、タイヤ接地状態に悪影響を及ぼし、操舵の不具合や昇降停止といった問題を生じる。図 41 に示すように、直径 D の円錐の下部において水平に設置したとしても、上部では細くなってその外形が D' と細くなるとすると、機体は水平面に対して角度 θ 傾く。ここで $d = D'/D$ 、 $h = H/D$ とおくと、 $d > \sin \sigma$ のとき図中の H' は $H' = \sqrt{1 - d^2 + h^2} D$ となり、機体の傾きは

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - d^2 + h^2}}{d^2 - \sin^2 \sigma}\right) - \tan^{-1} \frac{h}{\cos \sigma} \quad (7)$$

と表される。傾きが大きくなり $d \leq \sin \sigma$ のときは、二つの車輪の間に円柱が入り込む。また、入り込まない前段階の傾きにおいても、操舵軸が z_i 軸と一致しないため、操舵に必要なトルクが増大する。

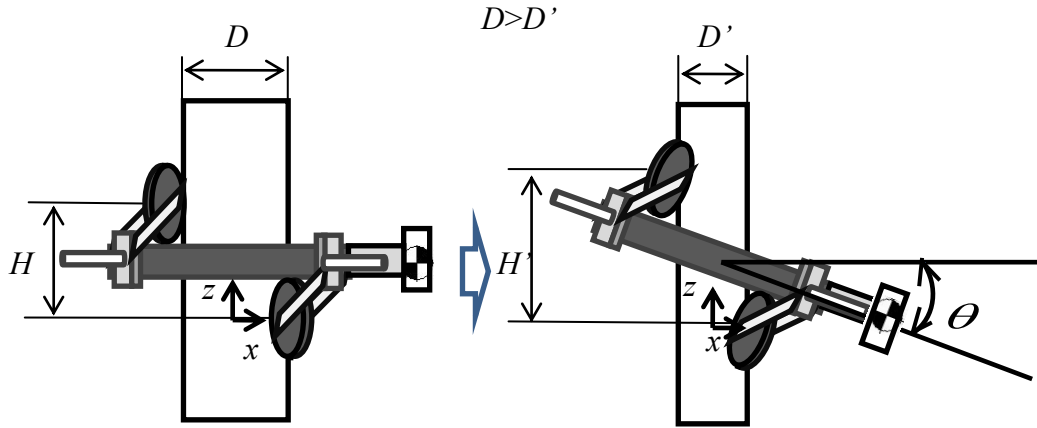


図 41 幹径の変化による姿勢変動

4.5.2 設計目標

姿勢調整機構は軽量機構で実現することが望ましく，ガイド機構では幹径の調節範囲分の送りねじ長さが必要となり，小径の場合には使わない領域が生じ軽量化の妨げとなる．このため，1 自由度のリンク機構とする．図 38 に示す一点鎖線で表した基準配置線に沿って能動車輪が平面運動し，さらに円柱との接触点での車輪の基準配置線に対する大きな変化がないことが望ましい．しかし，能動車輪の平面内での位置と姿勢には 3 自由度あり，1 自由度機構で調整することにおのずと限界がある．そこで，次のリンクの設計方針を定めた．ただし，同図において，O は円筒に設置した座標原点， O_0 はアーム原点， C_{max} は最大径 D_{max} のときの車輪接触点， C_{min} は最小径 D_{min} のときの車輪接触点， C_{mid} は C_{max} と C_{min} との中点， P_i ($i=max,min,mid$) は各 C_i のときのリンク 1 の先端位置， β は車輪のリンク 2 への取り付け角度である．

- 1) 外力に対抗できる車輪配置を維持するため，基準配置線と接触点での法線とのなす角度をずれ角 λ と呼び， $\pm 5 \text{ deg}$ 程度を目標とする．
- 2) 車輪の片当たりを避け接触面積を確保するため，接触点での法線に対する車輪姿勢の変化 φ を $\pm 5 \text{ deg}$ 程度を目標とする．
- 3) アーム関節に必要なモーメントを少なくし，軽量化を図るため，第 1 リンクと第 2 リンクのアーム長の総和を可能な限り短くする．
- 4) 第 1 リンクはモータで，第 2 リンクは図 43 に示す 4 節閉リンク機構により駆動する．これらの設計要件を満たすため，次の手順でリンク機構の長さを決定することとした．
 - a) 接触点 C_{max} , C_{min} において，能動車輪の許容する姿勢変化量 φ ，基準配置線との許容ずれ角度 λ ，リンクのベース座標原点位置 O_0 を与える．
 - b) 能動車輪とリンク 2 のなす角度 β を与え，各 C_i ($i=max,min,mid$) に対応するリンク 1 の先端位置 P_i を求め， P_{max} と P_{mid} の垂直二等分線と P_{min} と P_{mid} の垂直二等分線との交点がアーム原点 O_0 となるようにリンク 2 の長さ l_2 を求める関係式を導く．
 - c) リンク 1 の長さ l_1 を求め，アームの全長 $l = l_1 + l_2$ を最少とするように， β を探索により求める．

- d) $P_i (i=\max, \min, \text{mid})$ を通過するリンク 1 の角度 q_1 , $C_i (i=\max, \min, \text{mid})$ を通過するリンク 2 の角度 q_2 を求め、4 節閉リンク機構の長さを設定する。
- e) 円筒の外径と車輪姿勢の変化 φ とずれ角 λ との関係性を求め、許容範囲内なら終了し、そうでなければ、アームベース座標原点位置 O_0 を再調整し、a) に戻る。

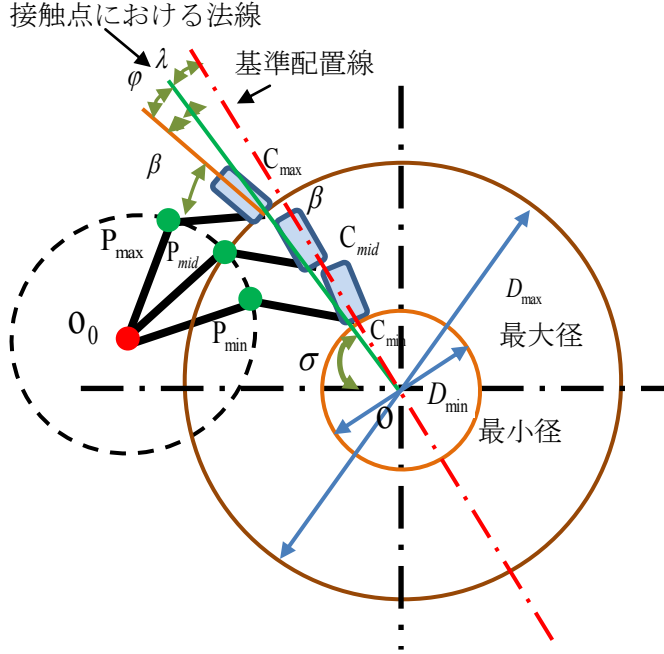


図 42 姿勢調整機構のモデル

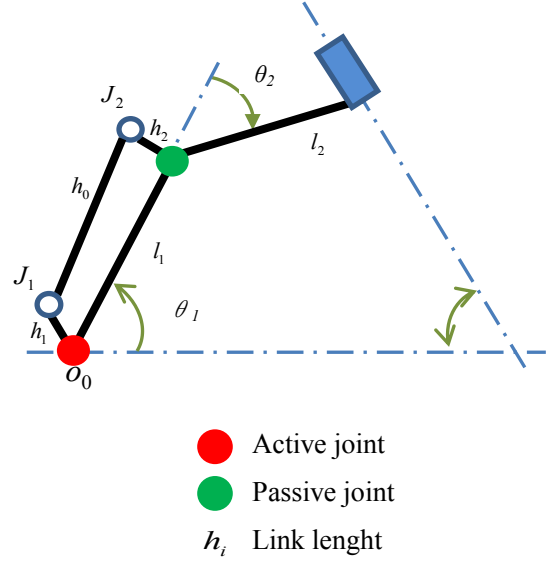


図 43 4 節閉リンク機構

4.5.3 シミュレーション

ロボットでは、最大径を 250mm、最小径を 60mm、基準配置角度は車輪を円周に均等配置する $\pi/4$ 、アームベース位置座標を $(-180, 23)^T \text{mm}$ として、全リンク長と車輪取り付け角 β との非線形な関係式を数式処理 Maple を利用して導いた。なお、アームベース位置座標は、座標原点から離れるにつれ、車輪姿勢変化 φ 円とずれ角 λ を抑えることができるが、リンク長が長くなる傾向にある。そこで、リンク全長を短くするため、筐体への取り付けスペースの制約を考慮した上で最も原点に近い点とした。このときの車輪のリンク 2 への取り付け角度 β とアーム全長との関係を図 44(1)、総リンク長さと姿勢変化 φ 円とずれ角 λ の絶対値最大値 $|\varphi|_{\max}$, $|\lambda|_{\max}$ との関係を図 44(2) に示す。アーム全長と最大角度変化は相反する関係にある。車輪取り付け角度 β を大きくすると、リンク長さが短くなり軽量化となるが、車輪姿勢が悪化する。そこで、実際の設計では、 $\beta = \pi/10 \text{ rad}$ とし、 $l_1 = 98.4 \text{ mm}$, $l_2 = 86.9 \text{ mm}$ とした。このとき、 $|\varphi|_{\max} = 0.058 \text{ rad}$, $|\lambda|_{\max} = 0.086 \text{ rad}$ である。4 節リンク機構の受動関節 J_2 の位置は任意性があるが、小型化を図るためアーム関節 2 の近傍に配置するとし。図 43 に示すリンク長は $h_0 = 78.1$, $h_1 = 41.0$, $h_2 = 31.6 \text{ mm}$ とした。求めたパラメータに対し、円筒

径と関節角度の関係を図 45 に示す。第 1 関節角度は円筒径にほぼ正比例して変化し、第 2 関節角度は負比例している。また、円筒径に対して、能動車輪のずれ角 λ と姿勢の変化 ϕ を図 46 に示す。円筒径により車輪の姿勢は変化するが、設計要件をほぼ満たしている。

本設計法は、試行錯誤的な計算を一部に必要とするが、1 自由度機構で 3 自由度の平面運動を生成できる有用な設計法である。

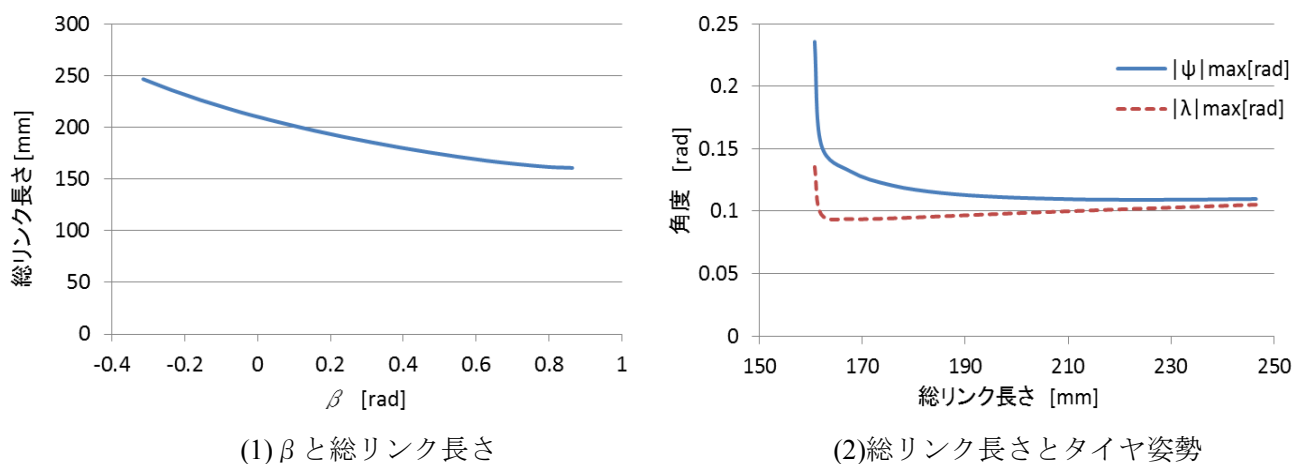


図 44 リンク長さと姿勢の関係

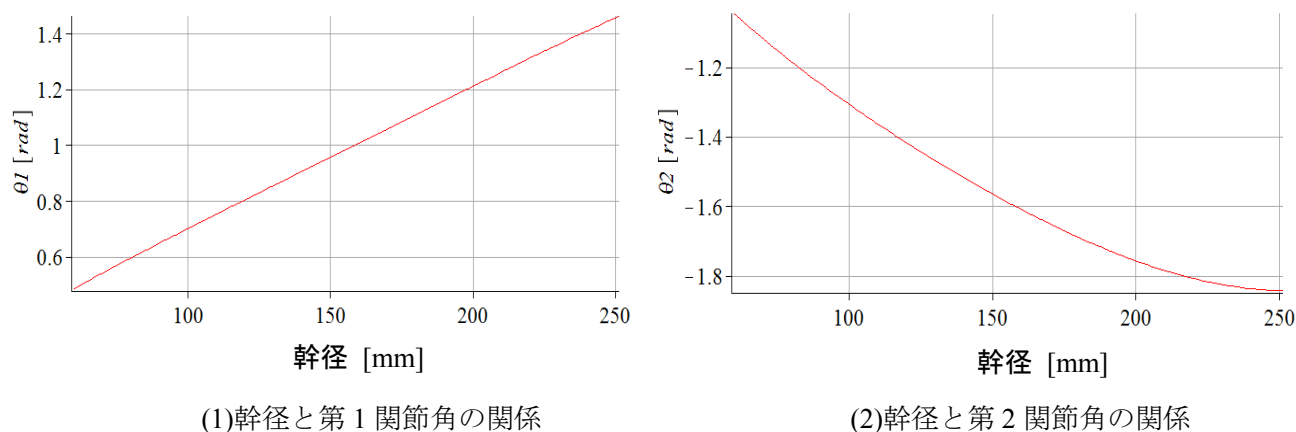


図 45 幹径と関節角度の関係

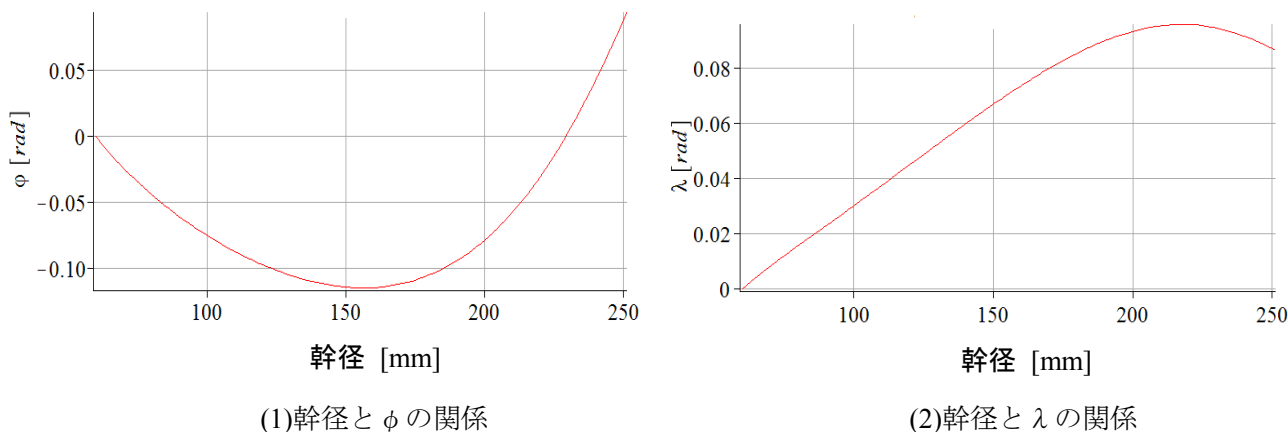


図 46 幹径とタイヤ姿勢の関係

4.5.4 試作した姿勢調整機構

機体の傾きを解消するため車輪の位置を可変する機構には，主にガイド機構とリンク機構が考えられる．ガイド機構では幹径の調節範囲(6～25[cm])分の送りねじ長さが必要となり，小径の場合には使わない領域が生じ軽量化の妨げとなる．一方のリンク機構では車輪部が可動するため剛性が課題となる．

そこで，図 47 に示すように，1つのモータで左右の2リンクアームを駆動し，アーム先端に装着した能動車輪を柱の中心方向に動かすことできる姿勢調整機構を試作した．アーム機構は，上部と下部にそれぞれ設置する．モータの回転により能動車輪を柱の中心方向に動かすことで，対抗する車輪間の距離が短縮でき，機体の傾きを調整できる．モータはバックドライバビリティのないウォーム減速機構を介してアームの関節を駆動するため，エネルギー消費をすることなく静止ができる．

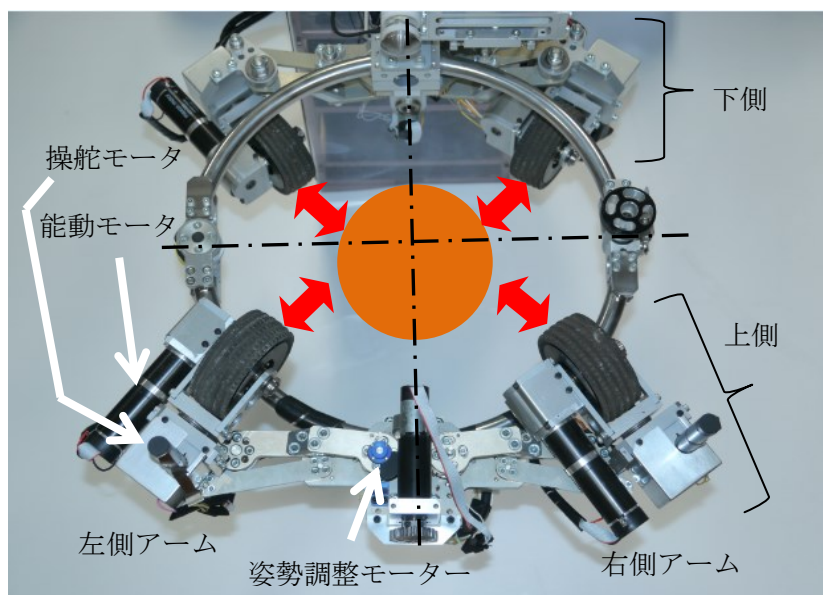


図 47 姿勢調整機構

4.5.5 制御法

ロボットの傾きは姿勢センサで計測するとする．この時，螺旋上昇時において樹表面と刃物の距離間隔を維持し易くするため，樹径に対して機体の傾きを一定に保つ必要からロボットの機体中心軸と幹の中心を一致させる姿勢制御法として，1)上下のアームとも目標姿勢を零とする姿勢制御，2)現在の姿勢から目標アーム角度を求め，アーム角度制御が考えられる．しかし，前者は姿勢を零に調整できても，ロボット機体の軸と円筒の軸が一致しないことが生じる．後者は姿勢からアーム角度の逆運動学計算が複雑である．これらの問題を解決するため，上下の一方のアームを主アームとし，姿勢の PID 制御を施し，他方を従ア

ームとし、主アーム関節角度を目標とするアーム角度の PID 制御とする。図 48 にブロック線図を示す。上側の姿勢調整機構は目標とする姿勢とロボットの姿勢の誤差、下側の姿勢調整機構は上側の姿勢調整機構のモータの回転角度を目標値とするモータの回転の誤差をフィードバックする PID 位置制御を採用した。姿勢センサは、3 軸加速度センサ 3DM-GX3-25 (MicroStrain, Inc.製) を採用し図 49 に外観、表 16 に仕様を示す。この制御法を実装した姿勢調整機構の予備実験を行った。図 50(a)に示す通り、赤線を目標角度とし、傾きのある状態で樹木に昇降機構を取り付けた。なお、実験に用いた樹木はスギ、幹径は 250[mm]、胸高(1.2[m])とした。図 50(b)に示す通り、機体姿勢の改善が確認され有効性を示した。

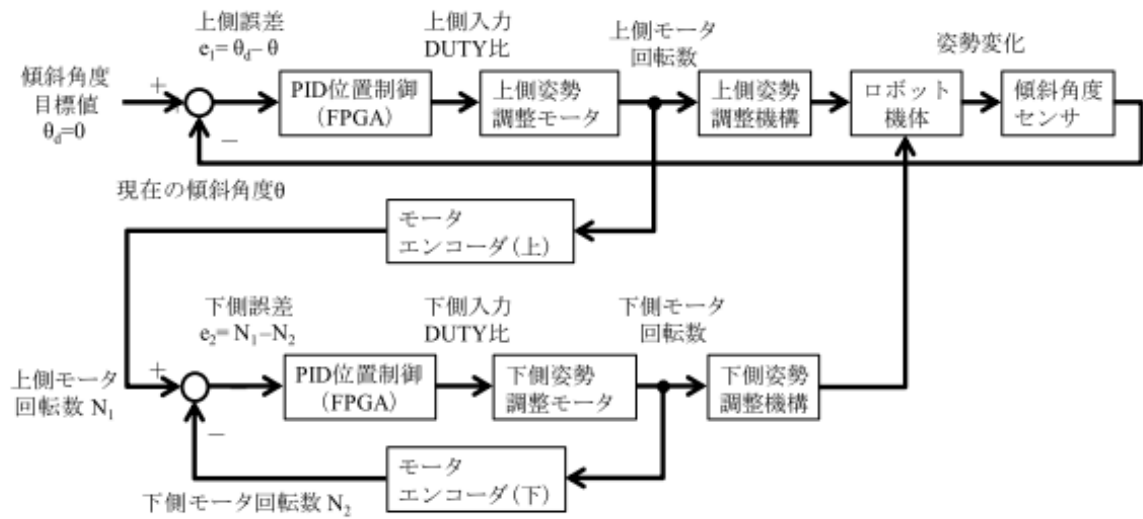


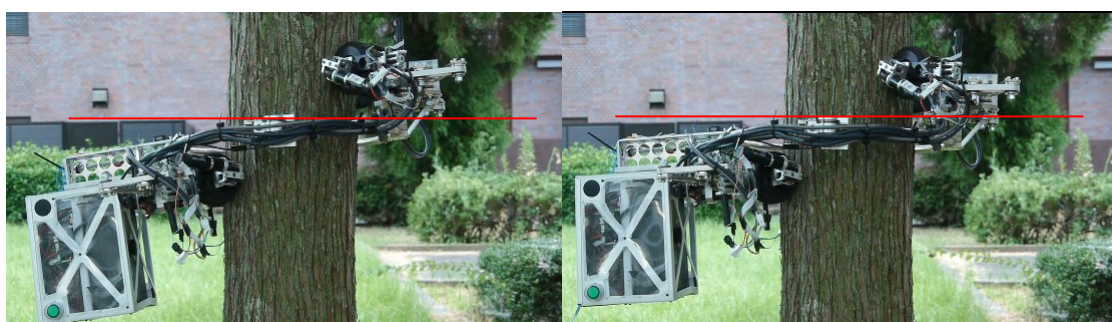
図 48 姿勢調整制御プログラムブロック線図



図 49 外観

表 16 3DM-GX3-25 の仕様

計測範囲	±180 [deg]
計測軸	X,Y,Z 軸
分解能	0.1 [deg]
静的精度	±0.5 [deg]
動的精度	±2.0 [deg]
重量	18 [g]



(a) 実験前

(b) 実験後

図 50 実験の様子

4.5.6 評価実験

予備実験の結果を踏まえ、姿勢調整機構を枝打ちロボットに実装し、定量的な細りを持つ円錐柱体を用いた屋内環境による評価実験を行った。円錐柱体の外観を図 51 に示す。材質は強化段ボール製とし、表面に樹木の表皮と同等の摩擦係数を持つ壁紙を糊付けしたものとし、実験条件を直動上昇距離 0.9[m]、直動上昇速度 0.2[m/sec]とした場合の姿勢調整機能の有無による機体姿勢とモーターの追従性を評価対象とする。実験結果を図 52 に示す。グラフの縦軸は傾き角、破線(赤色)は目標角度、実線(緑色)は機体の傾き、枠囲みは直動上昇区間を表す。図 52(a)の姿勢調整制御無しの状態では、柱体取付け時の傾き $-0.5[\text{deg}]$ から上昇終了時には $-5.8[\text{deg}]$ まで傾きが大きくなった。一方の図 52(b)に示す姿勢調整制御有り状態では、柱体取付け時の傾き $-0.3[\text{deg}]$ から一旦は $-1.0[\text{deg}]$ まで傾きが大きくなるがその後、改善され終了時には $-0.5[\text{deg}]$ となった。このことから細りのある状態において、姿勢制御が機能し機体姿勢を維持している。

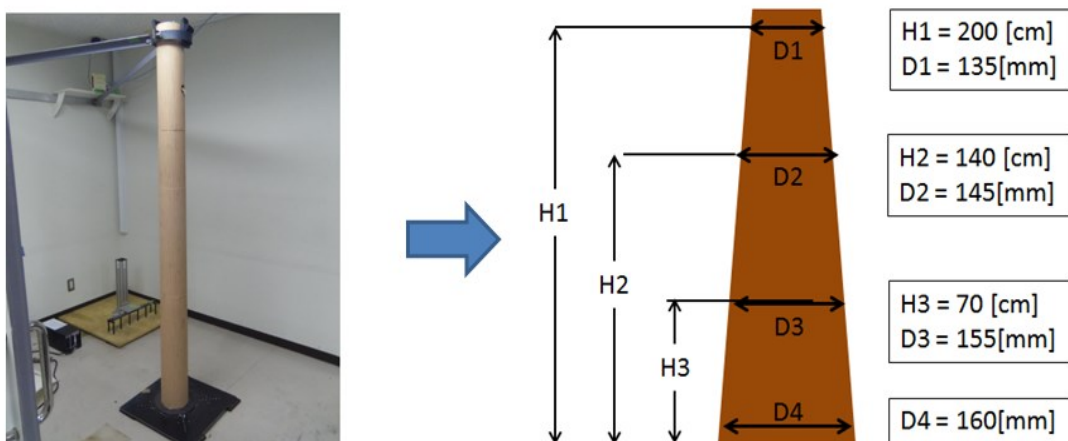
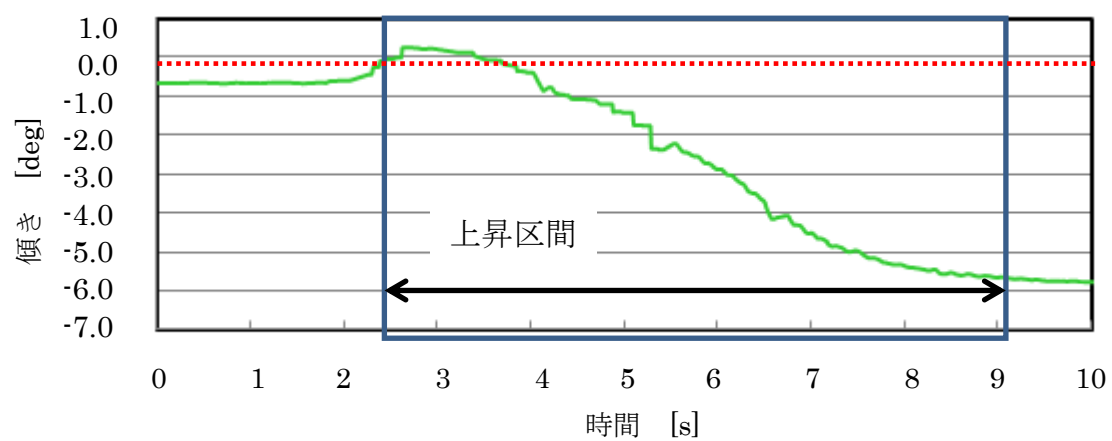
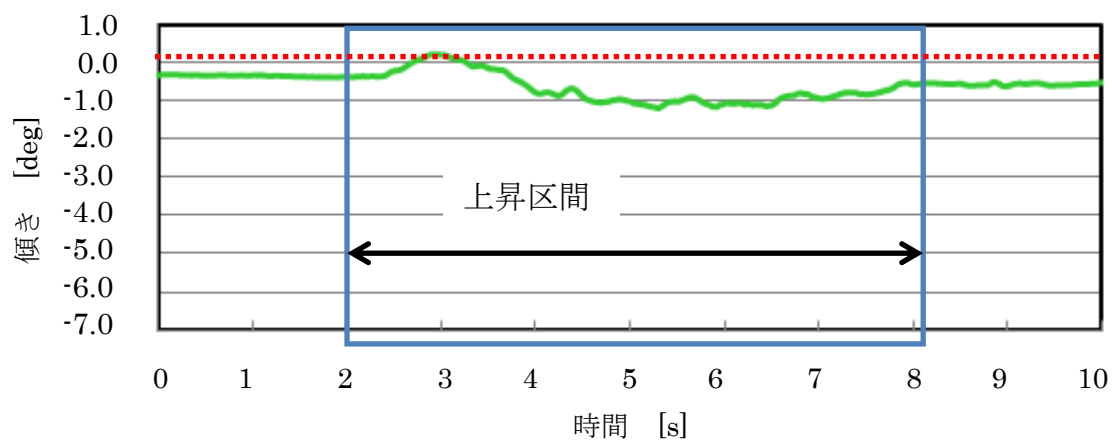


図 51 細りを持つ円錐柱体



(a) 姿勢調整制御 無し



(b) 姿勢調整制御 有り

図 52 実験結果

4.6 枝噛み防止機能

本項では枝の生え方や撓み方によって生じる枝噛みの原理を説明し、この問題を解決する手法について述べる。

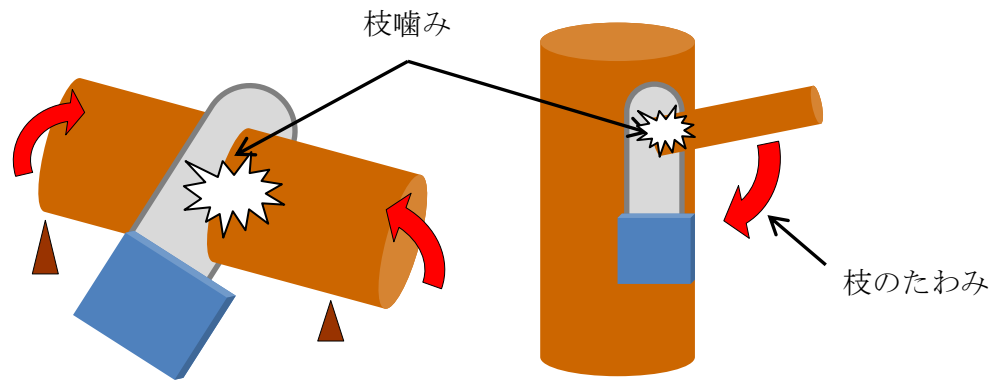
4.6.1 枝噛みの原理

枝噛みとは、切断中に枝が自重でたわみ、切断機構が枝に挟み込まれることである。一般的に枝は、太陽光が入る方向へ向かって成長していくため、様々な方向に曲がる。そのため、枝の重心は枝によって異なり、必ずしも真下にたわむとは限らない。枝打ち作業や伐採後の枝払いなどの作業には小型のエンジンチェーンソーがよく使われている。林業従事者がチェーンソーを用いて枝打ちや枝払いなどの作業をする場合、チェーンソーが噛まないように枝の撓り具合に応じて持ち手や立ち位置をかえたりして切断する方向を工夫している^[32]。チェーンソーをロボットに搭載するときは、切断方向が一方方向のため枝噛みが生じる可能性が高い。また、枝を切断する時は円軌道に沿うため、切り口を押し広げる力が生じる(図 53(a),(b))。枝噛みの発生と過大な押し広げ力が起こると、ロボットは樹上で動作不能となる。

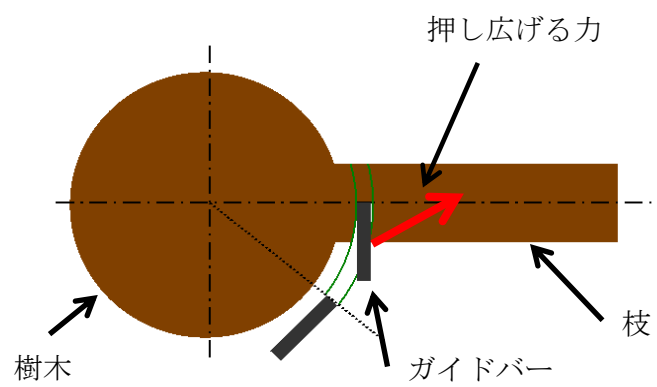
枝打ち時に、枝がチェーンソーガイド板を挟み込まれる枝噛みの防止と、円軌道での切削時に必要な枝を押し広げる力を低減するため、図 54 に示すように、ガイドバーに対して平面運動する枝噛み板を設けた枝噛み防止機構のコンセプトを考案した。枝がガイドバーより先に可動板を挟むように設計することで、枝噛みにおいてもガイドバーの運動が拘束されず、切り進むことができる。枝噛み板は、ガイドバーとバネで平面運動が可能のように保持されている。

本機構は枝噛み板、レールとスプリングから構成され、ガイドバーとレールは蝶番を介して取り付けられており、枝噛み板は上下のレールに案内される。枝噛み板は初期位置を維持するため、ワイヤを介してスプリングと連結されている。枝が枝噛み板を噛む状態では、ガイドバーが円周方向で枝を切り進むにつれ、枝噛み板がガイドバーから外れ、蝶番によって切削の円軌道に沿い、最小半径でも最大半径でも自在に作動することができる。

また、通常の使用ではチェーンソーは直動運動で枝を切る。このとき、枝を切り開く力は必要としない。一方、ロボットが樹の周りを回転運動しながら枝を切るときは、チェーンソーの刃幅以上に枝を切り開くための力が必要となる。この力を大きく低減できるように、図 55 に示すように、可動板がチェーンソーの回転半径に応じてチェーンソーガイド板に対し旋回するチルト機構を設けた。この構成により、枝噛みが殆ど発生することなく、また枝を切り開く力も殆ど生じないことを実験的にその効果を示している。



(a)枝噛み現象



(b)押し広げ力

図 53 枝噛み

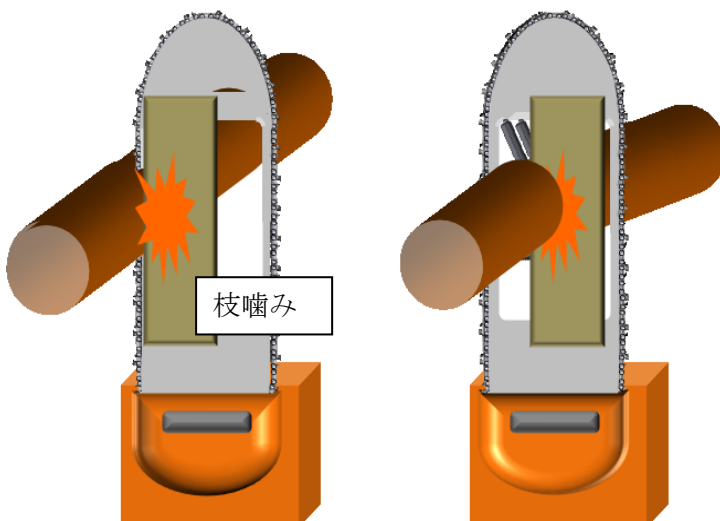


図 54 コンセプト

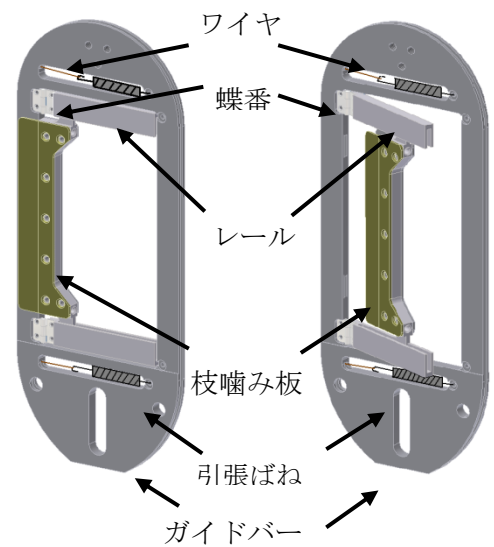


図 55 構成

4.6.2 予備実験

ここでは、前述の枝噛み防止機構の原理の有効性を確かめる予備実験を行った。図 56 に示すように、小型エンジンチェーンソー(新ダイワ工業社製:E1227TS)のガイドバーに枝噛み板がワイヤーを介してスプリングに連結されるしくみを組み込み、表 17 に製作仕様を示す。

図 57 に示すように、切断する枝の両端を支えた両端支持で枝噛みを再現し、枝噛み板の有無による比較を行った。支持の間隔は 400[mm]とし、枝材は直径 ϕ 18～ ϕ 50 を用意した。チェーンソーは直下に切り落とし、切り進まなくなった時点で終了、切り残し量を工学ノギスで計測した。なお、枝噛み防止機構は枝径 ϕ 36～ ϕ 38 までに適用する設計となっている。

比較実験の結果を表 18 に示す。枝噛み板無しの場合はガイドバーのほぼ中央付近で枝噛みしており、一方の枝噛み板有りの場合は設計通り機能し、直径 ϕ 39[mm]の枝まで適用していることがわかる。この実験を通じて図 54 に示す原理は有効である。



図 56 エンジンチェーンソー装着

表 17 製作仕様

ガイドバ	長さ:250[mm], ゲージ:1.27[mm] 相当 材質:合金工具鋼(SKS)
チェン	タイプ:25AP, ピッチ:6.35[mm] 刃幅:6.0[mm]
スペーサ	長さ:75[mm], 幅:6.5[mm] 材質:SUS304(表面硬化処理)
ばね	定数 2.16[N/mm], 初張力 2.55[N]
ワイヤ	線径: ϕ 1.0, 材質:SUS304
その他	ノーズスプロケットの装備 ラミネート構成による溶接構造
適用枝径	ϕ 36～38(設計値)



図 57 実験環境

表 18 枝径と切り残しの関係

枝径[mm]		18	20	21	23	24	28	31	33	35	39	46	48	50
切り 残し [mm]	枝噛み板 無し	0	0	0	0	3	8	9	13	13	17	-	-	-
	枝噛み板 有り	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	11	14

4. 6. 3 直線切削の力の釣り合い

本ロボットは螺旋上昇しながら枝打ちをする．この際，残枝長を短くするには幹表面に沿って枝を切断する必要がある，切断中の枝の切り口は円軌道状の溝となる．このため，平面のガイドバーでは枝を押し広げる送り力をロボットが必要とする．枝が太くなるとこの力が大きくなり送りが停止することになる．そこで，チェーンソーによる直動切削とロボットによる円軌道切削にかかる力の釣り合いを考察する．

まず，直動切削について，枝噛みが点 C で発生した直線切削のとき，図 58 に示す力が働く．切り進むために必要な力を F_C ，枝噛み時のガイドバーに生じる摩擦力を F_f とおくと，ロボットに必要な駆動力を F_D は次式であらわすことができる．

$$F_D = F_C + F_f \quad (8)$$

F_C はチェーンソー切削方向の速度 v ，チェーンソーの切断面の断面積 S_c に比例し

$$F_C = \alpha S_c v \quad (9)$$

と表せる．ここで α は枝の硬さや刃の切れ具合などで決まる被削性の係数である．この力は枝噛みが生じていないときに必要な機体の駆動力である． F_f は枝とガイドバーとの摩擦係数 μ と枝がチェーンソーガイドを噛む力 F_b に比例し

$$F_f = \mu F_b \quad (10)$$

と表せる．枝を噛む力 F_b は切断過程や枝葉の生え方，そして，ロボットの螺旋上昇角による質量中心の変動によって異なる．枝を切り終わる直前で重力方向に反した方向からの切断した時が最大の値である．簡単化するために重力方向はチェーンソー走破方向と直交し，枝噛みは枝の切り口の一点で作用する噛む力で生じ，切り終わる枝部分がヒンジとして作用するものとする．この時，チェーンソーから枝の質量中心までの距離を l_m ，枝の半径を r ，枝表面から F_b が作用する点 C までの距離を l_c ，枝の質量 M ，重力加速度を g とおくと，モーメントの釣り合いにより

$$F_b = \frac{l_m Mg}{l_c} \quad (11)$$

を得る．

ここで，枝径が 50mm，質量が 5kg，チェーンソーから枝の質量中心までの距離が 1000mm，

摩擦係数 0.8 とした時，接触点までの距離が $l_c = 2r$ のとき， F_f は 784N となり，大きな摩擦力が生じることが分かる．実際は， $l_c < 2r$ となるので，より大きな摩擦力が生じる．

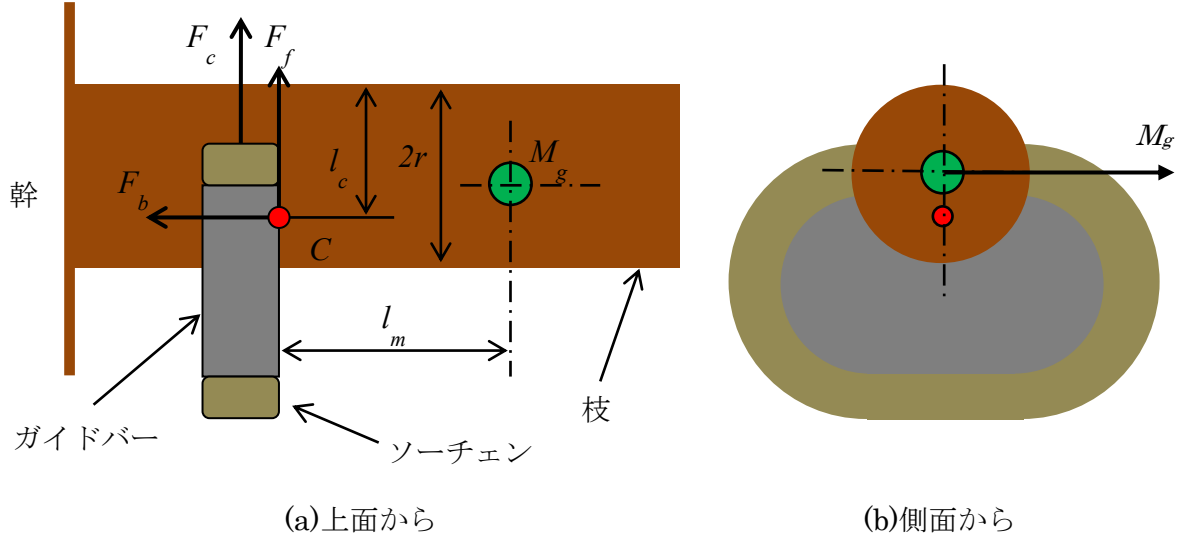


図 58 直線切削

4.6.4 円軌道切削の力の釣り合い

次に円軌道切削について，図 59 に示すように，円軌道に沿って回転して枝を切るとき，枝噛みが生じていなくてもチェーンソーガイドバーは枝の切り口点 C で接触する．このため，切り口を点 C* に Δx 押し広げる力 F_o が必要である．樹が円筒で，枝が円筒表面の法線方向に延びているとし，円軌道の半径を R_T ，点 O を円軌道の中心、点 C を円軌道の最初の接触、点 C* を切り込み量 l のときの接触点、点 A をチェーンソーの右切断点、接触開始からの円軌道の回転角を θ 、直線 OC が x 軸となす角度を η 、 F_o と x 軸となす角度 γ とする。

切り口を押し広げる力 F_o は，片持ち梁の先端に荷重が作用するときの撓みの関係から求められる．図 60 に示すように，枝は切り口の幅 W の長さの片持ち梁とみなせる．変位 x で作用する曲げモーメントを M_x とすると，撓角 φ は

$$\varphi(x) = \int_0^x \frac{M_x}{EI_z} dx = \int_0^x \frac{F_o r \cos \gamma}{EI_z} dx = \frac{F_o}{EI_z} x r \cos \gamma \quad (12)$$

と表せる．ここで， E は枝のヤング率， I_z は枝の切断面の中立軸に関する慣性モーメントである．角度 γ は

$$\gamma = \theta - \eta = \sin^{-1}\left(\frac{l-r}{R}\right) \quad (13)$$

である．図中の点 A での撓角 φ_A は

$$\varphi_A = \varphi(W) = \frac{WF_o}{EI_z} r \cos \gamma \quad (14)$$

この撓角は押し広げるべき角度であり、初期接触点でのチェーンソーの角度から切り込み量 l のときの角度と一致するため

$$\varphi_A = \gamma + \eta = \theta \quad (15)$$

と表せる。以上より、必要な力は

$$F_o = \frac{EI_z(\gamma + \eta)}{Wr \cos \gamma} \quad (16)$$

と表せる。なお、撓角 φ_A は、値が小さいときはほぼ l に比例するので、力 F_o もほぼ l に比例するといえる。次に、駆動トルクと等価推進力を求める。ガイドバーには、 F_o による摩擦力 F_f が作用し

$$F_f = \mu F_o \quad (17)$$

と表される。切り進むときは、動摩擦であり、 $F_o \sin \gamma$ と釣り合うか、滑ると仮定する。このとき、切削力を含めた力は、回転トルクから生じるので

$$\tau_D = RF_c + rF_o \cos \gamma \quad (18)$$

と表せる。これを等価推進力 F_D' でみると

$$F_D' = F_c + (r/R)F_o \cos \gamma \quad (19)$$

このため、直動枝打ちと比較し、式(19)の右辺第2項が加わる。この項は等価押し広げ力と考える。

$$F_e = (r/R)F_o \cos \gamma \quad (20)$$

枝噛みがあるときはヒンジとして見なせるとすると

$$F_o = F_b \quad (21)$$

と表せる。

ここからロボットによる円軌道切削においては、チェーンソーガイドバーが切り口の角に接触し、さらに切り進めるには枝の押し広げ力を必要とすることを示す。

ここで、檜のヤング率 $E = 9.0 \text{ GPa} = 9.0 \text{ kN/mm}^2$ 、枝の切断面の中立軸に関する慣性モーメント $I_z = r^4 \pi / 8$ ($l = r$ の時)、樹の半径 $R_T = 100 \text{ mm}$ 、枝の半径 $r = 0 \sim 25 \text{ mm}$ 、枝の直径 $2r = 50 \text{ mm}$ 、チェーンソー刃幅 $W = 6 \text{ mm}$ 、摩擦係数 $\mu = 0.2$ のときの枝径により必要な力を数式処理 Maple を利用して導き図 61 に示す。押し広げ力 F_o は切り進むにつれて比例して増加し、枝半径ほど切り込んだとき ($l=r$) に最大となりその後減少する。

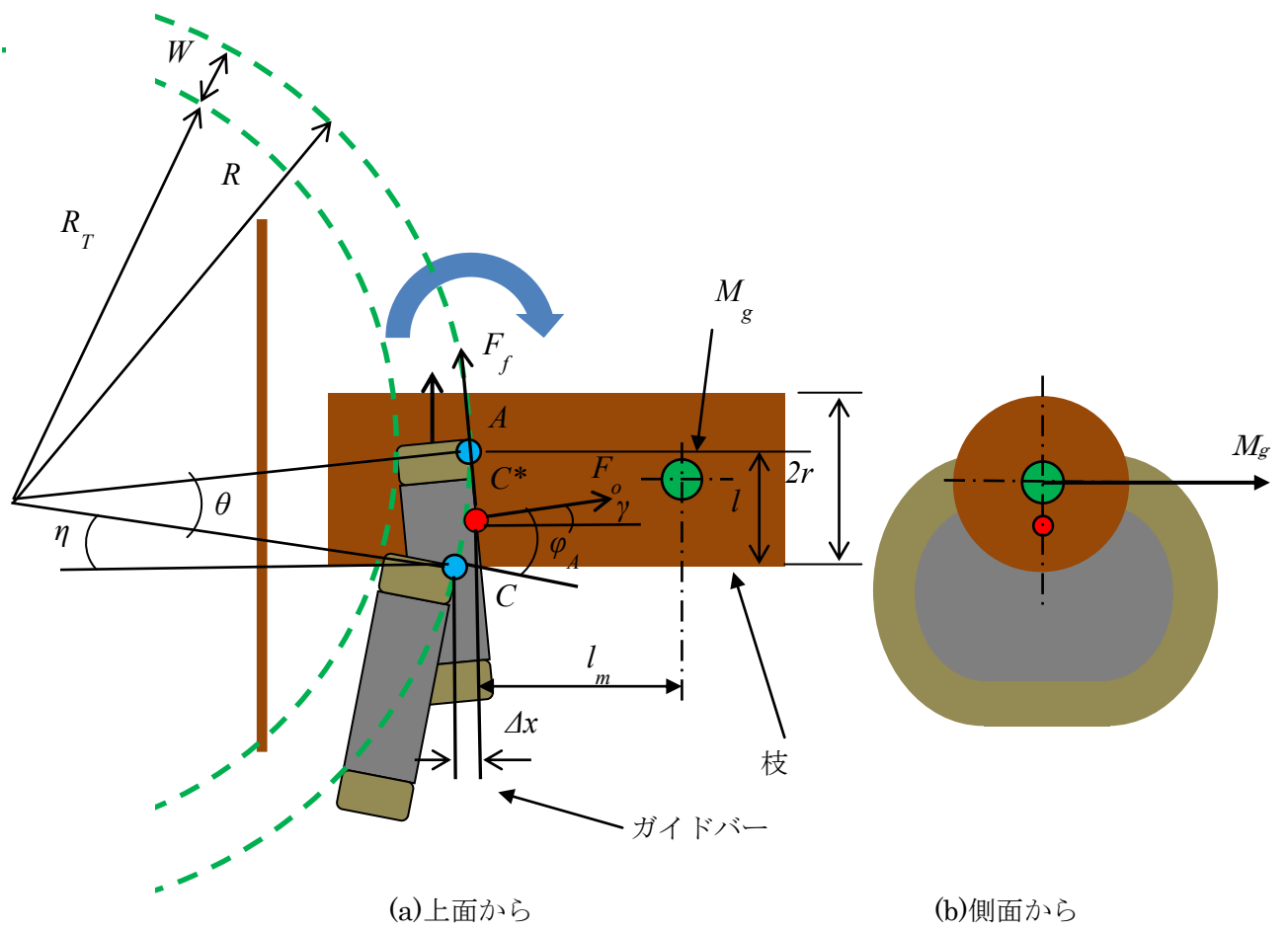


図 59 円軌道切削

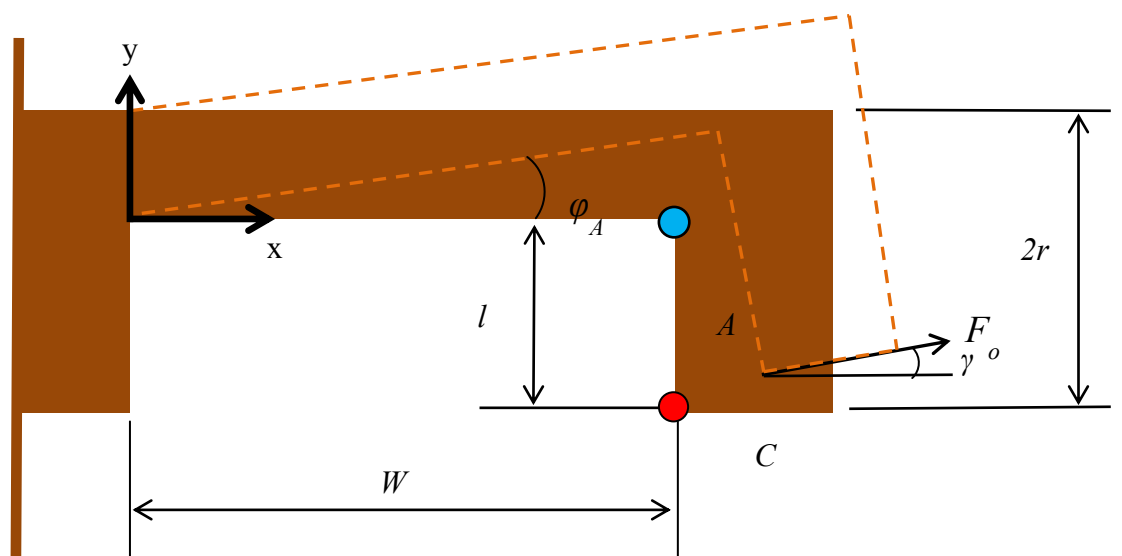
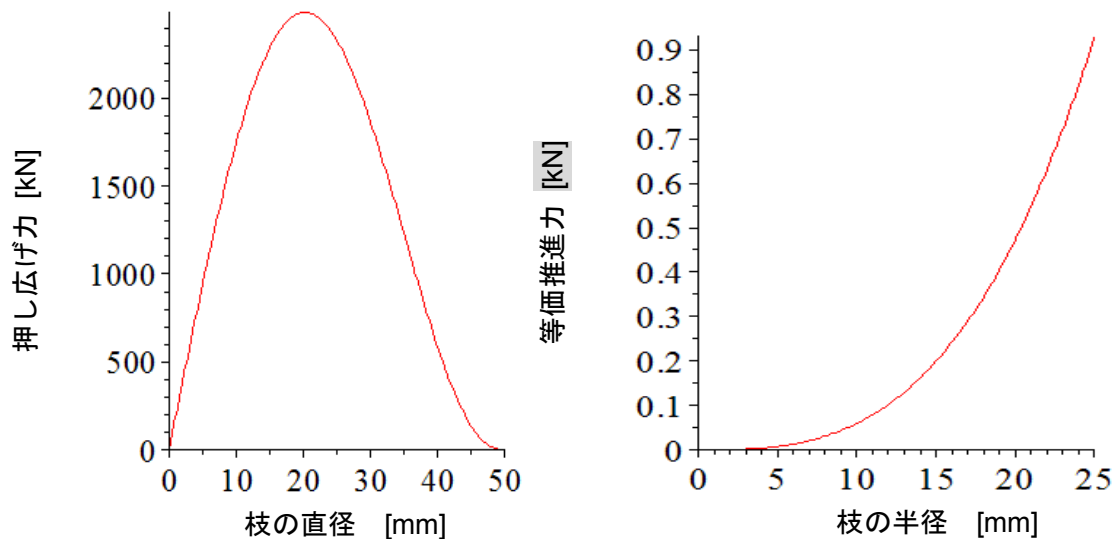


図 60 枝の撓み



(a)枝径と押し広げ力の関係

(b)切込み量と等価推進力の関係

図 61 枝径と必要な力との関係

4. 6. 5 評価実験

試作した枝噛み防止機構の円軌道切削における実験評価を行うため、図 62 に示す環状実験装置を用いた。切断機構を取り付けるキャレッジは DC モーターによって駆動され送りと与える。また、環状実験装置では環状レールの中心から切断機構の取付け位置(切削半径)を可変することができロボットが対象とする幹直径に適用している。枝は支柱に固定され端部にはアームを介して錘が吊り下げられており、大きなモーメントが生じるようにして枝噛みを再現している。なお、枝材は水分率や枝径などの条件を同一とするため、 $\phi 40$ の乾燥材で樹種はメイピサン、水分率は 6%前後(ヤング率 $13,400\text{N/mm}^2$ (参考：ヒノキ $9,000\text{N/mm}^2$))を使用し、アームまでの距離 500[mm], アーム長さ 300[mm], 錘 5[kg]とした。ガイドバーは枝噛み防止機構の有無の 2 種類を用い、この時の送りモーターと切断モーターの電流値を比較して枝噛み防止機構の評価をした。

環状実験装置での実験結果を図 63 に示す。グラフの横軸に時間[sec], 縦軸に電流値[A]とし、左側のグラフは枝噛み防止機構有り、右側のグラフは枝噛み防止機構無しを表す。これによると、11[sec]頃から切削が始まり、右側のグラフではピーク後に途絶え切断が成功しなかった。これは回路基板の過電流制限(25[A],2[sec])により停止したためである。一方の左側のグラフでは収束しており切断が成功している。これによって切削における負荷が軽減され枝噛み防止機構の有効性を示している。

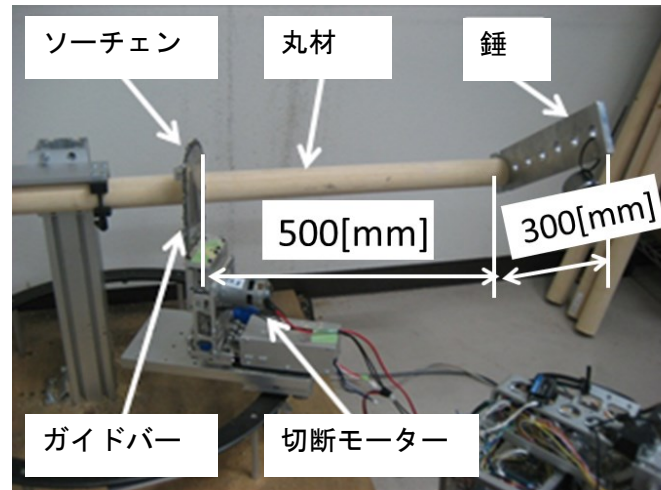
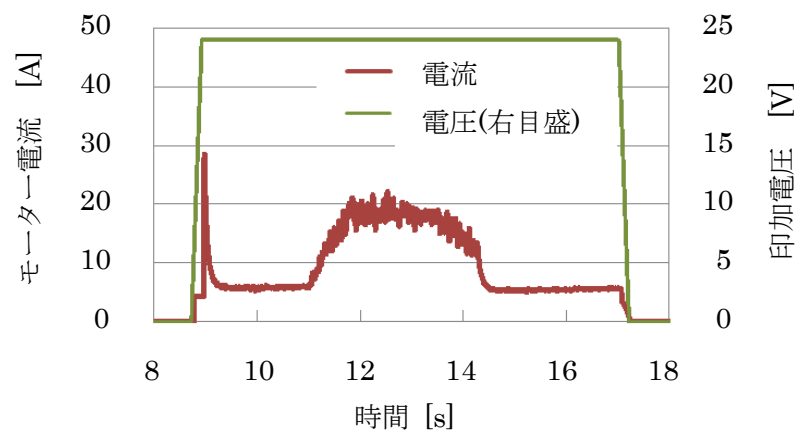
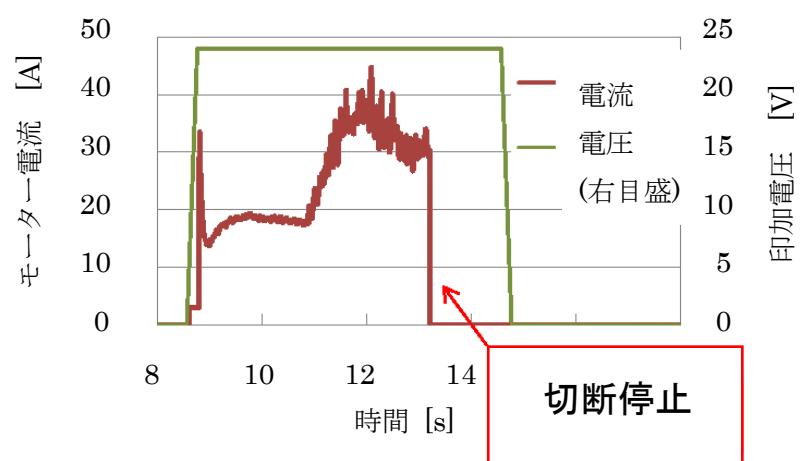


図 62 環状実験装置



a)枝噛み防止機構有り



b)枝噛み防止機構無し

図 63 実験結果

4.7 省電力化

本項ではロボットをバッテリー電源で駆動することを目標仕様の一つとしている。そこで、消費エネルギーが多い切断機構における省電力化が課題となる。この問題を解決する手法について述べる。

4.7.1 切断機構の設計

切断機構には、枝噛みが生じるために、その対策が求められる。また、樹表面を傷付けないで樹表面からの残枝長さを抑えて枝を切断することや森林環境でのバッテリー充電は困難なため省電力での枝打ちが求められる。そこで、図 64 で示すように切断部と位置・姿勢調整機構部から構成される切断機構を考案した。切断部はソーチェンを採用し、枝噛み防止機能を有している。位置・姿勢調整機構部は樹木の幹直径の変化や樹表面の凹凸による機体の傾斜に影響を受けず切断部の位置姿勢を調節することができるように、チェーンと樹表面との距離を所定に保つ直動と、ガイドバーを樹に平行に保つ回転の 2 自由度を有している。各機構は、2Watt のモーターに遊星歯車減速機構とウォーム減速機構を介して負荷を駆動している。切断部の上下にある 2 つの近接式の変位センサにより、樹表面とソーチェンの間の距離と姿勢を一定に保てる。これにより残り枝長さ 5mm 以下を実現することができた。位置姿勢調整機構は、はじめに直動により切断部の下部と樹表面との距離を調整し、その後、回転により切断部の上部と樹表面との距離を調整する。上下の接触センサは、接触量を計測し、直動移動量と回転角度を PID 制御している。

切削機構の構成要素には刃物とモーターがある。切削方法には、チェーンソー(chainsaw)、丸鋸(circularsaw)、ジグソー(jigsaw)、ルーター(router)などがあるが、枝打ちロボットへの適用性を考慮すると、切削力が高く曲面切削が可能であり、重量も比較的軽量であるチェーンソーが良い。また、モーターは市販の充電式チェーンソーの出力を参考にしてマブチモーター社製の RZ-8BAWA(推定 400Watt)とする。しかし、このモーターに流れる電流が大きい。そこで、モーターとチェーンソーとの間に 3:1 のギヤー比を設けることでチェーンソーを駆動させる電流を低下させ、省電力化を実現した(図 65 参照)。なお、ギヤー比は概略計算によるもので試行錯誤的に決定した。

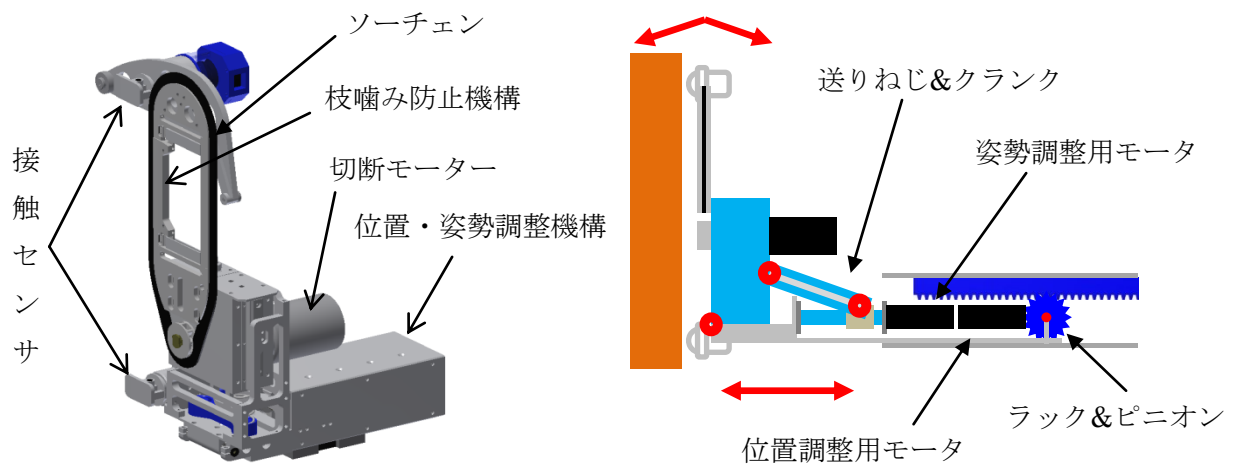


図 64 枝切断機構の構成

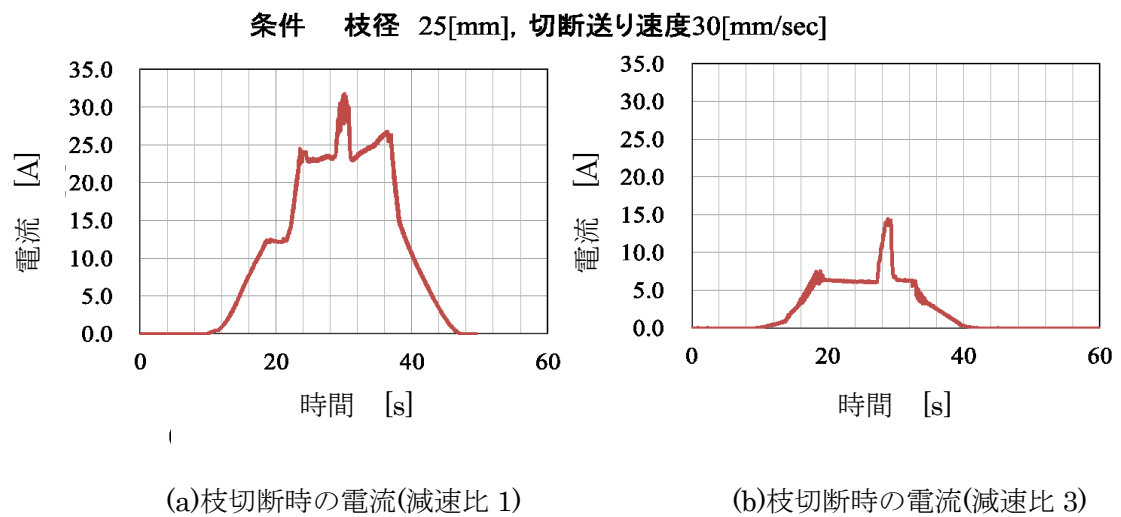


図 65 減速比の効果

4.7.2 ガイドバーの摩擦低減

チェーンソーはスプロケットを介して動力がソーチェンに伝えられ、ガイドバーの溝に沿って周回することで枝を切断することができる。ソーチェンとガイドバーとの間にはソーチェンの張力や摺動による摩擦が存在し、充電式チェーンソーの場合、モーター始動時には多大なエネルギーを消費している。市販品では先端にスプロケットの挿入や円弧状の外径形状などを工夫して摩擦低減に取り組んでいる。しかし、枝打ちロボットは切断方向が一方方向で枝を噛む問題は存在し、これを解決するための枝噛み防止機能が必要となる。そのため、市販のガイドバーと比べて幅広となり、摺動抵抗の低減が求められる。この他の機能として枝選別機能、キックバック防止機能が必要である。

図 66 に示すとおり、ガイドバーの上側に軸受機能付きのスプロケットを挿入、ソーチェンとガイドバーとの間に微小な隙間を設け先端部の摺動面を少なくした形状のガイドバーを試作した。実験環境は図 67 に示すようにマブチモーター(RS シリーズ)を搭載した機構減速比 1:1 の切断機構にガイドバーを取り付け、安定化電源(KENWOOD:PS36-40)を用いて徐々に電圧を上昇させたときの電流値を実測した。ただし、電圧の可変は人手によるものとし、その値をプロットしたグラフを図 68 に示す。この結果、摺動型の起動電流 18.67[A] に比べ試作品の起動電流は 3.58[A] と大幅な低減がされているのがわかる。しかし、試作品の方では時間経過とともに電流値が著しく上昇している。これは、試作性を重視した仕様のため、摩耗や変形が著しい個所が存在していた(図 69)。これは表 19 に示すとおり、市販品とは構造材と溝幅が異なっており、摩耗や変形を招きソーチェンの摺動摩擦を増大させたものと推察する。

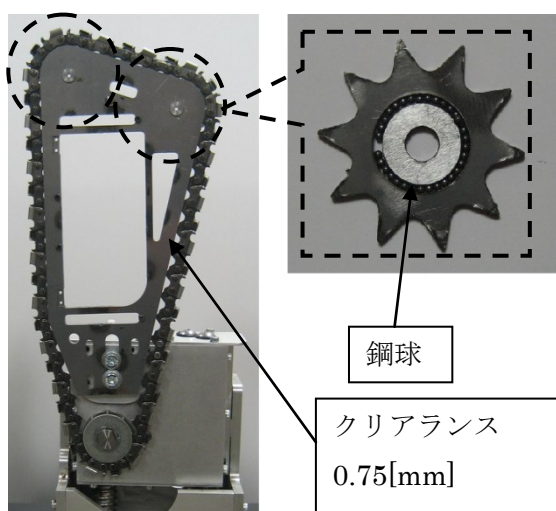


図 66 試作品

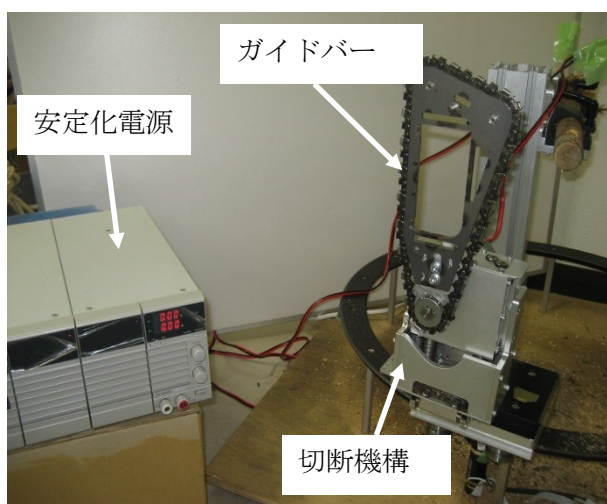


図 67 実験環境

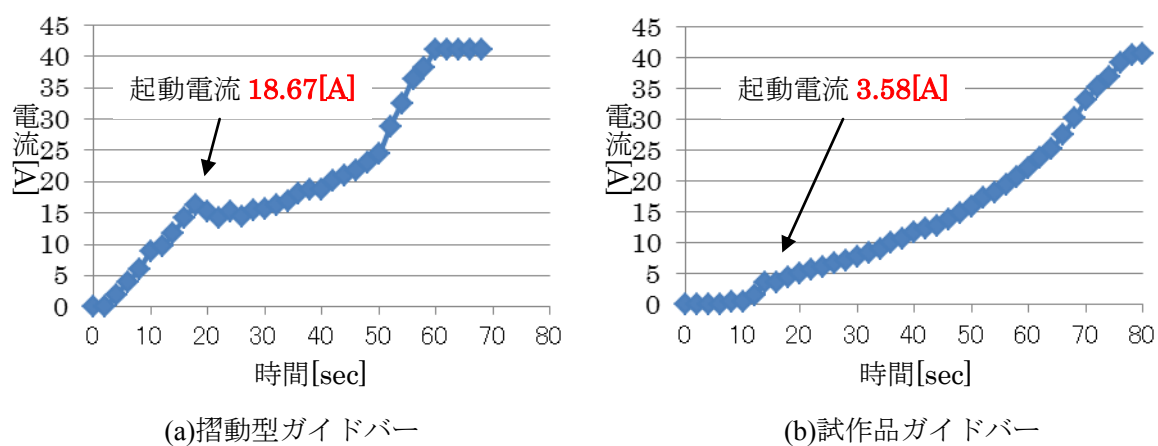


図 68 起動電流

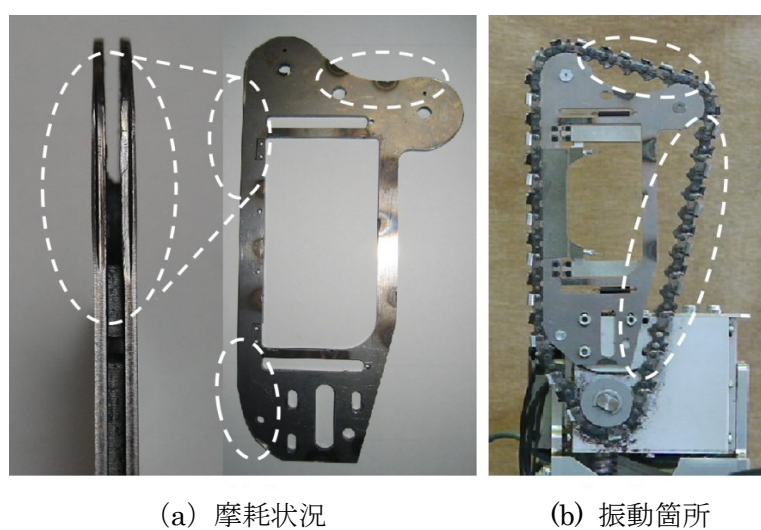


図 69 試作品の摩耗，変形具合

表 19 摺動型・試作品・市販品の製作仕様

種類	項目		
摺動型 	材料	材質	炭素鋼 JIS_S55C
		硬度(参考値)	(HV) 180 くらい
	溝幅	計測幅 [mm]	1.73~1.78 (Av.1.75)
試作品 	材料	材質	合金工具鋼 JIS_SKS
		硬度(参考値)	(HV) 200 くらい
	溝幅	計測幅 [mm]	1.58~1.82 (Av.1.69)
市販品 	材料	材質	合金工具鋼 JIS_SKS51
		硬度(推定)	焼入れ後：(HV) 350 以上
	溝幅	計測幅 [mm]	1.32~1.36 (Av.1.34)
ソーチェン(ガイド部分)	厚み	[mm]	1.28~1.30 (Av.1.29)

4.7.3 省電力駆動法のコンセプト

チェーンソー用モーターの容量は他のモーターの総和より大きく省電力化が望ましい。そこで、省電力化を図るため、負荷を考慮した駆動制御について述べる。枝切断時以外では省電力モードとして、モータの定格電圧よりも低い電圧でチェーンソーを動作させる。チェーンソーと枝との接触を検知した際は、チェーンソーの出力を定格に切り替え、枝の切断を行う。枝の検出は、動作中のチェーンソーと枝が接触した瞬間の瞬時的な電流値の上昇を検出することによって行う。切断完了後は電流値の減少を検出することによって、再び省電力モードへ切り替える。この制御を実現させることで、常時定格で動作させていたチェーンソーの消費電力の省エネルギー化を図る(図 70)。

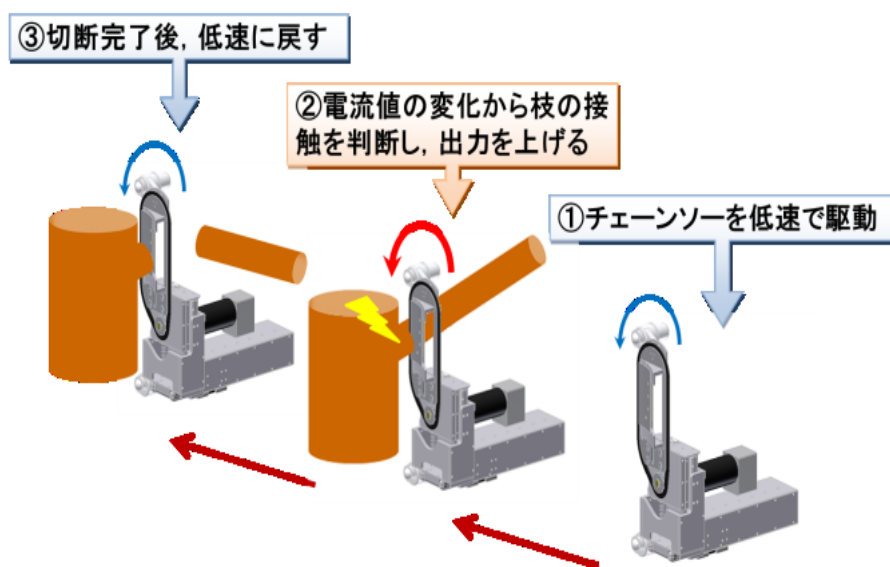


図 70 制御法の概要

4.7.4 評価実験

図 71 に示すように環状実験装置を用いて、負荷を考慮した駆動制御による切断実験を行った。ここでは、切断時以外での印加電圧を DUTY 比 70%である 17[V]と設定する。この DUTY 比の設定については昇圧しなくても枝直径 10~12[mm]くらいの細い枝は切断できる値で実験から求めた。枝接触の判定を行う閾値を 10[A]とし、枝切断終了後の閾値を 15[A]と設定した。枝径 30[mm]のスキに対して、切断機の送り速度 30[mm/s]で切断を行った。また、同一条件において常時定格電圧での切断も行った。上記の二つの実験の結果を図 72、図 73 に示す。図 73 の電流値を示すグラフにおいて、点線は接触判定を行う 10[A]を、一点鎖線は切断完了判定を行う 15[A]の閾値をそれぞれ示している。

切断結果より、負荷を考慮した駆動制御の有無では、切断中の電流に差はほとんど見られないが、切断時以外での消費電流の減少が確認された。木一本あたりの枝打ち量を 30 本と仮定した時、現在の枝打ちロボットにおける平均消費電力を算出すると、制御なしの場合では 358[W]、制御有りでは 210[W]となる。これより、制御を行う事で約 40%の省電力化を実現させた。

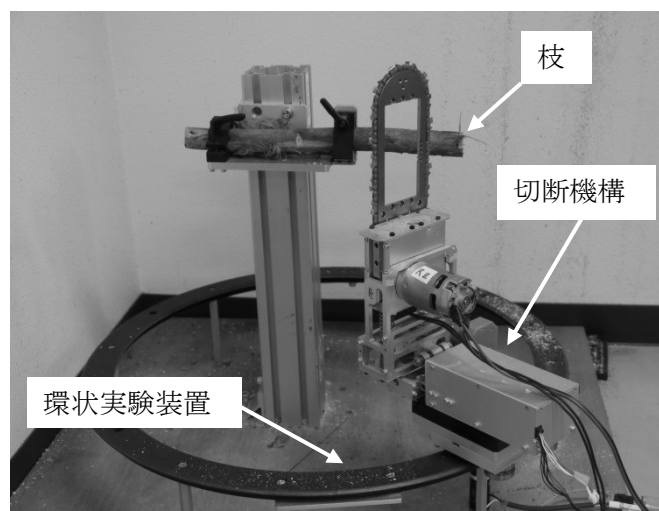


図 71 実験装置

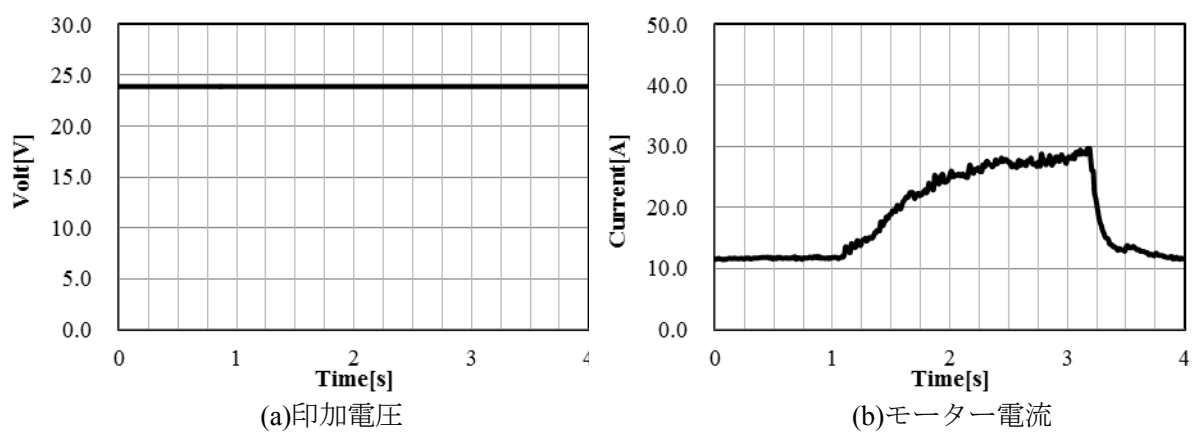


図 72 定格出力の実験

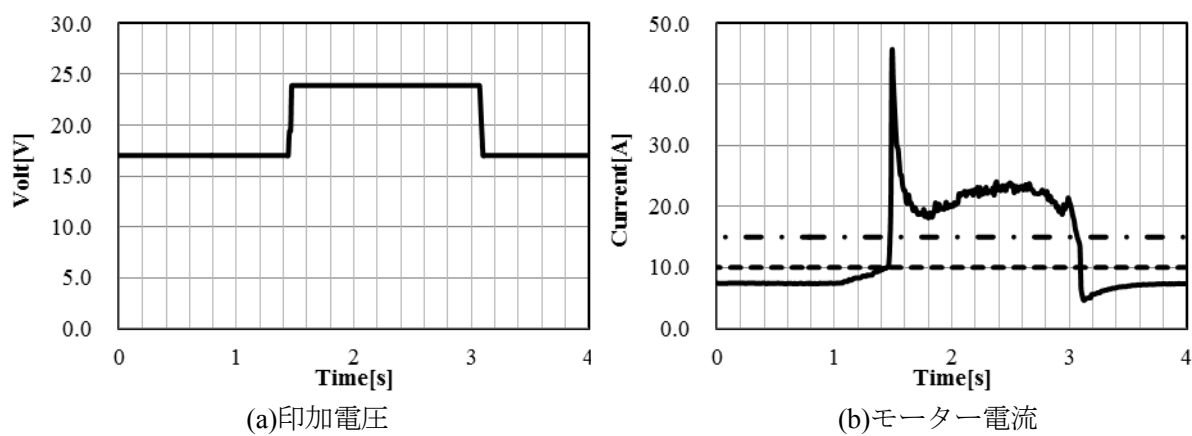


図 73 省電力の実験

5. 枝打ち実験

本章では、技術的課題の解決手法を実装した遠隔操作型枝打ちロボットを開発した。そこで、試作した遠隔操作型枝打ちロボットの作業環境の調査と枝打ちの作業効率や従来機の課題解決の検証実験について述べる。

5.1 遠隔操作システム

制御するモーターは昇降用 4 個，操舵用 4 個，機体姿勢調整用 2 個，チェンソー位置姿勢調整用 2 個，チェンソー用 1 個の合計 13 個ある。制御装置の軽量化と低消費電力化に向け，図 74 に示す FPGA(Field-Programmable Gate Array)をベースとした制御回路とモータードライバー回路から構成している。FPGA では，モーターエンコーダーの読み取り，モータードライバーへの PWM 出力，操作端末との無線通信を行う。操作者は無線通信により枝打ちロボットを遠隔操作できる。搭載するバッテリーは，小型軽量で長寿命であり継ぎ足し充電が可能であることを考慮し，エネルギー密度が高く，メモリ効果が小さい特長をもっているリチウムイオンバッテリーとした。採用したバッテリーの外観を図 75 に，その仕様を表 20 に示す。ロボット制御側でバッテリー残量をチェックし容量が低下すると交換モードに切り替わり自動的に下降する。

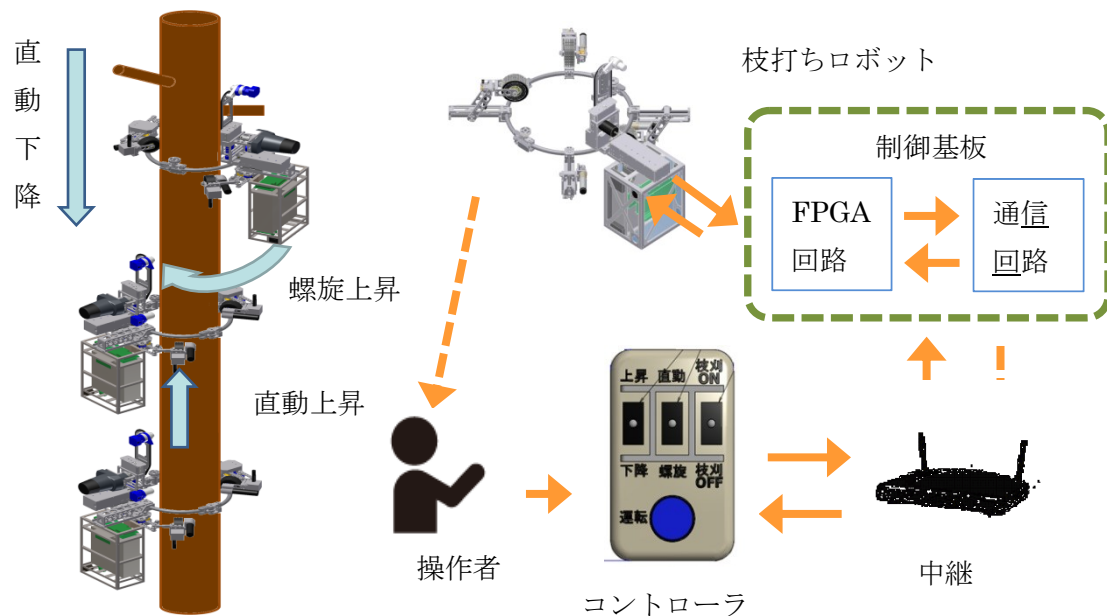


図 74 システム構成



表 20 仕様

型式	MH72-2997
公称電圧	24V
公称容量	7.6Ah
重量	2.5kg
寸法	210×180×70mm
メーカー	NEC トーキン

図 75 リチウムイオンバッテリー

5.1.1 機体降ろし機構

樹幹を上昇中に何らかの原因でスタックして、自走により下降ができない場合、スタックした枝打ちロボットをメンテナンスする必要がある。そこで、安全にロボットを下降させメンテナンスを速やかに行えることができる機体降ろし機構を考案した。

一般的には梢に向かうほど樹幹の直径は細くなっている。スタックした時は、姿勢調整機構の働きにより 2 リンクアームが駆動し、対向する能動輪間の距離が縮まっている状態である。安全に下降させるにはこの 2 リンクアームを広げる必要がある。そこで、図 76 に示すように、解除モーターが 2 リンクアームを駆動するウォームを軸方向にスライドさせることでウォームホイールが同期作動し、左右のリンクアームを広げることができる。また、解除モーターと連携動作し、ボビンに巻かれた長さ 15[m]の紐が投下される。この紐は機体の質量重心の反対側から垂れ下がっており、引っ張ると能動輪の摩擦が低下し滑り落ちるように機体を下降することができる。

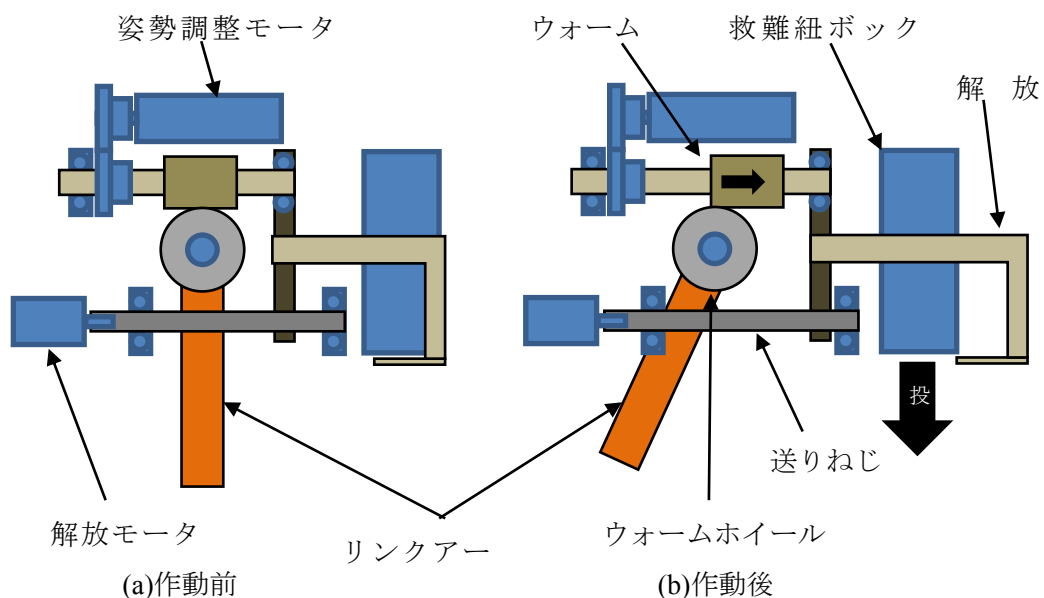


図 76 機構原理図

5.1.2 キックバック防止機構

市販のチェーンソーでガイドバーの先端上部でソーチェーンが枝などに接触したとき、チェーンソーが強く反発する現象のことをキックバック^[42]という。この反動は作業者にとって非常に危険であり大怪我に至る場合がある。作業者は切断する方向などを考慮しながらチェーンソーを取り扱っている。ロボットにおいては一定の操舵角で螺旋上昇しながら切断するため、この現象が起こる可能性が高い。機体姿勢を崩し落下したり、スタックしたりする要因となる。この解決として、図 77 に枝振り分け機能付きキックバック防止機構を示す。ガイドバー先端部のアームは支点で開閉するようになっており、先端のベアリングが枝に衝突し、枝の上面にあたる場合は、切断域としてアームが開きチェーンソーへと導く。逆に枝の下面にあたる場合は、回避域としてアームの上面を滑りチェーンソーに触れずキックバックを防ぐ構造となっている。アームの傾斜角は実験により 25[deg]と定め、バッファースプリングの反発力は機構の自重 15[N]以上、能動車輪が伝えるトルク由来の力 33[N]以内の範囲で選定し実験により最適を求めた。

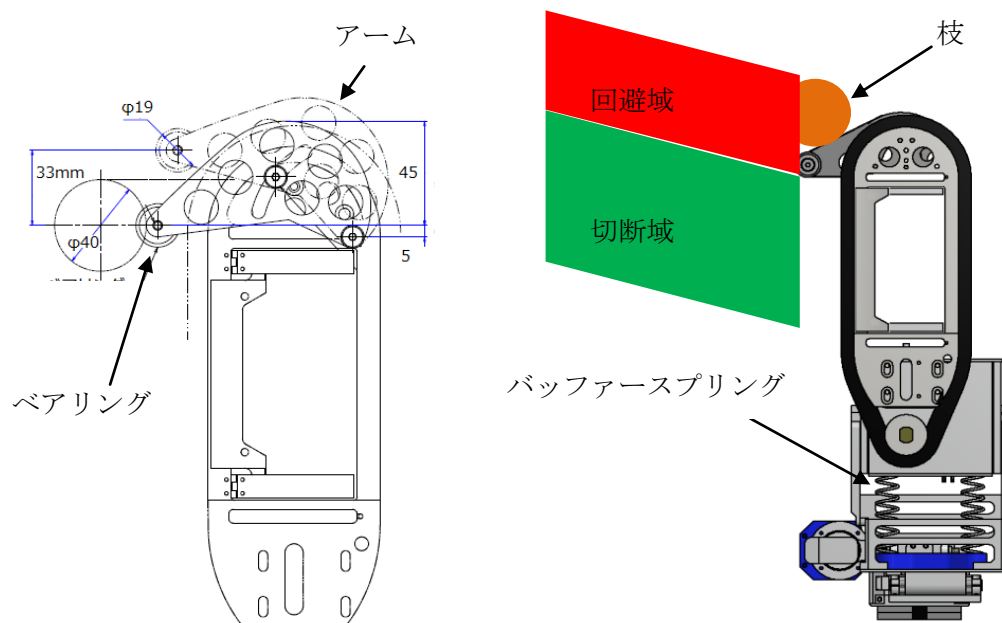


図 77 キックバック防止機構

5.1.3 能動車輪

ロボットと樹表面が接し安定した直動・螺旋昇降に重要なタイヤは、樹木の表面との密着性が良く効率的に摩擦力を生じさせ、かつ、耐摩耗性に優れた小径軽量が望ましい。これまでに硬度の組み合わせやタイヤ外周の溝形状の違う種類を試作評価してきた^[43]。しかし、摩耗が進み適正な摩擦力を維持できない欠点があった。そこで、これまでのクロロプレンと比べて耐摩耗性に優れている耐摩ゴム^[44]を図 78 で示すような試験片の摩耗の度合いと摩擦力を比較することができる器具を使い材料特性の評価を行った。耐摩ゴムはクロロプレンゴムと比較して摩耗量が少なく摩擦係数は 0.1 ポイント向上し 0.9(10 回平均値)を示した。そこで、車輪の構成を図 79 に、仕様を表 21 に示し、タイヤには耐摩ゴム(硬度 65)、インナーにはスポンジ(スポンジ硬度 25)の 2 種類の弾性体から構成されたチューブレスタイヤを試作製作した。これにより、タイヤゴムの摩耗や変形を抑えることができ、寸法形状がエアータubeに依存しないため、設計の自由度が増し軽量化に貢献した。タイヤゴムにより「こし」を持たせ、インナーの弾性により「しなやかさ」を実現した。



図 78 摩耗度試験

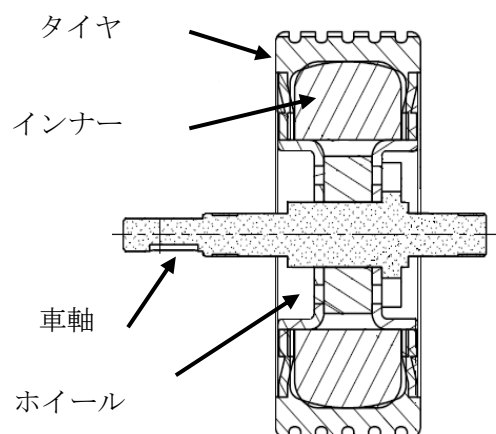


表 21 仕様

外径	75[mm]
幅	30[mm]
タイヤ	耐摩ゴム(硬度 65)
インナ	ゴムスポンジ(硬度 25)
重量	160[g]
パターン	丸溝

図 79 チューブレスタイヤと構成

5.2 環境調査

本項では、作業環境の調査結果について述べる。

5.2.1 樹木調査

屋外の環境を室内に再現することや機体設計の仕様の根拠とするため、枝打ち区間の細り、樹木の断面形状、樹木表面の凹凸量を調査した。調査した樹木は、中濃森林組合板取支所管内や岐阜県立森林文化アカデミー演習林、関市倉知、山県市高富、同市伊自良の私有林で枝打ち作業を実施する、あるいは実施したスギ、ヒノキ人工林において、41本の調査木(胸高直径)を選出した。計測位置(高さ)は胸高と枝打ちを始める高さ(3.8~6.0m)とし、輪尺、直径割メジャー、測長ポール、工学ノギスなどで計測し、分析を製図ソフト(CAD)で行った。その結果、つぎのことが明らかとなった。サンプル数は41本である。

i) 細りによる影響について

胸高で水平設置し、機体の姿勢調整機構を設けない場合、枝打ち高さでは機体は最大15[deg]傾く。

ii) 断面形状について

樹の断面の扁平率を調査した結果、胸高で3~15%、枝打ち高さで1~9%であった。

iii) 凹凸について

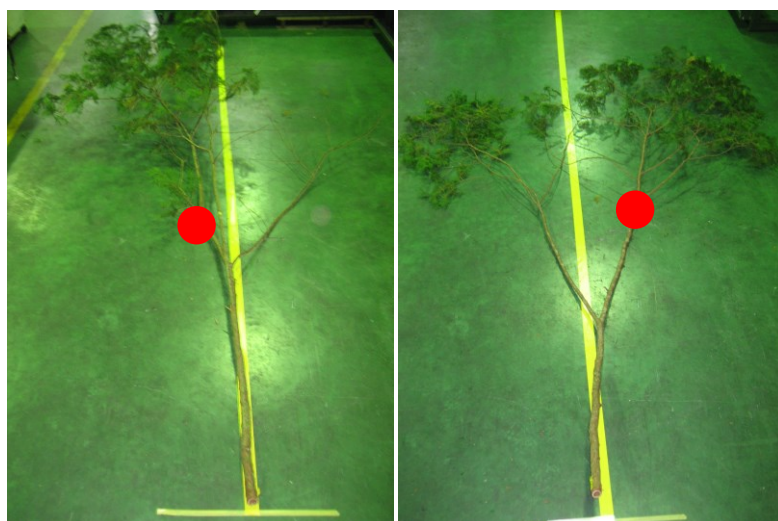
樹表面にある枝隆や瘤の高さは20mm、窪みは16mmが最大であった。

5.2.2 枝調査

林業従事者がチェンソーを用いて枝打ちや枝払いなどの作業をする場合、枝の撓り具合などを考慮してチェンソー(ガイドバー)が噛まないように切断方向を工夫している。ロボット搭載においては、切断方向は一方向のため枝噛み問題は存在する。枝噛みを評価する上で、噛む状態を把握するため、枝の分布とサイズに関する統計を実施した(図 80)。調査場所は岐阜県山県市伊自良地区の私有林で樹齢50年生のヒノキ人工林において、4本の調査木(胸高直径177~248mm、樹高14.3~15.8m、採取した枝174本)を選出し、直接計測を行った。木登り器を使用し、地面に近い枝からナンバーリングし、枝の地上高、方位角を計測したのち、手鋸で切り落とした。切断した枝の重さ、長さ、枝径、生死の状態を測定した。調査の結果、立ち木1本あたりの枝打ち本数は約40本、そのうちの6割は枝径20mm、長さ2m、重さ100gであり、最大は枝径40mm、長さ4m、重さ3kgであった(図 81(a))。また、サンプル数174本中、枝噛みが発生する方向に枝が撓っているのは16本であった。そのなかで最大は枝径36mm、枝長さ3.5m、枝の重さ2.3kgであった(図 81(b))。



図 80 枝調査の様子



(a)選出木の中で最大の枝 (b)枝噛み方向に撓っている最大の枝

図 81 採取した枝

(赤丸は枝の重心位置を示す.)

5.3 屋内実験

屋内環境による一連動作実験を行った。樹木に見立てた直径 180[mm]の模擬樹木の材質は強化段ボール製とし、表面に樹木の表皮と同等の摩擦係数を持つ壁紙を糊付けしたものとした。実験では①直動上昇 0.45[m], 直動昇降速度 0.2[m/sec], ②螺旋上昇[0.3m], 螺旋上昇速度 0.025[m/sec], ③直動下降 0.45[m], ④枝切断とし、この時の実験結果を以下に示す。図 82(a)~(c)でロボットの速度, 姿勢を表す。目標値を **Target** で示し, 4 つの能動輪のモーターエンコーダーから求めた速度の平均値を **Motor** で示す。短い距離ではあるが目標値にほぼ一致している。機体姿勢に応じて姿勢調整機構の機能している。図 83 でチェーンモーターの状態を示す。枝の接触判定により昇圧し枝を切断している。

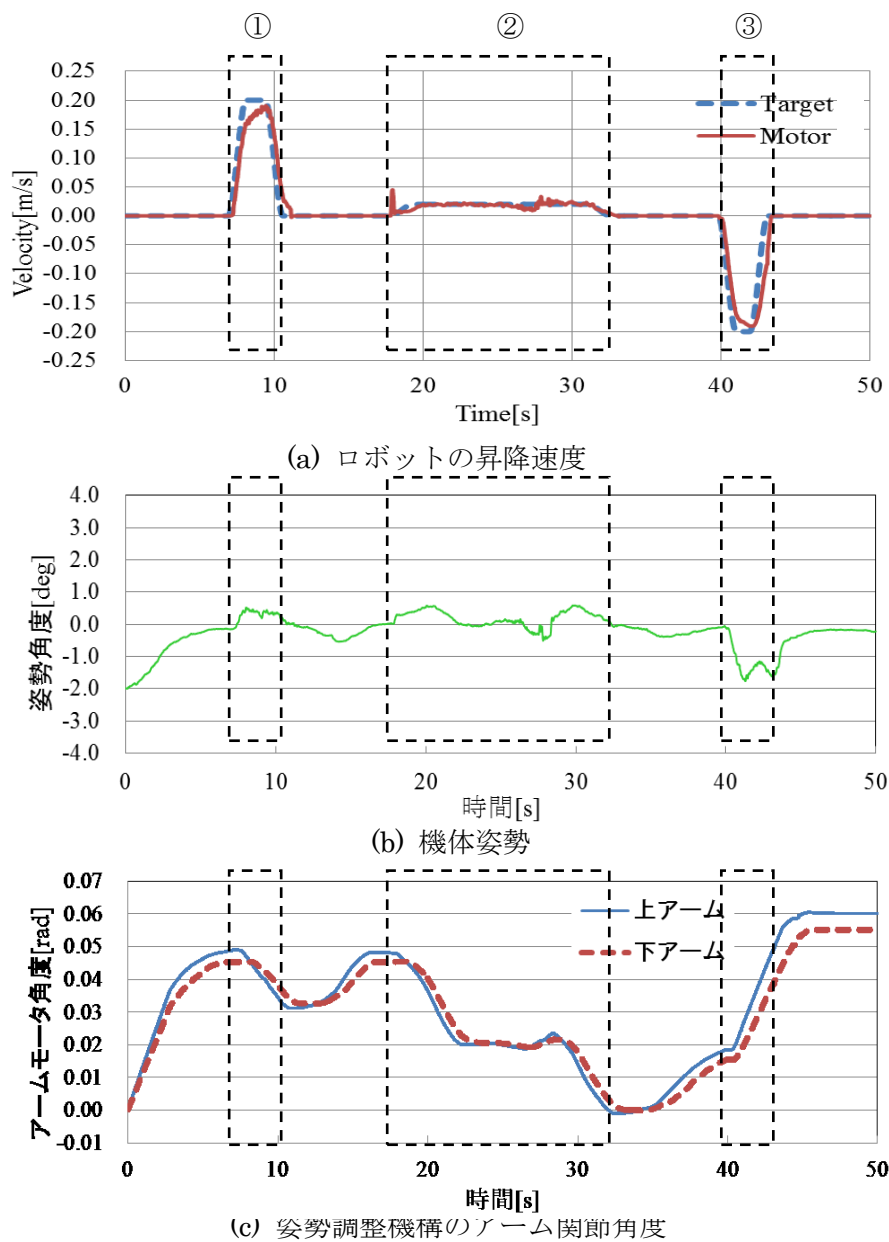


図 82 ロボットの状態

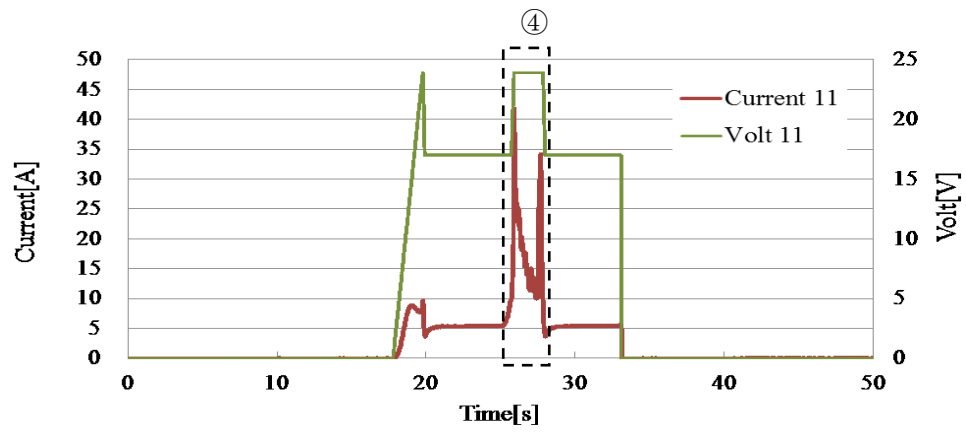


図 83 チェンソーモーターの状態

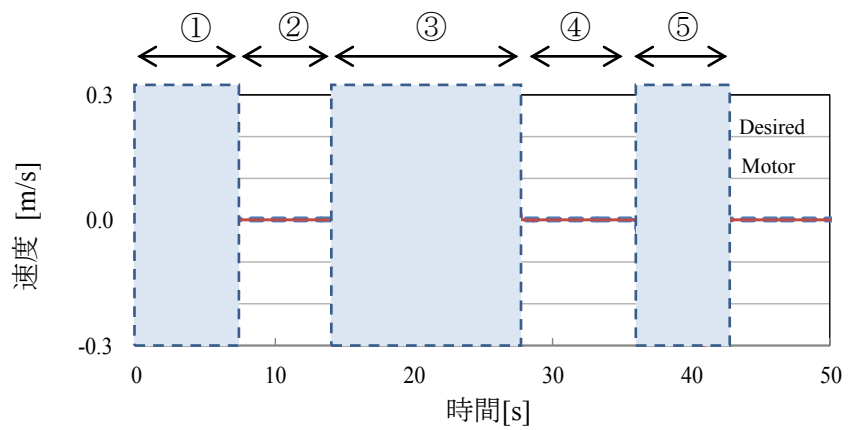
5.4 屋外実験

樹木を対象として、一連の動作確認をするため、図 84 に示す岐阜大学演習林内の樹を対象に実験を行った。樹木は胸高直径 0.155m の檜である。実験では距離 1.25m 程の直動昇降、角度 1.36 rad の操舵、距離 0.5 m 程の螺旋昇降、角度-1.36 rad の操舵、及び直動下降の連続実験をした。図 85 にそのときのロボットの変位、速度および姿勢を示す。①は直動昇降区間、②と④は操舵区間、③は螺旋昇降区間、⑤は直動下降区間である。目標値を **Desired** で示し、4 つの能動輪のモータエンコーダーから求めた位置と速度の平均値を **Wheel** で示している。**Wheel** の位置は **Desired** とほぼ一致しているが、車輪の滑りのため目標昇降高さ 1.25 m に対し、約 0.1m の位置誤差が生じている。速度も **Wheel** 速度は目標速度 0.25m/s にほぼ収束している。機体の姿勢は、樹の細りや樹表面の凹凸の影響により、直動昇降時に大きく変化するが、操舵区間では ± 0.02 rad 以内であり、操舵や枝打ちでは許容範囲内である。螺旋昇降区間でもほぼ ± 0.04 rad 以内である。この実験では、昇降時に樹の細り等の影響で機体が若干傾くが、姿勢調整機構により傾きは抑えられている。

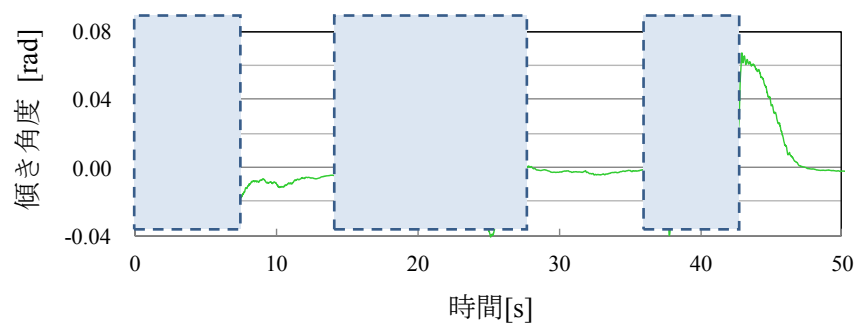
また、操舵区間から枝打ち機構の位置姿勢調整機構が動作しており、そのときの応答を図 86 に示す。螺旋昇降に切り替わった時点で位置調整を開始し、その後姿勢調整をしている。枝打ち終了時には、その逆運動を行っている。螺旋昇降では常時位置姿勢制御しているため、樹の凹凸あっても、位置姿勢は調整される。チェンソーの駆動は、枝との接触の有無をモータ電流で判定することとし、非接触時には低電圧モード、接触時には高電圧モードとしている。操舵速度は 0.02m/s、操舵角度は 68[deg]である。図 87 にチェンソー駆動系の応答波形を示す。電流のレベル検出で低電圧から高電圧、高電圧から低電圧に切り替えていることを示しており、連続的な枝打ちを実現している。なお、枝は $\phi 10$ から $\phi 25$ までの 7 本の枝を切断している。



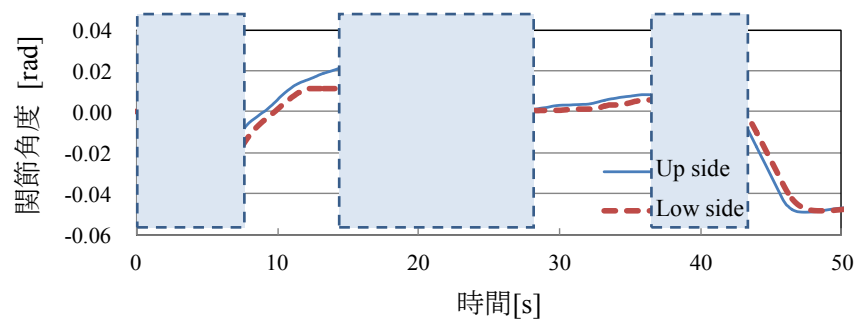
図 84 屋外実験



(a) ロボットの速度



(b) 機体姿勢



(c) 姿勢調整機構のアーム関節角度

図 85 ロボットの追従性

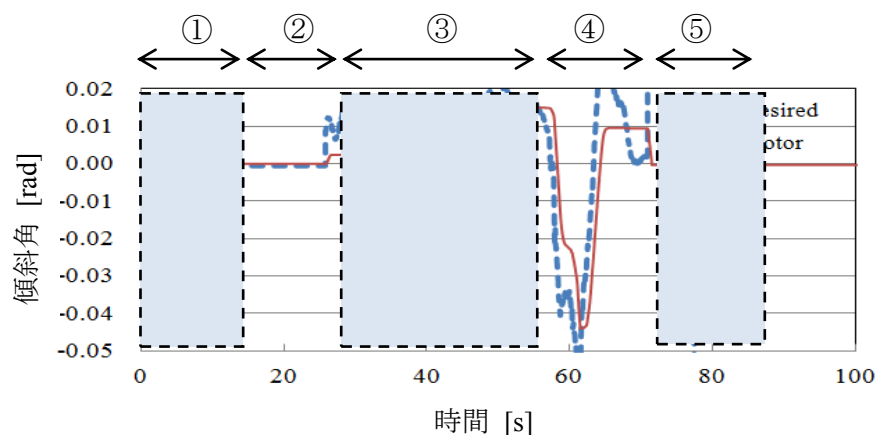
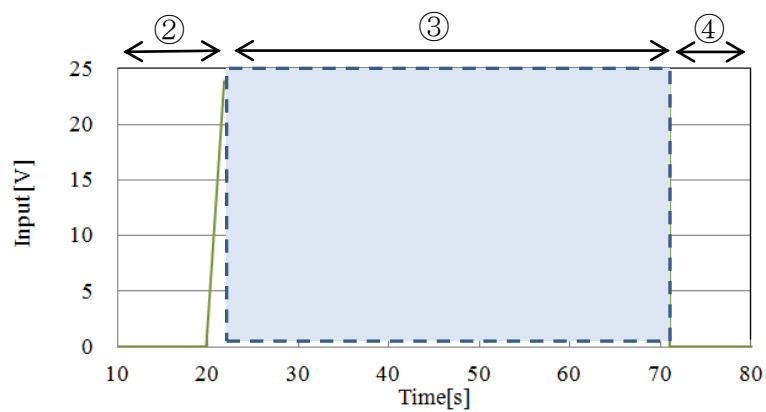
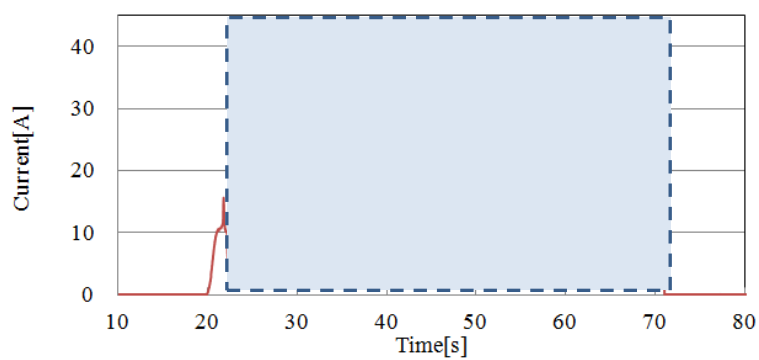


図 86 切断機構の追従性



(a) チェンソーの入力状態



(b) チェンソーモーターの電流

図 87 チェンソー駆動系の追従性

6. 結論

本章では，自重を利用した昇降方式や枝噛み防止機構など独創的なデザインをとりいれた遠隔操作型の枝打ちロボットを提案し，知見や課題を得ることができた．

6.1 課題解決

以下に示す通り，枝打ちロボットの諸課題の解決に向けて，機構と制御法を研究開発した．

- ・軽量化について
自重を利用した昇降方式と機体姿勢調整機構の考案と解析を行い機体重量 16.5[kg]を実現した．
- ・高速化について
直動昇降と螺旋昇降の切り替え制御により速度 0.2[m/sec]を実現した．
- ・高品質枝打ちについて
チェンソー駆動系の姿勢調整と機体姿勢調整機構の考案と樹木の軸芯とロボット中心軸をいっちさせる制御法により枝切断後の残り枝長さを 5[mm]以下を実現した．
- ・枝噛み防止について
チルト機構のある可動板方式の考案により解決の有効性を示した．
- ・省電力化について
枝接触推定によるチェンソーの省電力駆動を実装し解決の有効性を示した．

6.2 今後の展開

遠隔操作型枝打ちロボットを開発し，屋外での枝打ち実験により，その有効性を確認することができたが，実用性の評価に至っていない．今後は継続的な枝打ち作業を行い作業効率などの検証を行う．また，自律型枝打ちロボットへの応用をはかる．

本論文に関する発表

本論文を構成する学術論文誌(査読有)

- 1 Satoshi.Ueki, Haruhisa.kawasaki, Yasuhiko.Ishigure, Kousuke.Koganemaru, and Yujiro.Mori, Development and Experimental Study of a Novel Pruning Robot, Artificial Life and Robotics Vol.16, No.1, pp.86-89(2011)
- 2 川崎晴久, 加藤太一, 小金丸孝介, 上木諭, 石樽康彦, 森雄二郎, 自重を利用した円柱昇降ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.7, pp.592-598(2011)

本論文を構成する国際会議論文(査読有)

- 1 Yasuhiko Ishigure, Haruhisa Kawasaki, Satoshi Ueki, Climbing Robot Equipped With a Postural Adjustment Mechanism for Conical Poles, Proceeding of CLAWAR2013, pp 343-350 (July, 2013)
- 2 Yasuhiko Ishigure, Katsuyuki Hirai, and Haruhisa. Kawasaki, A Pruning Robot with a Power-Saving Chainsaw Drive, Proceeding of ICMA2013, pp 1223-1228 (August, 2013)

本論文に関連する国際会議論文(査読有)

- 1 Satoshi.Ueki, Haruhisa.kawasaki, Yasuhiko.Ishigure, Kousuke.Koganemaru, and Yujiro.Mori, Development and Experimental Study of a Novel Pruning Robot, Proc. of The Sixteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2011(AROB16th '11), Oita, pp.960-963, January 27-29, 2011
- 2 Haruhisa Kawasaki, Suguru Murakami, Kousuke Koganemaru, Winai Chonnaparamuty, Yasuhiko Ishigure, and Satoshi Ueki, Development of a Pruning Robot with the Use of Its Own Weight, Proc. of 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines(CLAWAR2010), pp.455-463, Nagoya, 2010.8.30
- 3 Haruhisa Kawasaki, Suguru Murakami, Hideki Kachi, and Satoshi Ueki, Novel Climbing Method of Pruning Robot, Proc. of SICE Annual Conference 2008, pp.160-163, 2008

本論文に関連する国際会議論文(査読無)

- 1 Yasuhiko Ishigure, Haruhisa Kawasaki, Taichi Kato, Nobuyuki Iinuma, Katsuyuki Hirai, Ryuta Ikeda, Experimental Evaluations For A Developed Remote-Operated Pruning Robot, FOMEC2013 (September, 2013)

本論文に関連する特許

- 1 柱体昇降作業装置、発明者：川崎晴久、森雄二郎、石樽康彦、特願 2007-95052、出願日：平成 19 年 3 月 30 日、特許第 5046710 号、登録日：平成 24 年 7 月 27 日
- 2 枝打ち装置及び昇降作業装置、発明者、川崎晴久、森雄二郎、石樽康彦、出願日：平成 20 年 4 月 30 日、特許第 05159415 号、登録日：平成 24 年 12 月 21 日
- 3 柱体昇降作業装置、発明者：川崎晴久、森雄二郎、石樽康彦、水元淳、出願日：平成 21 年 10 月 29 日、特許第 5228183 号、登録日：平成 25 年 3 月 29 日
- 4 枝打ち装置及び昇降作業装置、発明者：川崎晴久、可知秀規、石樽康彦、森雄二郎、特許願 2010-034572、特開 2011-167127、出願日：平成 22 年 2 月 19 日、(特許査定)

本論文に関連する著書

- 1 Haruhisa Kawasaki, Suguru Murakami, Kousuke Koganemaru, Winai Chonnaparamuty, Yasuhiko Ishigure, and Satoshi Ueki, Development of a Pruning Robot with the Use of Its Own Weight, Editor Hideo Fujimoto, Mohammad O. Tokhi, Hiromi Mochiyama, and Gurvinder S. Virk, Emerging Trends in Mobile Robotics, World Scientific, ISBN-13978-981-4327-97-8, ISBN-10981-4327-97-2, pp.455-463, 2010

本論文に関連する口頭発表

- 1 平井克幸，加藤太一，飯沼信幸，池田隆太，石樽康彦，川崎晴久，枝打ちロボットにおける切断機構の省電力化，日本機械学会東海支部第 62 期総会講演会講演論文集，No.133-1，pp.365-366，2013.3.18-19
- 2 平井克幸，加藤太一，飯沼信幸，石樽康彦，西堀研人，川崎晴久，枝打ちロボットの姿勢調整機構，日本機械学会 2012 年度年次大会，G150054，(2012)
- 3 石樽康彦，川崎晴久，上木諭，森雄二郎，加藤太一，飯沼信幸，板橋雅文，平井克幸，遠隔操作による軽量高速な枝打ちロボット，第 123 回日本森林学会大会，Ab012 (March, 2012)

- 4 石樽康彦, 川崎晴久, 遠隔操作型枝打ちロボットの研究開発, アグリビジネス創出フェア 2012 技術プレゼンテーション, 2012.11.16
- 5 飯沼信幸, 加藤太一, 平井克幸, 池田隆太, 石樽康彦, 上木諭, 川崎晴久, 姿勢調整機構を有した枝打ちロボットの開発, 森林利用学会第 19 回学術研究発表会講演要旨集, pp.6, (2012)
- 6 加藤太一, 板橋雅文, 石樽康彦, 上木諭, 川崎晴久, 枝打ちロボットの森林での評価実験, 森林利用学会第 18 回学術研究発表会講演要旨集, pp.7, (2011)
- 7 田中彬央, 加藤太一, 小金丸孝介, 川崎晴久, 上木諭, 石樽康彦, 森雄二郎, 自律型枝打ちロボットの研究, 第 17 回森林利用学会学術研究発表会講演要旨集, pp.12, 2010.10.2
- 8 加藤太一, 小金丸孝介, 田中彬央, 上木諭, 石樽康彦, 森雄二郎, 川崎晴久, 自重を利用した枝打ちロボットの開発, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2010AC1K2-5, 2010.9.22-24
- 9 小金丸孝介, 村上傑, 川崎晴久, 石樽康彦, 枝打ちロボットの昇降方式の研究, 森林利用学会第 16 回学術研究発表会講演要旨集, pp.13, 2009.11.21
- 10 村上傑, 上木諭, Winai Chomaparamuntt, 石樽康彦, 水元淳, 川崎晴久, 自重を利用した枝打ちロボットの昇降法 -二次元解析と実験評価-, 日本機械学会東海支部第 58 期総会講演会講演論文集, No.093-1, pp.109-110, 2009
- 11 可知秀規, 川崎晴久, 石樽康彦, 枝打ちロボットの枝噛み防止機構の研究, 森林利用学会第 15 回学術研究発表会講演要旨集, pp.17, 2008
- 12 川崎晴久, 村上傑, 可知秀規, 上木諭, 森雄二郎, 石樽康彦, 枝打ちロボットの木登り方式, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 1K38,2007

謝辞

本研究を進めるにあたって、主指導教員の川崎晴久教授，副指導教員の佐々木実教授，毛利哲也准教授に深甚なる謝意を致します。そして，日頃の実験や議論を通じてご助言を頂きました応用生物科学部の石田仁准教授，工学部機械工学科の遠藤孝浩助教，豊田高等専門学校の上木諭講師，川崎・毛利研究室の大学院生であった平井克幸氏，近藤裕紀氏，濱田直人氏，加藤太一氏，飯沼信幸氏，池田隆太氏，可知秀規氏，書き出せは切がないくらいの方々のお蔭で，ここに論文として形にすることができました。また，試作開発を行うにあたり，枝打ち研究会の参画企業で機体開発の(株)丸富精工 代表取締役社長 野田泰伸氏，制御装置のイーバレイ(株) 取締役 山下誠治氏，遠隔装置システム開発の(有)ういすてりあ 代表取締役 後藤多朗氏，実証評価のプロジェクトジャパン(株) 代表取締役社長 森雄二郎氏の皆様には有益なご助言，ご協力をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] 農林水産省，農林水産研究基本計画（2010 年）
- [2] 林野庁，「平成 24 年度森林・林業白書」（2013）
- [3] 厚生労働省，「労働者災害補償保険事業年報，労災保険給付データ」
- [4] 岐阜県，「岐阜県森林づくり基本計画」（2007）
- [5] 藤森隆郎，「枝打ちー基礎と応用ー」，（社）日本林業技術協会(1984)
- [6] 藤森隆郎，「枝打ちの手引き」，（社）日本林業技術協会(1999)
- [7] 「かながわのスギ・ヒノキ穿孔性害虫被害の実態と木材利用」，神奈川県自然環境センター，2013 年
- [8] 株式会社共立，枝打ち機，<http://www.kioritz.co.jp/product/kankyo/edauchi.htm>
- [9] 株式会社やまびこ，チェーンソー，
<http://www.shindaiwa.co.jp/product/chainsaw/e1227ts/index.html>
- [10] 森政弘，「産業用ロボットに対する意見」，第 22 回本田財団懇談会講演会，1985
- [11] 林業機械センター，「枝打ち機 ロボット 439」
<http://jfes.qc.affrc.go.jp/machine/yosaku.html>
- [12] セイレイ工業株式会社，「自動枝打ち機 えだうちやまびこ」
<http://www.seirei.com/products/fore/ab232r/ab232r.html>
<http://www.seirei.co.jp/products/fore/ab351r/ab351r.html>
- [13] 斎藤俊浩，斎藤登，佐々木和男，千嶋武，平野和男，「自動枝打ち機の作業効率」，東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 技術職員等試験研究研修会議報告書，pp63-68，1991
- [14] 段林弘一，乾雅晴，眞神康三，「スギ・ヒノキの枝打ちに関する試験(V)」，日林関西支論 1，pp137-139，1992
- [15] 西泉敏行，「枝打機(自動枝打機)の最適使用方法に関する研究」，熊本県林業研究指導所研究報告書，pp65-75，1987
- [16] 動力式挟み型枝打ち装置，出願人：三菱重工業株式会社，特許公開：平 8-331986，公開日：平成 8 年 12 月 17 日(1996)
- [17] 菅佑樹，櫛橋康博，今井久美子，寺島亮，白井裕子，菅野重樹，三輪敬之，「森林作業支援のための木登り枝打ちロボット WOODY-1 の開発」，第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2005)，pp1013-1014(2005)
- [18] 竹内誠，難波宏旭，菅佑樹，白井裕子，菅野重樹，「街路樹登りロボット WOODY-2 の開発」，第 10 回システムインテグレーション部門講演会(SI2009)，pp1871-1872(2009)
- [19] 松元悦郎，植村眞一郎，山下俊一，桐野弘城，油田功二，原田正和，松尾征一郎，永田亮一，中原和範，尾曲伸一，池田健一，木場義弘，「ワシントン椰子の枝払いロボットの開発(2)」，第 43 鹿児島県工業高等専門学校研究報告，pp49-52(2008)
- [20] 枝打ちロボット MS-2，<http://www.muratasoft.com/ms2/index.html>
- [21] Self-Propelled tree pruning, Inventor: John L Clouston,

Patent Number:US005983966A, Nov.16, 1999

- [22] Clouston's Tree Shaver, <http://www.ruralite.org>
- [23] 古川良裕, 齋藤直樹, 佐藤俊之, 「ノーバックドライブ機構を利用した垂直昇降移動機構の開発」, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2009, No.09-4, 2P1-D14, (2009)
- [24] Jean-Christophe Fauroux, Joel Mofillon, "Design of a climbing robot for cylindro-conic poles based on rolling self-looking", Industrial Robot: An international Journal, Volume 37 issue 3, pp287-292,(2010)
- [25] 千葉正弘, 新井義和, 曾我正和, 「枝打ちロボットののための切断機構の動作計画アルゴリズム」, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2006, No.06-4, 2P1-D31, (2006)
- [26] 山田隆明, 前田幸栄, 境田幸和, 玉利知裕, 「ロボットによる林業用枝打ちシステムに関する研究」, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2005, No.05-4,1P1-S-033 (2005)
- [27] 大分県臼杵事務所林業課 向井亨, 「ルータ刃による枝打ち機の試作」, 機械化林業 No.439 , p43~47(1990.6)
- [28] 大分県臼杵事務所林業課 向井亨, 「ルータ枝打ち機の考案」, 機械化林業 No.535 , p44~47(1998.6)
- [29] ルーター枝打機, 出願人: 向井亨, 実用新案登録番号: 第 2520505 号, 登録日: 平成 8 年 10 月 4 日(1996)
- [30] 小型電動チェンソーで高枝等を切る機 械, 考案者: 井上重徳, 実用新案登録: 第 3100527 号, 登録日: 2004/01/14
- [31] M. J Lawn, T. Sakai, M. Kuroiwa and T. Ishimatsu: "Development and practical application of a stairclimbing wheelchair in Nagasaki, Int. Journal of Human-friendly Welfare Robotic Systems, pp. 33-39, 2001.
- [32] 林良太, 辻尾昇三, 余永: “可撓性シャフトを用いたクローラロボットの遠隔操縦機構”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 3, pp. 422-428, 2007
- [33] 樋口峰夫: “歩行型壁面移動機構の脚/胴体質量比とパワーの関係”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 951-956, 1998
- [34] 広瀬茂男, 袁建軍, 小沼洋介: “脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 330-336, 2005
- [35] 鶴清, 広瀬茂男: “凹凸吸着面対応型永久磁石ユニットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 683-690, 2008
- [36] 里村章悟, 原正哉, 福島宏明, 亀川哲志, 五十嵐 広希, 松野文俊: “ねじ推進ヘビ型ロボットのモデリングと制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 5, pp. 779-784, 2007
- [37] E. Noohi, S.S. Mahdavi, A. Baghani, M. N. Ahmadabadi: "Wheel-Based Climing Robot: Modeling and Control," Advanced Robotics, Vol. 24, No. 8-9, pp. 1313-1343, 2010

- [38] W. Fisvher, R. Siegwart: "Wheel Pole-Clomng-Robot with High Payload Capability Using a Clamping Mechanism Which Is Inspired by the Rope-Clamps in Human Climbing," Poc. of CLAWAR'2010, pp. 399-406, 2010
- [39] 内田健一, 森を育てる技術, 川辺書林, 2007
- [40] おかやま共生の森・吉永(保育のつどい)
<http://www6.ocn.ne.jp/~shinj1/20070224yoshinaga/>
- [41] 大洞智宏, 岐阜県版スギ・ヒノキ細り表の作成, 岐阜県森林研研報, Vol. 39, pp.1-18, 2010
- [42] 菅井康司, 「チェンソーパーフェクトマニュアル」, (株)地球丸(2008)
- [43] 石樽康彦, 「高速・軽量の枝打ちロボットの研究開発」平成 22 年人間情報システム工学専攻修士論文集, 2010 年
- [44] ダイガースポリマー株式会社
<http://tigers.jp/product/detail/24>

用語・略語一覧

多面的機能：生物多様性，水源涵養機能，土砂災害防止機能，地球環境保全などのこと。

天然林：自然の推移に委ねた森林のこと。

人工林：人為的な方法により造成した森林のこと。

森林施業：目的とする森林を育成するために行う造林，保育，伐採等の一連の行為のこと。

枝打ち：樹木の枝を幹から切り落とす作業のことで，林業における保育作業の一つである。

枝払い：伐倒した樹木の枝を切り落とす作業のことで，造材作業の一つである。

林齢：森林の年齢。人工林では苗木を植栽した年度を1年生とし，以後2年生となる。

植栽：苗木を植えること。

保育：植栽終了後，育成の対象となる苗木の生育を促すために行う下刈り，除伐等の総称。

下刈り：植栽した苗木の生育を妨げる雑草や灌木を刈り払う作業のこと。

除伐：育成の対象となる樹木の生育を妨げる他の樹木を刈り払う作業のこと。

主伐：次の世代の森林の造成を伴う森林の伐採のこと。

枝隆：枝の根元にある膨らみのことで，枝隆の形状に応じた枝打ちが求められる。

枝噛み：木材を切り進むと，刃物が挟まり進行が阻害される現象のこと。

残枝長さ：枝打ちした後，樹に残る枝の部分の長さのことで5mm以下が良いとされる。

細り：樹木の幹は根元から梢に向かって細くなる。この根元と梢側の直径の変化量のこと。

立木：土地に生育する個々の樹木のこと。

林家：林地の所有，借入などにより森林施業を行う世帯のこと。

林業経営体：林地の所有，借入などにより森林施業を行う世帯，会社のこと。

林業事業体：委託又は立木の購入により造林，伐採などの林内作業を行う森林組合のこと。

樹冠：樹木の枝と葉の集まりのこと。

トビクサレ：スギノアカネトラカミキリの幼虫の食害による材の変色，腐朽のこと。

ぶり縄：縄と棒を使って木に登る道具のこと。

木登り器与作：林業従事者が考案した木に登る道具のこと。

林尺：幹の太さを測る道具の一つ。

直径割メジャー：幹の太さを測る道具の一つ。

ベンダー製法：パイプ状の鋼材を曲げて所望の形状に加工する製造法のこと。

ウォーム減速機：ねじ歯車とはす歯歯車を組み合わせた機構で大きな減速比が得られる。

遊星歯車減速機：遊星歯車と太陽歯車，キャリア，内歯車から構成される機構のこと。

バックドライバビリティ：アクチュエータの入力軸と出力軸の力の双方向伝達能力のこと。

PID制御：入力値の制御を出力値と目標値との偏差，その積分及び微分で行う方法のこと。

FPGA：Field-Programmable Gate Array の略，現場でプログラム可能な半導体デバイスのこと。

PWM：pulse width modulation の略，パルス幅を変調させてモーターを制御すること。

Duty比：パルス幅をパルス周期で割った比のこと。

