

Title	プランテーション作業効率向上のためのRTK-GNSS高精度測位を利用した植樹支援システムの設計と評価
Sub Title	Design and evaluation of planting support system for improving work efficiency in palm plantation with RTK-GNSS high precision positioning
Author	増間, 智昭(Masuma, Tomoaki) 神武, 直彦(Kotake, Naohiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度システムエンジニアリング学 第242号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002016-0060

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2016 年度

プランテーション作業効率向上のための
RTK-GNSS 高精度測位を利用した植樹支援
システムの設計と評価

増間 智昭

(学籍番号：81533516)

指導教員 准教授 神武 直彦

2017 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

論文要旨

学籍番号	81533516	氏名	増間智昭
論文題目： プランテーション作業効率向上のためのRTK-GNSS高精度測位を利用した植樹支援システムの設計と評価			
(内容の要旨) 本研究の目的はパームヤシプランテーションの再植樹プロセスにおいて、効率の良い効果的な植樹を実現するために、RTK-GNSS 高精度測位を利用した植樹支援システムの設計と評価を行うことである。パームヤシから採れるパーム油は食用油として利用されてきたが、近年では石油に代わるバイオマス燃料としての利用が注目されるなど需要が増している。一方で環境保護の観点から新たな開墾を伴うプランテーションの面積拡大は困難であり、生産性の向上による収穫量拡大が期待されている。パームヤシの寿命はおよそ 20 年から 25 年であり、25 年を経過したパームヤシは収穫量が低下する。その為、プランテーションを経営する企業では 25 年を経過したパームヤシを一度伐採し、新たな苗木を植樹し直す再植樹を行っている。この再植樹作業では、古いパームヤシを伐採した後に、測量を行うことで新たな苗木を植えるための土壌を造成する。さらに、新たな苗木を植える位置を等間隔で決定し、棒を挿してマーキングし、新たな苗木を植樹する。これらの作業はワイヤーや棒を用いて行われるが、広大なプランテーションでは誤差が蓄積し、一定の区画に最大限のパームヤシを植樹できないなどの課題があった。この再植樹プロセスは 1 つのエリア当たりすべてを終えるのに 6 ヶ月の期間がかかり、再植樹が間に合わずに樹齢 30 年を超えた生産性の低いパームヤシも存在する。 そこで本研究では再植樹プロセスにおいて新たなパームヤシの植樹位置を決定する際に、地形データを元に最も効果的な植樹計画を作成し、計画図通りの植樹の実施を支援するシステムを設計した。システムの設計にあたってマレーシア最大のプランテーション企業である Felda Global Ventures グループと協力し、同社所有のプランテーションでの現場作業員や現場監督者へのインタビューや作業のオブザベーションを行うことで再植樹プロセスの課題や要求の抽出を行った。地形データを元にした植樹計画図と高精度測位を利用することで画面上に植樹位置と現在位置を視覚的に表示し、計画図通りに植樹位置の決定を行えるシステムを構築した。プランテーションにおいて高精度に位置を取得する手段として RTK-GNSS による高精度測位を利用した。システムを検証するために UHF 通信を利用した RTK-GNSS デバイスと簡易な基準局によるプロトタイプを作成を行った。プロトタイプを利用した再植樹プロセスの「伐採方向決め」「植樹位置決め」を現場作業員が実際に行うことにより従来手法との位置精度や所要時間の比較を行い評価した。さらに、主要ステークホルダにインタビューを行い再植樹プロセスの効率化の観点からシステムが有効であることを確認した。			
キーワード (5語) パームヤシ、プランテーション、再植樹、農業、RTK-GNSS高精度測位			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81533516	Name	Tomoaki Masuma
<p>Title</p> <p style="text-align: center;">Design and Evaluation of Planting Support System for Improving Work Efficiency in Palm Plantation with RTK-GNSS High Precision Positioning</p>			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this study is to design and evaluate planting support system for improvement of work efficiency in oil palm plantation by utilizing RTK-GNSS high precision positioning. In Malaysia, large-scale agriculture of oil palm plantation is popular. Palm oil has been used not only for cooking but also for biomass fuel instead of petroleum in recent years increasing its demand. On the other hand, areas of plantation became difficult to be newly expanded for an environmental protection. Therefore, it is necessary to increase the production volume by improving productivity limiting expansion of the plantation areas. The life of oil palm is approximately 20 to 25 years and its yield amount decreases after. To regenerate the production, a management company cuts old palm and replants new palm seedlings. However, a conventional method has not been able to achieve ideal yield amount and cost benefit since its efficiency of replanting process is still inefficient with various errors and time consumption.</p> <p>In this study, we designed a system to support the conventional method. We interviewed and observed onsite workers and supervisors who work at plantations owned by Felda Global Ventures, Malaysia's largest plantation company, to analyze problems and demands of the replanting processes. As a result, it is found that replanting process of pre-lining, constriction, and palm lining have a potential to be improved by applying RTK-GNSS high precision positioning. Although the processes require accurate location information relevant data is measured manually on site by field workers according to the conventional method. There are various errors occurred which resulted in inefficient replanting outcomes. We used high precision positioning by RTK-GNSS as a means to acquire position with high accuracy in plantation. Generally, RTK-GNSS positioning is consist of a permanent base station and mobile phone network for communication, but these infrastructures cannot be used in plantations. Therefore, we made a prototype system with UHF radio as communication for RTK-GNSS and impermanent base station. A prototype system is tested by workers in two replanting works, pre-lining and palm lining. We evaluate a prototype system in quality, cost and delivery and compare with conventional method.</p>			
<p>Key Word(5 words)</p> <p>RTK-GNSS, Palm Plantation, Large scale agriculture, Productivity, Replanting</p>			

目次

図目次.....	VI
表目次.....	VIII
1. 序論	1
1.1. 研究の背景と問題意識.....	1
1.2. 研究の目的	1
1.3. 論文の構成	1
2. 現状と課題	3
2.1. パームヤシプランテーションの現状.....	3
2.2. マレーシアにおけるパームヤシプランテーション事業.....	3
2.3. 再植樹.....	4
2.3.1. 再植樹手法のオブザベーション	7
2.3.2. 再植樹プロセスの課題.....	17
2.4. 再植樹に関する既存の取り組み	19
2.4.1. マルチ GNSS 測位を活用した植樹支援	19
2.4.2. 植樹に特化したトラクターの開発.....	20
2.5. 人工衛星を利用した高精度測位	20
2.5.1. マルチ GNSS 測位	21
2.5.2. RTK-GNSS 測位	22
2.5.3. マルチ GNSS 受信機.....	23
3. 設計	25
3.1. コンセプト	25
3.2. 要求分析.....	25
3.2.1. ステークホルダの特定.....	25
3.2.2. ステークホルダの要求.....	26
3.2.3. システムの範囲.....	28
3.3. アーキテクチャ設計.....	29
3.3.1. 機能設計.....	29

3.3.2.	機能分析	30
3.3.3.	機能要求と検証識別性	31
3.3.4.	機能構成図	36
3.3.5.	物理設計	37
3.3.6.	システム構成.....	37
3.3.7.	システム構成への機能の配分	40
4.	実装	41
4.1.	実験フィールド	41
4.2.	予備実験	41
4.2.1.	衛星測位実験.....	41
4.2.1.1.	検証の概要と目的	41
4.2.1.2.	検証結果	43
4.2.2.	UHF 通信を用いた RTK-GNSS 測位の検証	45
4.2.3.	検証結果.....	46
4.3.	プロトタイプ実装	48
4.3.1.	プロトタイプの構成.....	48
4.3.2.	プロトタイプによる実証実験	51
5.	評価	59
5.1.	システム要求に対する評価.....	59
5.2.	ステークホルダ要求に対する評価.....	62
6.	考察	65
6.1.	実証実験結果に対する考察.....	65
6.1.1.	精度	65
6.1.2.	コスト.....	65
6.1.3.	時間	66
6.2.	インタビュー結果に対する考察	66
6.3.	本システムの課題	66
6.3.1.	地形データの精度	66
6.3.2.	耐候性.....	67
6.3.3.	ユーザのリテラシー.....	67
6.4.	今後の展望	67
6.4.1.	実用化に向けて	67

6.4.2.	リモートセンシングを利用した木単位での管理.....	68
6.4.3.	植樹の自動化.....	68
7.	まとめ.....	69
8.	謝辞.....	70
	参考文献.....	72
	付録.....	75
A)	衛星測位実験の結果.....	75
I.	実験エリアの天空写真.....	75
II.	実験結果.....	77
B)	プロトタイプを用いた実証実験のデータと結果.....	84
I.	実験データ.....	84
II.	実験結果.....	88
C)	ユーザ(現場作業員)インタビュー.....	90
I.	インタビュー項目.....	90
II.	インタビュー結果.....	91

図目次

図 2-1	パームヤシの樹齢による収穫量の推移 (https://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2012/12/Malaysia/).....	5
図 2-2	パームヤシプランテーション(平坦地).....	6
図 2-3	パームヤシプランテーション(傾斜地).....	6
図 2-4	再植樹プロセス	7
図 2-5	伐採方向決めの手順	9
図 2-6	伐採方向決めの様子	9
図 2-7	位置決めの目印	10
図 2-8	伐採の様子	11
図 2-9	テラスの道路の側面図	11
図 2-10	道路位置決めの様子	12
図 2-11	丘に造成された道路とテラス	12
図 2-12	ブルドーザーによる造成	13
図 2-13	傾斜地における植樹位置のマーキング手順	14
図 2-14	ワイヤーを用いた植樹位置のマーキング	15
図 2-15	植樹位置とテラスの壁の関係	15
図 2-16	ドリルによる植樹位置の掘削	16
図 2-17	植樹されたパームヤシの苗木	17
図 2-18	傾斜地において誤差が発生する例	18
図 2-19	マルチ GNSS 測位を活用した植樹位置の決定 [15]	19
図 2-20	植樹に特化したドリル付きトラクター [16].....	20
図 2-21	マルチ GNSS 測位の仕組み	22
図 2-22	RTK-GNSS 測位の仕組み.....	23
図 3-1	ステークホルダ図	26
図 3-2	ユースケース図	29
図 3-3	本システムの Functional Flow Block Diagram	30
図 3-4	植樹計画作成機能の Functional Flow Block Diagram	30
図 3-5	現在位置取得機能の Functional Flow Block Diagram	31
図 3-6	植樹位置表示機能の Functional Flow Block Diagram	31
図 3-7	システムの機能構成図	36
図 3-8	システムの物理構成図	37

図 3-9	システム構成図	39
図 3-10	アーキテクチャ設計図	40
図 4-1	実験フィールドの場所 [25].....	41
図 4-2	衛星測位検証のためのシステム構成(1台あたり).....	43
図 4-3	実験フィールドに於ける上空の衛星配置	44
図 4-4	アンテナ位置によるばらつきの差	45
図 4-5	UHF 通信による電波到達距離	47
図 4-6	基準局を丘の頂上に設置した場合の UHF 電波の到達確認	47
図 4-7	プロトタイプ of システム構成図	49
図 4-8	プロトタイプ of 全体構成	49
図 4-9	作成したプロトタイプ	50
図 4-10	プロトタイプ of 受信機部	50
図 4-11	伐採方向決めのための計画図	52
図 4-12	植樹位置決めのための計画図	53
図 4-13	実験のために設置された基準局	53
図 4-14	プロトタイプを利用した植樹位置決めの様子	54
図 4-15	プロトタイプを利用した伐採方向決めの様子	54
図 4-16	伐採方向決めの結果	56
図 4-17	植樹位置決めの結果	57

表目次

表 2-1	従来手法の調査	8
表 2-2	本研究で利用したマルチ GNSS 受信機	23
表 3-1	ステークホルダの一覧	26
表 3-2	要求分析のためのインタビューの概要	27
表 3-3	主なステークホルダ要求	28
表 3-4	システム設計	29
表 3-5	機能設計	30
表 3-6	本システムの要求識別性(RVTM)	32
表 3-7	検証項目の定義	33
表 4-1	衛星測位実験の概要	42
表 4-2	衛星測位実験の使用機器	42
表 4-3	衛星測位実験の結果(m)	44
表 4-4	UHF を利用した RTK-GNSS 測位の検証の概要	46
表 4-5	UHF を利用した RTK-GNSS 測位の検証の使用機器	46
表 4-6	伐採方向決めの結果	55
表 4-7	植樹位置決めの結果	57
表 4-8	プロトタイプを用いた実証実験の所要時間	58
表 5-1	現場作業員インタビュー	62
表 5-2	ステークホルダインタビュー	63
表 5-3	ステークホルダ要求に対する評価	64

1.序論

1.1.研究の背景と問題意識

マレーシアではプランテーションによるパームヤシ栽培でのパーム油の生産が盛んである。このパーム油は食料用途への需要に加え次世代エネルギーとしての期待により需要が増している。一方でプランテーション拡大に伴う原生林の消失や動植物の絶滅危機などが社会問題となっており、プランテーションのさらなる面積拡大は困難になっている [1]。また、パームヤシの寿命はおよそ 25 年であり、プランテーションを管理・経営している企業ではおよそ 25 年毎に老朽化したパームヤシを伐採し、新たに植樹し直している（以下、再植樹） [2]。再植樹は収穫量が減少する前に実施されることが理想だが、再植樹に時間を要することや必要な人的・物的リソースの不足から、30 年を超えても再植樹が間に合っていないプランテーションが多く存在する。そのため、再植樹に必要な期間や人員の短縮が必要となっている。加えてこの再植樹の際に面積当たりで最も生産量が期待できるレイアウトに植樹することが求められている。これらの問題を効果的・効率的に改善する手法が確立されておらず、1 ヘクタール当たりの植樹本数が 135 本から 115 本に低下してしまうなどの問題が起きている。

1.2.研究の目的

本研究の目的はパームヤシプランテーションにおける再植樹プロセスにおいて低コストで効果的かつ正確な植樹位置決定を支援できるシステムを実現することである。プロトタイプを作成し実際のプランテーションにて検証し、有効性の確認を行う。これにより、作業に要する日数や人員の削減の実現が期待される。また、一定面積で最も収穫量の期待できる植樹計画を支援する。

1.3.論文の構成

本論文の構成について説明する。1 章の序論では研究の背景と目的について論じた。2 章ではパームヤシプランテーションの現状や対象のフィールドとしたマレーシアにおけるプランテーション事業の歴史と現状、再植樹プロセスの分析、課題抽出を行った。3 章ではステークホルダを明らかにした上で各ステークホルダからの要求を抽出し、人工衛星による高精度測位を利用した植樹位置支援システムの設計を行った。ここでのポイントはプランテーション事業者に対し実際にオブザベーションやインタビューを行

った結果を用いて設計することで、実際のプランテーションでの業務での利用を想定して設計を行ったことである。4章ではシステムを評価するためにプロトタイプの実装と、予備実験として衛星測位サブシステムの検証実験を行った。また、プロトタイプを用いて実際に「伐採方向決め」と「植樹位置決め」を行い、従来手法との比較を行った。5章では4章での実証実験の結果を元にシステム要求に対する評価を行った。また、ステークホルダにインタビューを行いステークホルダ要求に対する評価を行った。6章では、実証実験の結果を元にした従来手法に対する提案システムのメリットやインタビュー結果に対する考察を行った。また、実用化に向けての課題や今後の展望について述べた。

2.現状と課題

2.1.パームヤシプランテーションの現状

プランテーションによるパームヤシの栽培はインドネシアとマレーシアの二カ国で世界生産シェアのおよそ8割を占める [3]。パームヤシの果実からは植物油であるパーム油が生産でき、パームヤシのプランテーションの多くはこのパーム油の生産を目的としている。このパーム油は食料油として利用されており、植物油脂として世界最大の生産量かつ我々の生活で身近な物となっている。また近年では石油に代わる代替エネルギーとしての活用も注目されており、食用と燃料用の両面から需要が増している [4]。これに伴いプランテーションの開拓が進み、1989年には1,037万トンだったパームヤシの生産量が2010年には4,591万トンとおよそ4.4倍に増大した [5]。一方でパームヤシプランテーションの面積拡大に伴い、原生林の消失や動植物の絶滅が危惧されている [6, 7]。このことからできるだけプランテーションの面積の拡大をすることなく生産量を増加させることが期待されている。また、パームヤシは植樹から25年ほど経過すると油の生産量が低下してしまうため、マレーシアでパームヤシのプランテーション事業を展開する企業では、25年に一度パームヤシの木を伐採し、新しい苗を植える再植樹(リプランティング)を行っている。

2.2.マレーシアにおけるパームヤシプランテーション事業

マレーシアにおいてパームヤシのプランテーションは国土のおよそ15%を占め、パーム油とパーム油加工物が主要第一次生産品輸出額の35.5%を占める [8]。マレーシアにおいてパームヤシの商業的な栽培が初めて開始されたのは1917年である [9]。当初、マレーシアではパームヤシよりもゴムのプランテーション栽培が盛んであったが、天然ゴムの需要の低下や、パーム油の国際的な需要の増加を受けてパームヤシの栽培が盛んとなり、1965年にはパーム油の生産量がゴムの生産量を抜いた [7]。その後もパームヤシプランテーションは急速に拡大を続け、1975年には64万2000ヘクタールだったものが2016年には574万ヘクタールにまで拡大した [10]。このパームヤシのプランテーション栽培は従来は自作農が中心であったが、国家レベルでのプランテーション事業の効率化や大規模化を目的として、1958年にFederal Land Development Authority(FELDA:連邦土地開発庁)が設置された。FELDAの設立により、マレーシアのパームヤシ事業は輸出をより意識した近代的なものとなり、パーム油はマレーシアの重要な産業となった。現在FELDAのプランテーション事業は民営化され、Felda Global Ventures Holdings(FGV)を親会社とする企業群としてパームヤシプランテーション事業やパーム油に由来する

製品の製造など他分野に渡ってマレーシアのパームヤシ関連産業を支えている。プランテーション事業の統括を行う Felda Agricultural Services Sdn Bhd、パームヤシプランテーション事業を運営する Felda Global Ventures Plantations(M) Sdn Bhd、パームヤシの品種改良やプランテーション事業への各種技術の推進を目的とする Felda Global Ventures Research & Development Sdn Bhd などが挙げられる。2016 年現在 Felda Global Ventures グループが直接管理をするパームヤシプランテーションはマレーシア国内の 70 万ヘクタールを占め、マレーシアにおいて第一位、世界においても第三位のプランテーション事業者となっている。Felda Global Ventures 以外のプランテーション事業者としてマレーシア国内でおよそ 35 万ヘクタールを管理している世界最大の Sime Darby Plantation 社 [11]やおよそ 18 万ヘクタールを管理する IOI Groups 社が挙げられる [12]。本研究では Felda Global Ventures グループと協力し、システムの開発を行った。

2.3.再植樹

パームヤシは図 2-1 が示すように、植樹されてから最初の 9 年ほどの成長期間の後 10 年から 20 年間は安定して実を収穫することができる [13]。しかしながら 20 年を経過した後は収穫量が低下する。このためパームヤシプランテーションではおよそ 20 年～25 年に一度、既存のパームヤシを伐採し、新たな苗を植樹する再植樹(リプランティング)が実施されている。マレーシアにおいて Felda Global Ventures グループが管理するパームヤシプランテーションでは 2015 年現在で樹齢 25 年を経過したプランテーションは 26%を占め、21 年を経過したものと合わせると 43%になる [14]。従ってこのような生産性の低い老朽化したパームヤシの再植樹の実施は急務であり、再植樹のプロセスの効率化が期待されている。

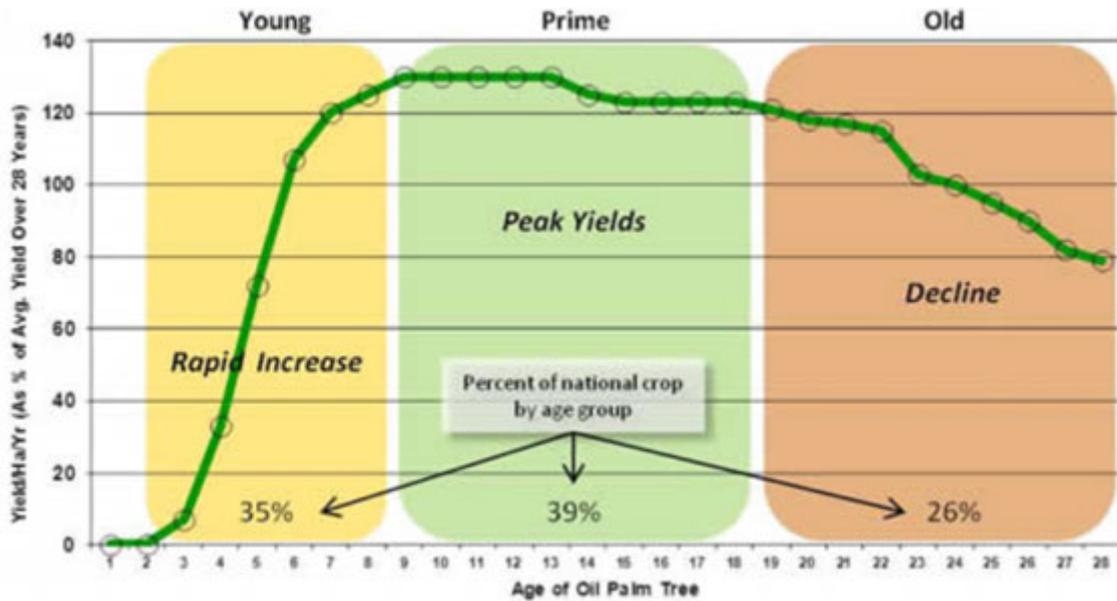


図 2-1 パームヤシの樹齢による収穫量の推移
 (https://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2012/12/Malaysia/)

パームヤシプランテーションは土地形状により図 2-2 に示すような平坦地と、図 2-3 のような丘が連なる傾斜地に二分され、再植樹のプロセスもこれらの土地形状により異なる。それぞれの土地形状における再植樹プロセスを図 2-4 に示す。傾斜地においては始めに伐採を行った後に道路やテラスと呼ばれる段々畑の位置決めを行い、これらの造成を行う。一方平坦地では、パームヤシを伐採する方向を決めるためにマーキングし、その方向に伐採する。新たな植樹の計画は紙媒体のマニュアルを元に面積から植樹本数が決定される。続いて再植樹位置をコンパスやワイヤー、水準器などを用いて決定し、棒でマーキングしていく。その後、ドリルでマーキング箇所を掘削し、新たな苗木を植樹する。



図 2-2 パームヤシプランテーション(平坦地)



図 2-3 パームヤシプランテーション(傾斜地)

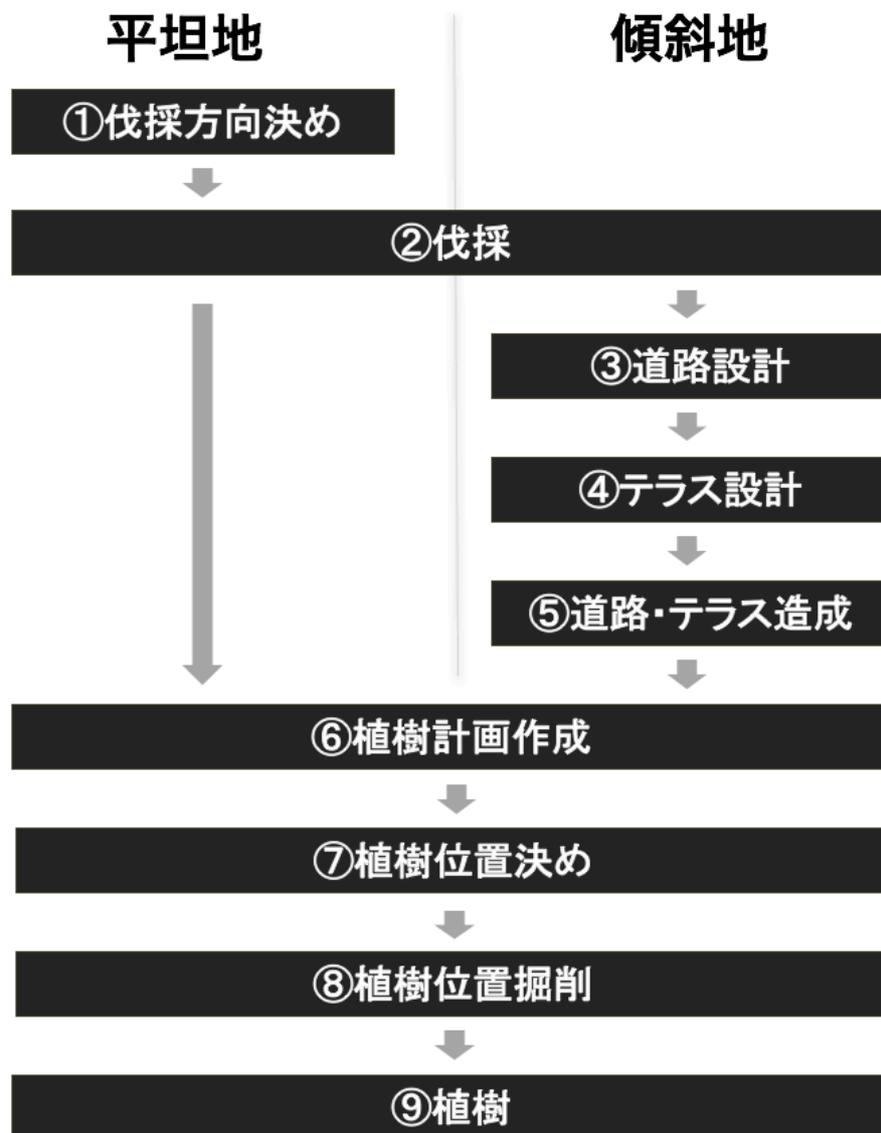


図 2-4 再植樹プロセス

2.3.1. 再植樹手法のオブザベーション

本研究では再植樹の課題を抽出するためマレーシア最大のプランテーション企業である Felda Global Ventures のプランテーションにて従来手法をオブザベーションすることで調査した。表 2-1 に調査の概要を示す。

表 2-1 従来手法の調査

日時	2016年7月19日～21日
場所	FELDA Krau2 Estate (マレーシア Bentong 近郊)
対象	Felda Global Venture ・再植樹管理担当(Mohd Najib Abdul Rasid 氏) ・研究開発担当(Haryati Abidin 氏、Mohd Na'aim B. Samad 氏) ・現場監督者 ・現場作業員
手法	・オブザベーション 従来手法のエスノグラフィ
目的	再植樹の従来手法の調査、課題抽出のため

調査より明らかとなった従来手法の主要な再植樹プロセスを述べる。

① 伐採方向決め(平坦地のみ)

平坦地ではパームヤシを伐採する前に伐採を特定の方向に行うため伐採方向決めの作業が行われる。図 2-5 に示す図を用いて伐採方向決めについて述べる

- i. 図の P0 のように、パームヤシから 3 フィート東に離れた地点にてコンパスを用いて北方向を確認し、一定の長さのワイヤーを用いて植樹位置を決定する (P1)、この P0 と P1 はメインポイントと呼び、これらの間には 3 箇所のサブポイントが存在する。これらの 1 つのメインポイントと 3 つのサブポイントに棒を打ち込んで植樹位置をマーキングする。その後、図 2-6 のように、P0 に於いて北方向から 60 度の方向を確認する。同じワイヤーを用いて同様に位置(P2)を決定し、メインポイント P2 とその間のサブポイントを棒を用いてマーキングする。さらに P2 と P1 間にワイヤーを移動し、この間のサブポイントをマーキングする。これにより正三角形が完成する。
- ii. P0P2 間のサブポイントから P1P2 間のサブポイントをワイヤーで結び、直線にすることで P1P3 間のサブポイントを決定する。これらのサブポイントと P2 をワイヤーで結ぶことで P3 ポイントを決定する。
- iii. 同様の作業を東西方向、南北方向に繰り返すことで正三角形が順々に完成する。メインポイントとサブポイントにはそれぞれ図 2-7 に示すような目印付きの棒を建てマーキングし、伐採時の目標となる。

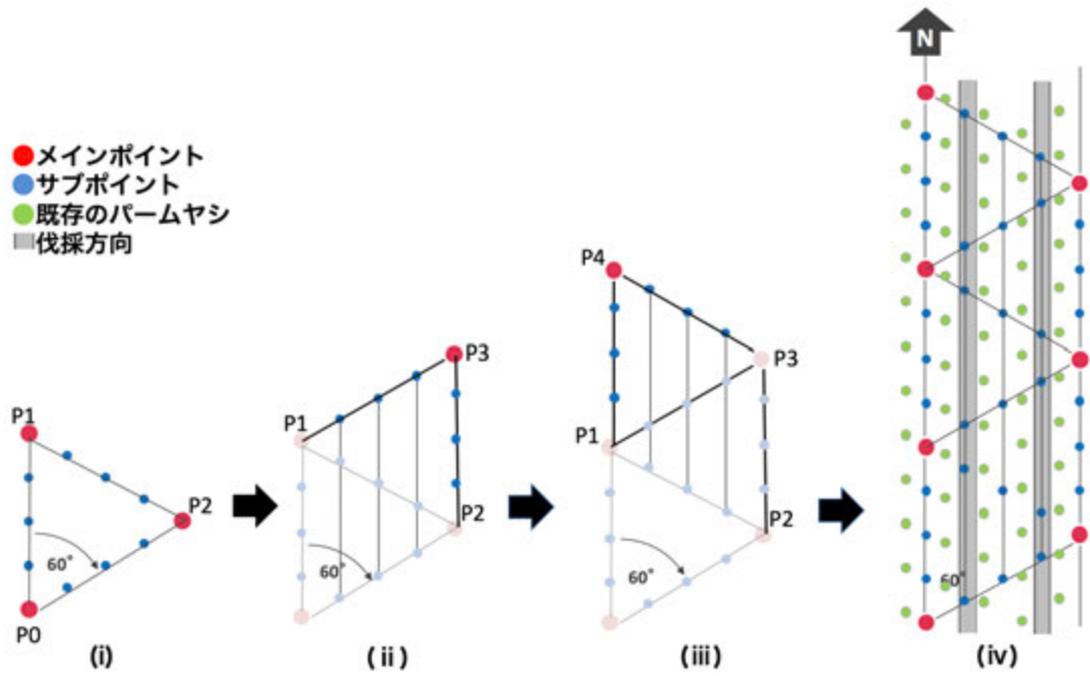


図 2-5 伐採方向決めの手順



図 2-6 伐採方向決めの様子



図 2-7 位置決めの目印

② 伐採

平坦地では伐採方向決めのマーキングに従って伐採する。傾斜地ではひとつ下のテラス方向に向かって伐採を行う。伐採されたパームヤシはその場でショベルカーを用いてチップ状に解体される。



図 2-8 伐採の様子

③ 道路位置決め(傾斜地のみ)

丘状な傾斜の頂上からプランテーション内を網羅するメイン道路までを図 2-9 のように傾斜角 6° で螺旋状に設計する。図 2-10 のように分度器と測量機を用いて数メートル毎に測量し、棒を設置してマーキングを行う。

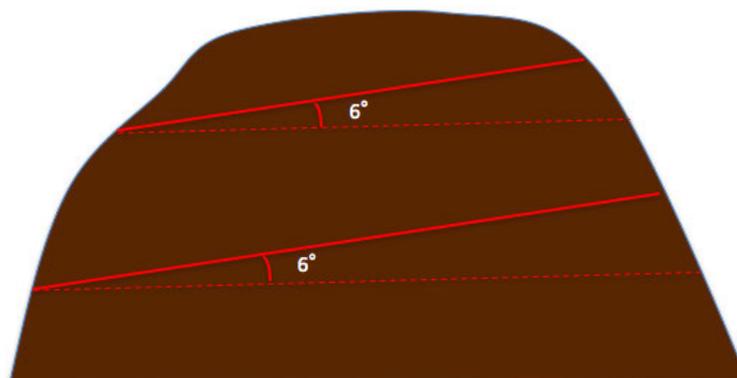


図 2-9 テラスの道路の側面図



図 2-10 道路位置決めの様子

④ テラス位置決め(傾斜地のみ)

図 2-11 のように丘の頂上から下につなぐ道路に接続するように水平にテラスを設計する。図では赤線が道路を示し、黄色線がそれに接続するテラスを示す。丘を一周するように測量し、数メートル毎にマーキングする。テラスの造成間隔は、対象傾斜地の平均傾斜角の測量値に基づいて設定される。

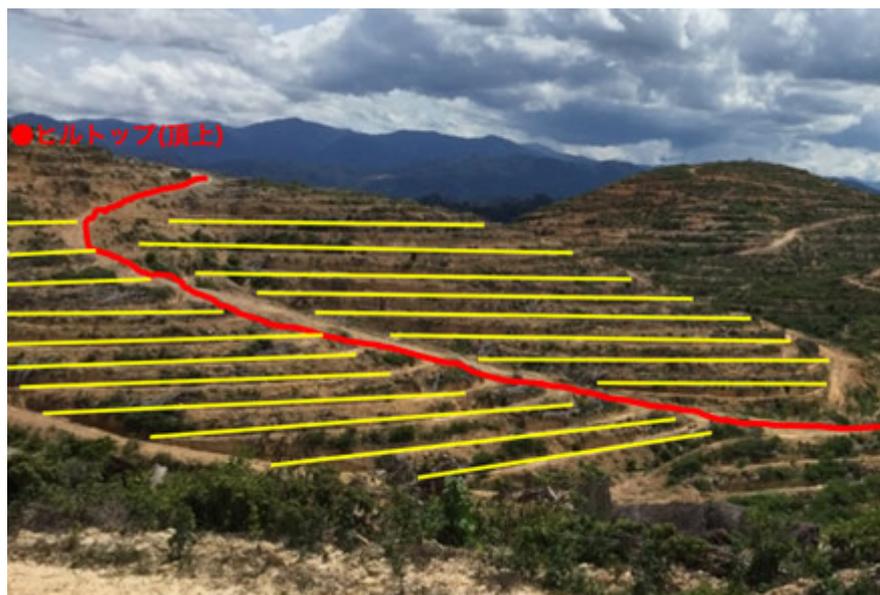


図 2-11 丘に造成された道路とテラス

⑤ 道路・テラス造成(傾斜地のみ)

工程③④にてマーキングした棒に沿ってブルドーザーを用いて道路、テラスの順に造成を行う。降雨が流出せずに溜まるよう、テラスは内側に向かって約 12° 傾くように造成する。



図 2-12 ブルドーザーによる造成

⑥ 植樹計画作成

造成された地形のテラスのサイズや面積に応じて新たに植樹する苗の間隔や本数を決定する。再植樹前の収穫量などのデータを元に再植樹後の予想収穫量を想定する。

⑦ 植樹位置決め

平坦地においては「①伐採方向決め」で利用したメインポイント間に3~4つの植樹ポイントをワイヤーを用いてマーキングする。伐採の際にメインポイントが破壊されるなどの理由で消失している場合は、再度特定の一点からコンパスを用いて北方向と北方向から東に 60° 度方向にワイヤーを用いて測定し、マーキングを行う。

傾斜地においては図 2-13 に示すとおり、造成された丘の頂上の中心の点を定め、

中心の点からコンパスを用いて真北方向にワイヤーを伸ばす。一段目のテラスにおいて、このワイヤーとの交差点を最初の植樹位置とする。この植樹位置よりテラスのサイズに応じて等間隔な長さのワイヤーを用いて測定し、植樹位置のマーキングを一周行う。このマーキング位置は図 2-15 のようにそれぞれテラスの壁から 1メートルの間隔を開ける。上から 2 段目以降のテラスは一つ上のテラスの植樹位置の中間点を一点取り、その点から同様にマーキングを行う。

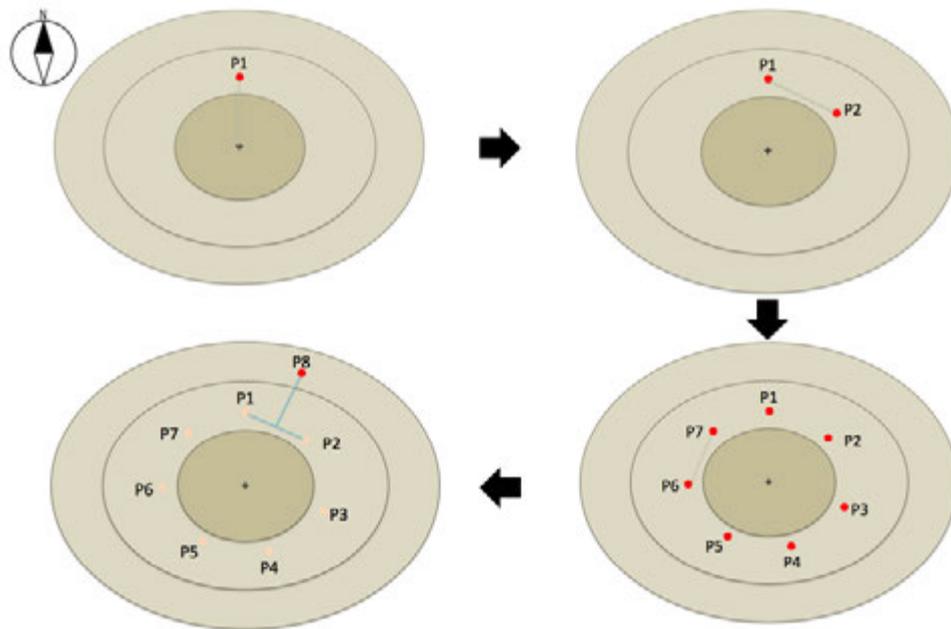


図 2-13 傾斜地における植樹位置のマーキング手順



図 2-14 ワイヤーを用いた植樹位置のマーキング

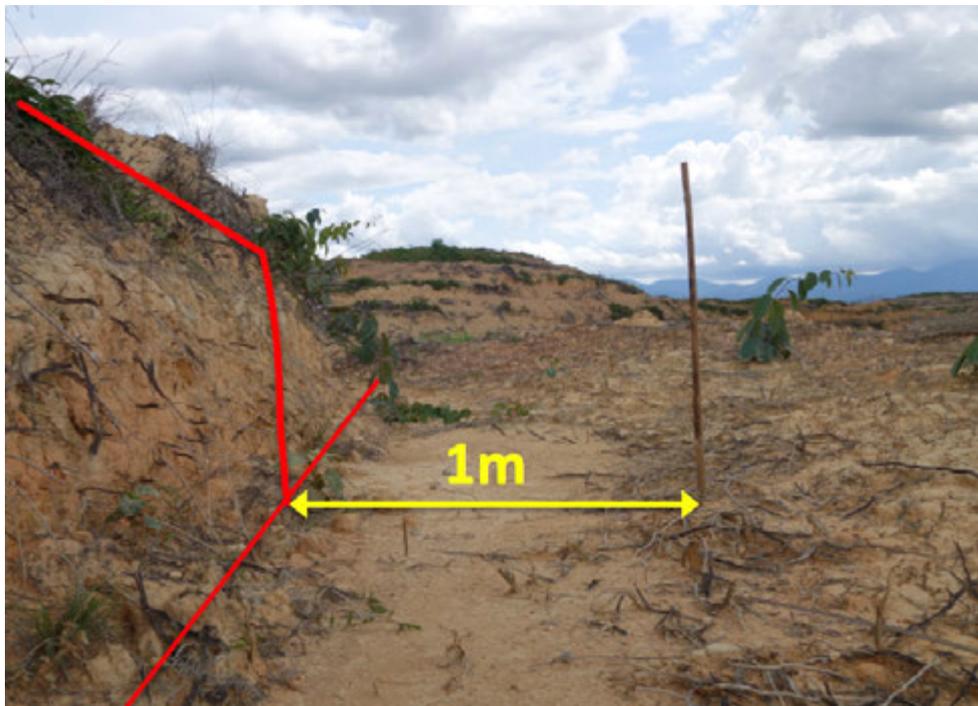


図 2-15 植樹位置とテラスの壁の関係

⑧ 植樹位置掘削

工程⑦でマーキングされた植樹位置をドリルを搭載したブルドーザーにて掘削する。



図 2-16 ドリルによる植樹位置の掘削

⑨ 植樹

⑧で掘削した穴にパームヤシの新たな苗木の苗付けを行う。



図 2-17 植樹されたパームヤシの苗木

2.3.2. 再植樹プロセスの課題

2.3.2.1. 植樹位置の精度の誤差

パームヤシは苗の段階では全長およそ 1.5 メートルであるが、10 年後にはおよそ 20 メートルの高さまで成長するため、パームヤシ同士の間隔を正しく開けることが求められる。しかしながら、2.1 項で述べた通り、従来手法における植樹位置のマーキングのための間隔の測定にはワイヤーが利用されていることから、間隔がずれてしまい成長後の葉同士の衝突や影の影響による生産量低下が発生している。また、ある一点からとなりの点までの誤差は僅かなものであっても、更にとり隣の点はその点からの距離で決定

するため、それぞれの箇所での誤差が蓄積されていく。例えば図 2-18 では P1-P2 間の誤差は 10 センチメートルであったが、10 センチメートル本来の位置よりずれた P2 を元に P3 を決定し、P2-P3 でも 10 センチメートルの誤差が発生したとすると。P7 では誤差が蓄積されてしまい 60 センチメートルの誤差となる。これにより 1 ヘクタール当たり植樹できる本数が本来 135 本/ヘクタールであったはずが、115 本/ヘクタールに低下するなどの例が実際に報告されている。

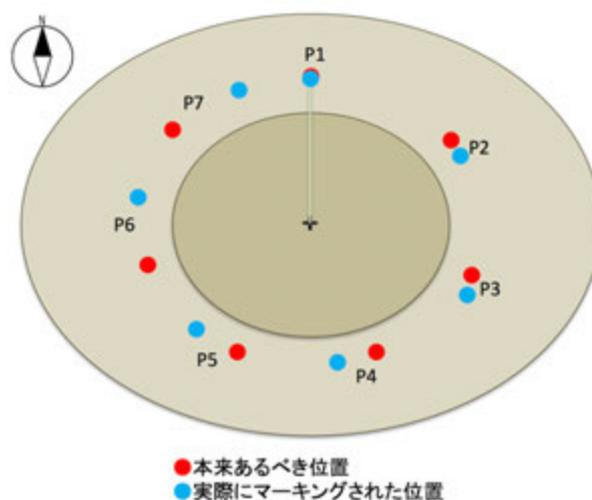


図 2-18 傾斜地において誤差が発生する例

2.3.2.2. 日数

パームヤシプランテーションの再植樹プロセスには様々なプロセスが存在するが、300ha 当たり平均 6 ヶ月の日数を要する。また、1 年のうち再植樹が可能なのは乾季である 4 月から 10 月までと限られる。さらに、従来手法ではある一点から次の点を次々と決めていくため、同時に複数箇所での位置の決定とマーキングを開始できない。傾斜地においても一つ上のテラスのマーキング位置を元に下のテラスの最初の植樹位置を決定するため、下のテラスのマーキングは上のテラスが終わるのを待たなくてはならない。

2.3.2.3. 労働者のリテラシーの低さ

プランテーションにおいて再植樹の作業を実際に行う現場作業員はバングラデシュやインドネシアをはじめとする東南アジア周辺諸国からの出稼ぎ労働者が多くを占める。また、プランテーションの所有者である Felda Global Ventures Plantation(M)が直接雇用する労働者の他に、一定期間の雇用に限られた契約労働者も存在する。このため、作業にあたって長時間の教育や複雑な手順を要するシステムなどの普及は困難である。従

来手法による再植樹作業も細部に渡ってマニュアル化されているものの、実際にはマニュアルに沿わない作業も見受けられた。

2.4.再植樹に関する既存の取り組み

2.4.1. マルチ GNSS 測位を活用した植樹支援

Universiti Putra Malaysia の I Nur Aini らはプランテーションの再植樹プロセスにおいて、新たな苗木を植樹する位置の支援のために GPS を始めとする全地球測位システムを利用したシステムの開発を行った [15]。従来より利用されている米国の GPS 衛星に加え、ロシアの GLONASS 衛星を合わせて利用するマルチ GNSS 測位を利用することで高い位置精度を実現している。9メートルの間隔で40箇所の植樹位置の設計図を作成し、Javad社製のマルチGNSS受信機を利用して実験を行っている。これによりマルチGNSSを利用することで0.5メートルの精度で植樹位置決めが行えることを確認した。また、40箇所のマーキングに必要な時間が、GPSのみの測位の場合に315分かかったのに対し、マルチGNSS測位を利用することで290分に短縮されることを確認した。この様に人工衛星を利用した測位システムを利用することで新たな苗木の植樹位置の決定の精度や所要時間の向上が見込まれる。

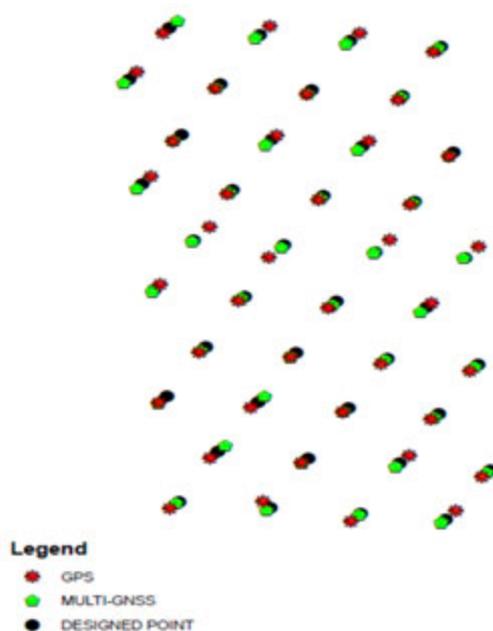


図 2-19 マルチ GNSS 測位を活用した植樹位置の決定 [15]

2.4.2. 植樹に特化したトラクターの開発

Universiti Putra Malaysia の Siamak MOSLEHI ROODI らは再植樹プロセスにおいて、新たな苗を植えるための穴の掘削と苗の植樹を同時に行うことができる装置の開発を行った [16]。従来は植樹位置に苗を植えるための穴の掘削を行ったあと、苗を運搬して植樹する作業はそれぞれ別々に行われていた。図 2-20 に示すとおり一台の車両の後部に穴を掘削するためのドリルを搭載し、荷台に苗木を搭載できるようにした。また、従来手法より人員の短縮を図り、車両を運転する作業員とドリルを操作する作業員の二名で実施できるように設計を行った。この機械化された作付けシステムにより従来手法では 1 人の作業員が 1 日に植樹できる苗木は 45 本であったものが、1 日あたり 120 本と 2.67 倍に拡大した。



図 2-20 植樹に特化したドリル付きトラクター [16]

2.5.人工衛星を利用した高精度測位

米国の GPS など人工衛星を利用した測位システムはスマートフォンやカーナビゲーションシステムに搭載され、我々の生活において身近なものとなっている。人工衛星を利用した測位システムは正式名称に全地球測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)と呼ばれる。一般的な GNSS として米国の GPS の他にロシアの GLONASS、中国の BeiDou、欧州の Galileo などが挙げられる。また、GNSS を補完する目的としてある一定地域の対象とする RNSS(RNSS: Regional Navigation Satellite System)も存在し、日本の準天頂衛星もこれに該当する。ユーザは受信機を利用することで4つ

の測位衛星から信号を受信し、それぞれの衛星から受信に要した時間を元に距離を算出し、現在位置の特定が可能となる。2016年現在、GNSSはGPSが32基、GLONASSが24基、BeiDouが15基運用中で、Galileoは8基体制で試験運用中である。また、RNSSは準天頂衛星が1基運用中である。一般的に受信できる衛星の数が増えることにより安定して高い精度で測位を行うことが可能となる。

2.5.1. マルチ GNSS 測位

従来、測位に使用される衛星は米国のGPSが主に利用されていたが、近年ではGPSに加えGLONASSも併せて利用されるようになった。GNSSによる測位では受信可能な衛星数により測位に必要な時間や精度が変化する。GPSにのみ対応している受信機の場合、建築物や樹木など天空が一部遮蔽されていたり、地域や時間により衛星の配置が少なくなるといった問題があった。マルチGNSSはこれらの課題を改善するため、図2-21のように複数種のGNSSを同時に受信し、衛星数を増やすことを実現している。しかしながら、GPSとGLONASS、BeiDouが送出する信号は同一のものではなく、相互運用性は完全ではない。なお、日本の準天頂衛星はGPSを補完する目的で開発されたことから、送出する信号はGPSと同一であり、日本やアジア地域の上空に長時間滞在することから測位性能向上への寄与が期待されている [17]。

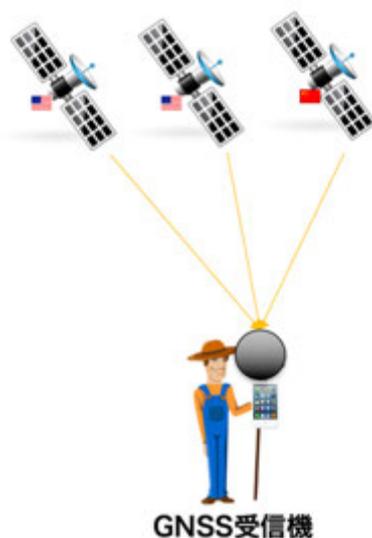


図 2-21 マルチ GNSS 測位の仕組み

2.5.2. RTK-GNSS 測位

RTK-GNSS 測位は Real Time Kinematic の略である。一般的に GNSS による測位は位置を測位したい箇所の一点に一台の GNSS 受信機のみで成立するが、精度はマルチ GNSS を用いた場合でおよそ 10 メートル前後である。RTK-GNSS による測位は図 2-22 のように位置を測位したい箇所の受信機(移動局と呼ぶ)に加え、基準局と呼ばれる別の箇所の受信機の測位データを補正データとして利用することで、センチメートル未満の高精度な測位を実現したものである [18]。基準局は一般的に良好な天空環境かつその地点の正確な座標が既知である場所に設置される。この基準局と移動局それぞれで受信した搬送波位相の差を利用することで移動局の正確な位置を算出する。この際、整数値バイアスを位相差から算出する必要があり、整数値バイアスが収束するまでの測位結果を FLOAT 解、整数値バイアスが収束し決定した後の測位結果を FIX 解と呼ぶ [19]。FLOAT 解による測位結果でも基準局を利用しないマルチ GNSS 測位よりも高い精度での測位が可能でおよそ 20 センチメートルである。基準局は政府機関などが整備した恒久的な電子基準点を利用することが可能である他、利用者が一時的に基準局を設置することも可能である。マレーシアにおいてはマレーシア測量地図局(JUPEM)により電子基準点が各地に整備され MyRTKnet と呼ばれる RTK-GNSS 測位向けのサービスが有償(1 年間 1000 マレーシアリングギット)で提供されている [20] [21]。基準局から移動局への補正データの送信には 3G W-CDMA や LTE といった携帯電話ネットワークや UHF 無線通信などが利用される。

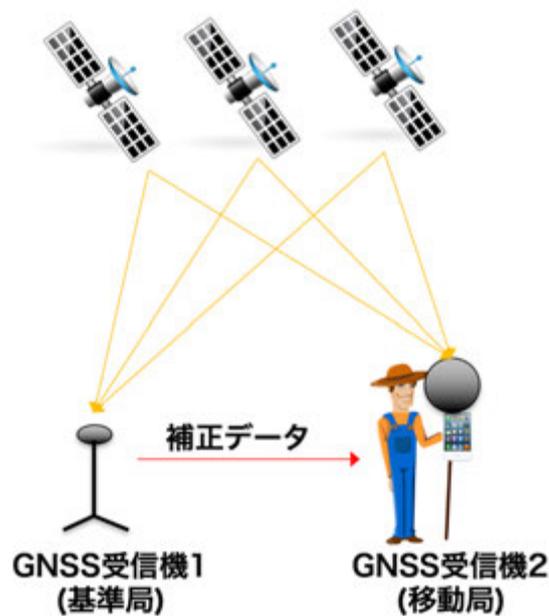


図 2-22 RTK-GNSS 測位の仕組み

2.5.3. マルチ GNSS 受信機

マルチ GNSS 受信機は対応している衛星に加え、対応する信号により様々なものが存在する。例えば一般的なナビゲーション用は安価ではあるが GPS と GLONASS にのみ対応している。表 2-2 に本研究で利用した代表的な GNSS 受信機をまとめる。

表 2-2 本研究で利用したマルチ GNSS 受信機

機器名	対応衛星	GPS 対応信号	価格(1 台)
ガーミン 62SCJ	GPS, QZSS, GLONASS	GPS(L1)	約 8 万円
u-blox M8T	GPS, QZSS, GLONASS or BeiDou	GPS(L1)	約 3 万円
Trimble NetR9	GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou, Galileo	GPS(L1+L2C)	約 250 万円
Topcon GR-4	GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou, Galileo	GPS(L1+L2C)	約 250 万円

受信機の価格は GPS の対応信号により大きくなる。スマートフォンや GPS ロガーなど一般的に普及している GNSS 受信機は GPS の L1 信号にのみ対応している [22]。L2C 信号は第二民間周波数信号と呼ばれ、これまで軍事利用に限られていた L2 信号を民生

用に拡張したものであり、測位精度が大きく向上する [23]。L2C 信号に対応したマルチ GNSS 受信機は一般的になりつつあるが価格は 200 万円以上なものが多い [24]。

3.設計

本章では、パームヤシプランテーションに於ける再植樹プロセスの内、植樹計画の作成、植樹位置の決定の過程を効率化させるシステムの設計を行う。システムを設計するにあたり、まず要求分析を実施し、その結果からアーキテクチャ設計を実施した。

3.1.コンセプト

パームヤシプランテーションの再植樹プロセスにおいて従来手法では伐採方向の決定や植樹位置の決定にワイヤーを用いて長さを測り、棒を刺してマーキングすることで実施していた。この手法ではワイヤーを用いることによる人的ミスでの誤差の発生や、誤差が蓄積すること、作業に多くの人員が必要であることが課題であった。そこで本研究では伐採方向の決定や植樹位置の決定を支援し効率化させるシステムの設計を行う。ユーザは UAV や観測衛星から取得した地形データをソフトウェア上に取り込み、画面に表示される地形データを元に伐採方向や植樹位置の設計を行う。これによりその地形に最も適した植樹計画の作成が可能になる。また、実際にフィールド上で伐採方向の決定や植樹位置のマーキングを実施する際には人工衛星を用いた高精度測位により、現在位置とマーキングすべき位置が画面上に表示され、視覚的な認識が可能になる。プランテーションの中でも高精度に現在位置を取得する手段として人工衛星による RTK-GNSS 高精度測位を利用する。

3.2.要求分析

本研究では、プランテーションに於いて実際に業務を行うワーカーと呼ばれる現場作業員と現場監督者をユーザとする。現状の再植樹プロセスの把握や、課題の抽出をした上でシステムに対するユーザの要求を明らかにするために要求分析を行った。マレーシア最大のプランテーション企業である Felda Global Ventures と共同で実施した。

3.2.1. ステークホルダの特定

マレーシアのプランテーションに於ける再植樹プロセスの効率化のためのシステムのステークホルダを特定するためステークホルダの一覧と役割を表 3-1 に示し、ステークホルダの関係図を図 3-1 に示す。システムを実際に利用するユーザとして現場監督者と現場作業員の他に Felda Global Ventures 社の研究開発部門や再植樹管理部門の担当者が登場する。現場作業員は再植樹作業の際に実際に現場にて作業を行う人員を指す。現場監督者は現場作業員の取りまとめを行う他に、担当フィールドの植樹計画の管理を

行う。再植樹管理担当はすべてのエリアの再植樹プロセスの教育、改善を担当する。研究開発担当はプランテーションの経営・運営に最新技術の導入などの支援を行う。これらのステークホルダは全員 Felda Global Ventures グループと雇用関係を持つ。

表 3-1 ステークホルダの一覧

ステークホルダ名	役割
研究開発担当	プランテーション業務への ICT 技術の導入の検討・推進
再植樹管理担当	全エリアの再植樹の管理、プロセス改革の推進
現場監督者	現場における再植樹の管理、計画作成、監督
現場作業員	現場における作業の実施

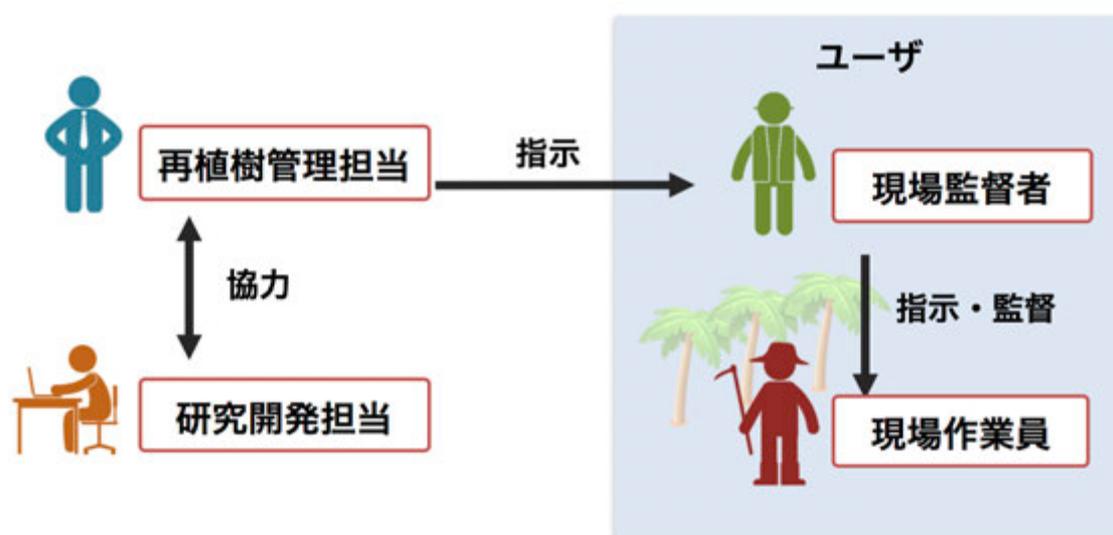


図 3-1 ステークホルダ図

3.2.2. ステークホルダの要求

ステークホルダのシステムに対する要求を調査するため、主要ステークホルダに対してインタビューを実施した。インタビューの概要を表 3-2 に示す。システムのユーザは現場監督者と現場作業員であるが、現場作業員へのインタビューが実現しなかったため、現場監督者が現場作業員の統括であることから、現場監督者の要求を現場作業員の要求と同一として扱う。

表 3-2 要求分析のためのインタビューの概要

日時	2016 年 1 月 26 日 2016 年 7 月 18 日
場所	FELDA Krau2 Estate (マレーシア Bentong 近郊)
対象	Felda Global Ventures ・ 現場監督者 ・ 再植樹管理担当(Mohd Najib Abdul Rasid 氏) ・ 研究開発担当(Haryati Abidin 氏、Mohd Na'aim B. Samad 氏)
目的	再植樹プロセスの課題抽出、システムへの要求調査のため
	【結果】
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再植樹の全行程には一つのエリアあたりおよそ 6 ヶ月かかる ・ 再植樹が間に合わず 30 年が経過したパームヤシも存在する ・ 現状より再植樹に必要な時間を短縮したい ・ 従来手法では一箇所の誤差が次にも引き継がれてしまい、誤差が蓄積する ・ 地形データを利用して植樹計画を作成したい ・ 現状より人員を少なくしコストを削減したいが高価なデバイスを導入するのは困難である ・ 現場作業員は周辺諸国からの労働者が多く、特殊なスキルを要する作業は難しい ・ 現状の再植樹プロセスを大きく変えることなく生産性の向上を図りたい ・ デバイスは軽量で現場作業員が簡単に持ち運べるものが良い

このインタビュー結果を元に表 3-3 の通り各ステークホルダからの要求を明らかにした。

表 3-3 主なステークホルダ要求

	要求元	ステークホルダ要求
S1	植樹管理担当者、 研究開発担当	地形データを元に植樹計画図を作成したい
S2	植樹管理担当者、 研究開発担当	植樹計画通りの植樹を実現したい
S3	植樹管理担当者	1フィートの精度で植樹を行いたい
S4	植樹管理担当者 現場監督者	簡単なトレーニングのみで利用できると良い
S5	現場監督者	デバイスは作業時に負担のない重量であること
S6	現場監督者	雨天時でも作業を継続したい
S7	現場監督者	9時間以上連続作業をしたい
S8	植樹管理担当者	現状よりコスト、時間を短縮したい

3.2.3. システムの範囲

システムの範囲を明らかにするため、図 3-2 に示すとおり、ユースケース図を作成した。システムのユースケースは現場監督者が「地形データをインポートする」「植樹計画を作成する」と現場作業員が「現在位置を取得する」「植樹位置をマーキングする」である。

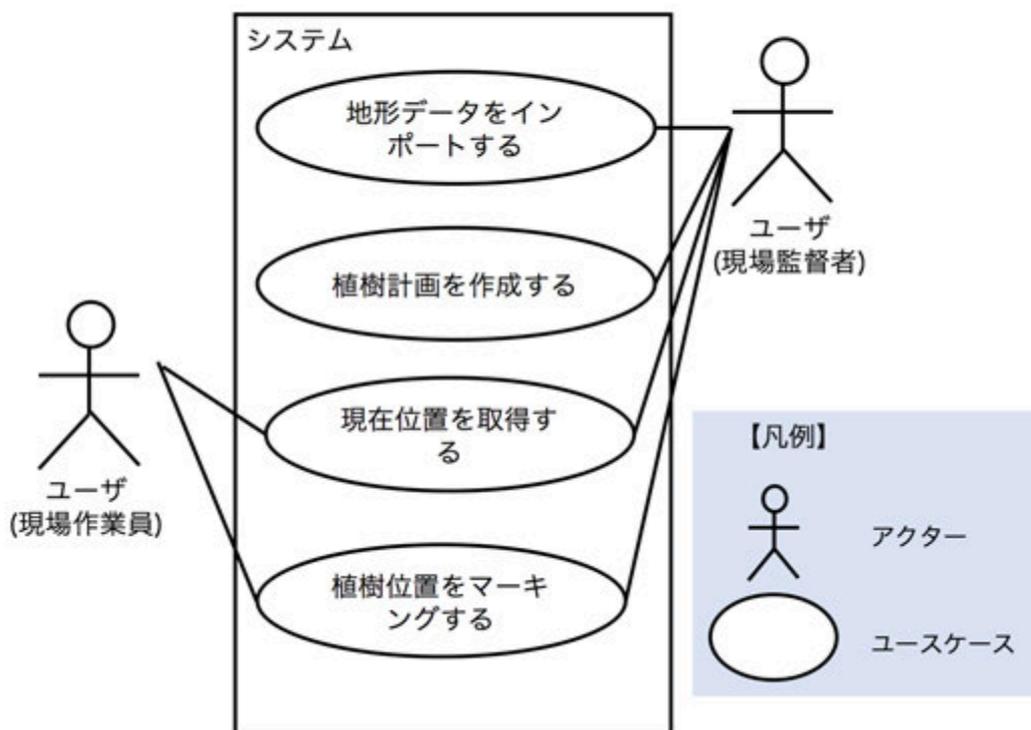


図 3-2 ユースケース図

3.3.アーキテクチャ設計

3.3.1. 機能設計

3章1節で抽出したステークホルダ要求から、表 3-4 に示すとおり、システムへの割り当てを行った。

表 3-4 システム設計

番号	システム要求	元要求
Sy1	システムは地形データ上に植樹計画の作成を可能にする	S1
Sy2	システムは植樹計画図を元に植樹を可能にする	S2
Sy3	システムは1フィートの精度で現在位置を特定する	S3
Sy4	システムは現場作業員が簡易に利用できるものである	S4
Sy5	デバイスは作業時に負担のない重量である	S5
Sy6	システムは耐候性を兼ね備えている	S6
Sy7	システムは9時間以上のバッテリー稼働をする	S7

Sy8	システムは現行プロセスより少ないコスト、期間での再植樹を実現する	S8
-----	----------------------------------	----

3.3.2. 機能分析

表 3-4 のシステム要求の機能要求より機能設計を表 3-5 の通り行った。この機能を各システム要求との対応を明らかにするため、Functional Flow Block Diagram(FFBD)を用いて根拠と流れ、階層化による細分化を実施した。本システムの機能フローは植樹計画作成機能、現在位置取得機能、植樹位置表示機能の3つに大別される。

表 3-5 機能設計

機能番号	機能名称	システム要求
F1	植樹計画作成機能	Sy1
F2	現在位置取得機能	Sy3
F3	植樹位置表示機能	Sy2

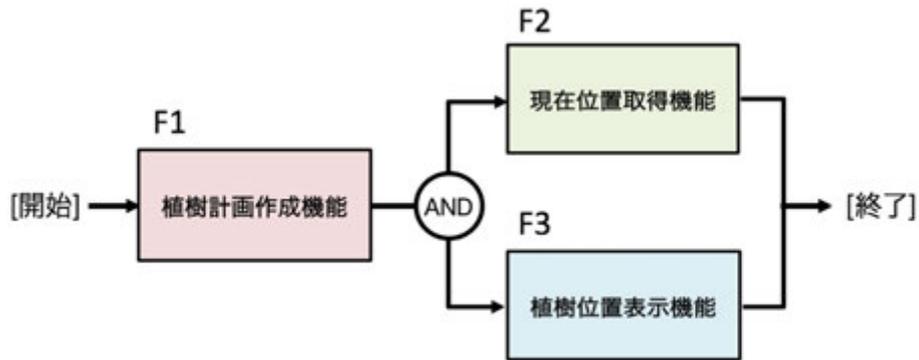


図 3-3 本システムの Functional Flow Block Diagram

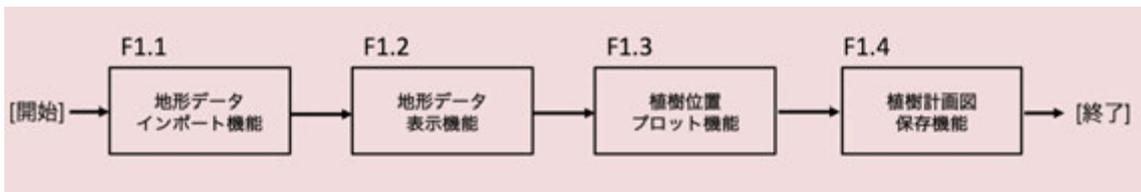


図 3-4 植樹計画作成機能の Functional Flow Block Diagram

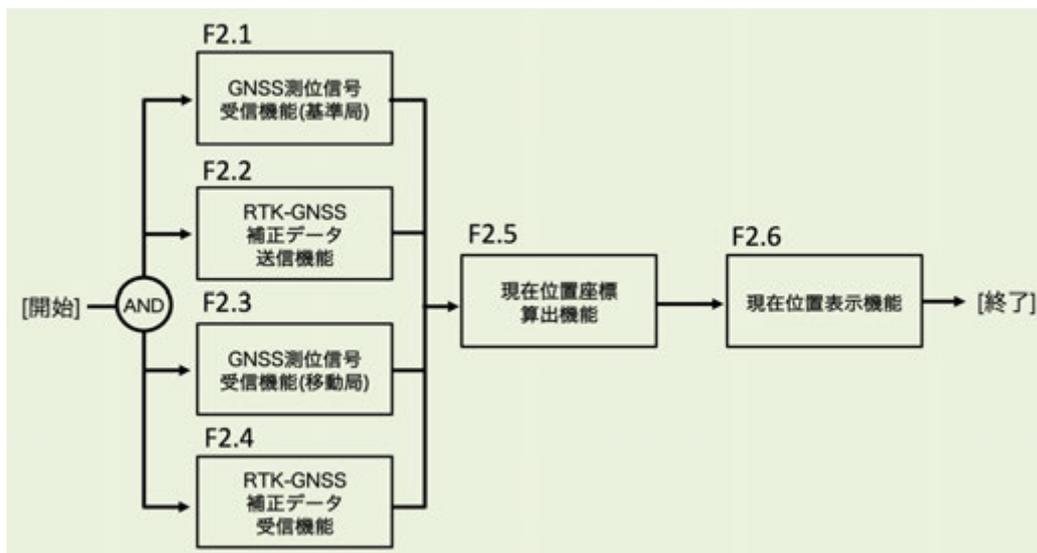


図 3-5 現在位置取得機能の Functional Flow Block Diagram

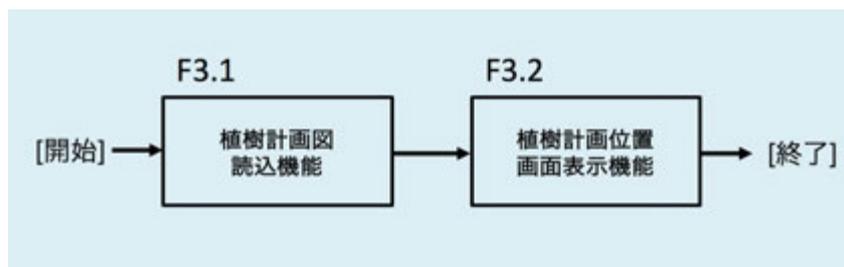


図 3-6 植樹位置表示機能の Functional Flow Block Diagram

3.3.3. 機能要求と検証識別性

システム要求と FFBD から本システムにおける機能要求を整理し、ステークホルダ要求がシステムに反映されていることを、Requirement Verification Traceability Matrix(RVTM)により要求の検証識別性を確認した。RVTM は各要求項目を検査 (Inspection)、分析(Analysis)、デモンストレーション(Demonstration)、試験(Test)によって確認を行うことで、システムにおける要求の整合性と正確性を高められるものである。

表 3-6 本システムの要求識別性(RVTM)

ID	システム名	要求	根拠	検証	
0	全体システム	0	植樹位置の決定を支援すること	S2	D
1	植樹計画作成システム	1	地形データを元に植樹計画の作成ができること	S1	D
	地形データインポートサブシステム	1.1	地形データのインポートができること	FFBD	D
	地形データ表示サブシステム	1.2	地形データを画面上に表示できること	FFBD	D
	植樹位置プロットサブシステム	1.3	植樹計画を地形データ上に作成できること	FFBD	D
	植樹計画図保存サブシステム	1.4	植樹計画図を保存できること	FFBD	D
2	現在位置取得サブシステム	2	1 フィートの精度で現在位置を特定し、表示できること	S3	T
	高精度測位サブシステム	2.1	RTK-GNSS 測位ができること	FFBD	T
		2.1.1	GNSS 測位信号を受信できること	FFBD	T
		2.1.2	RTK-GNSS 補正データ送信できること	FFBD	T
		2.1.3	RTK-GNSS 補正データ受信することができること	FFBD	T
	現在位置算出サブシステム	2.2	現在位置を 1 フィートの精度で取得できること	FFBD	T
現在位置表示サブシステム	2.3	現在位置を画面に表示できること	FFBD	T	
3	植樹位置表示サブシステム	3	植樹計画図通りに植樹を実現すること	S2	D
	植樹計画図読み込みサブシステム	3.1	植樹計画図を読み込みできること	FFBD	D
	植樹位置画面表示サブシステム	3.2	植樹計画図を画面に表示できること	FFBD	D
		3.2.1	植樹計画図通りマーキングできること	S2	A,D
4	その他の要求	4.1	現場作業員が簡易に利用できること	S4	D
		4.2	デバイスは作業時に負担のない重量である	S5	D
		4.3	システムのデバイスは耐候性を兼ね備えていること	S6	N/A
		4.4	システムのデバイスは 9 時間以上バッテリー稼働すること	S7	N/A
		4.5	システムは従来手法よりコストを短縮すること	S8	D,A
		4.6	システムは従来手法より時間を短縮すること	S8	D,A

表 3-7 検証項目の定義

検証項目	内容
I (検査)	文字、形、配置など物理的特徴を目視などで点検する
A (分析)	論理的手法などによって評価する
D (デモンストレーション試験)	実環境またはシミュレーションにて意図した動作であることを確認する
T (試験)	機能性、要求の妥当性などを直接確認する

下記に、各要求が満たされていることを測る指標と確認の方法について示す。

A) 要求 1.1 の評価

1.1 の要求は「地形データのインポートができること」である。これを測る指標は「インポートの可否」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

B) 要求 1.2 の評価

1.2 の要求は「地形データを画面上に表示できること」である。これを測る指標は「画面表示の可否」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

C) 要求 1.3 の評価

1.3 の要求は「植樹計画を地形データ上に作成できること」である。これを測る指標は「地形データ上に植樹計画が作成できるかの可否」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

D) 要求 1.4 の評価

1.4 の要求は「植樹計画図を保存できること」である。これを測る指標は「データとして完成した植樹計画図」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

E) 要求 2.1 の評価

2.1 の要求は「RTK-GNSS 測位ができること」である。これを測る指標は「測位により現在位置の座標が算出できるか」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

F) 要求 2.1.1 の評価

2.1.1 の要求は「GNSS 測位信号を受信できること」である。これを測る指標は「受信ログ」である。この確認方法は「試験(T)」である。

G) 要求 2.1.2 の評価

2.1.2 の要求は「RTK-GNSS 補正データ送信できること」である。これを測る指標は「補正データの送信ログ」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

H) 要求 2.1.3 の評価

2.1.3 の要求は「RTK-GNSS 補正データ受信することができること」である。これを測る指標は「補正データの受信ログ」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

I) 要求 2.2 の評価

2.2 の要求は「現在位置を 1 フィートの精度で取得できること」である。これを測る指標は「衛星測位試験」である。この確認方法は「試験(T)」と「検査(I)」である。

J) 要求 2.3 の評価

2.3 の要求は「現在位置を画面に表示できること」である。これを測る指標は「画面表示の確認」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

K) 要求 3.1 の評価

3.1 の要求は「植樹計画図を読み込みできること」である。これを測る指標は「食酢計画図の読み込み可否」である。この確認方法は「デモンストレーション試験

(D)」である。

L) 要求 3.2 の評価

3.2 の要求は「植樹計画図を画面に表示できること」である。これを測る指標は「植樹計画図の画面表示の可否」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

M) 要求 3.2.1 の評価

3.2.1 の要求は「植樹計画図通りマーキングできること」である。これを測る指標は「植樹結果の確認」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

N) 要求 4.1 の評価

4.1 の要求は「現場作業員が簡易に利用できること」である。これを測る指標は「オブザベーション」と「インタビュー」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

O) 要求 4.2 の評価

4.2 の要求は「デバイスは作業時に負担のない重量である」である。これを測る指標は「オブザベーション」と「インタビュー」である。この確認方法は「デモンストレーション試験(D)」である。

P) 要求 4.3 の評価

4.3 の要求は「システムのデバイスは耐候性を兼ね備えていること」である。これを測る指標は「耐久性確認」である。この確認方法は「試験(T)」である。

Q) 要求 4.4 の評価

4.4 の要求は「システムのデバイスは9時間以上バッテリー稼働すること」である。これを測る指標は「バッテリー動作確認」である。この確認方法は「試験(T)」である。

R) 要求 4.5 の評価

4.5 の要求は「システムは従来手法よりコストを短縮すること」である。これを測

る指標は「必要な人員の確認」である。この確認方法は「デモンストレーション実験(D)」と「分析(A)」である。

S) 要求 4.6 の評価

4.6 の要求は「システムは従来手法より時間を短縮すること」である。これを測る指標は「時間の測定」である。この確認方法は「デモンストレーション実験(D)」と「分析(A)」である。

3.3.4. 機能構成図

本システムの機能構成図を図 3-7 に示す。本システムの機能は「植樹計画作成機能」「現在位置取得機能」「植樹位置表示機能」の3つに大別される。

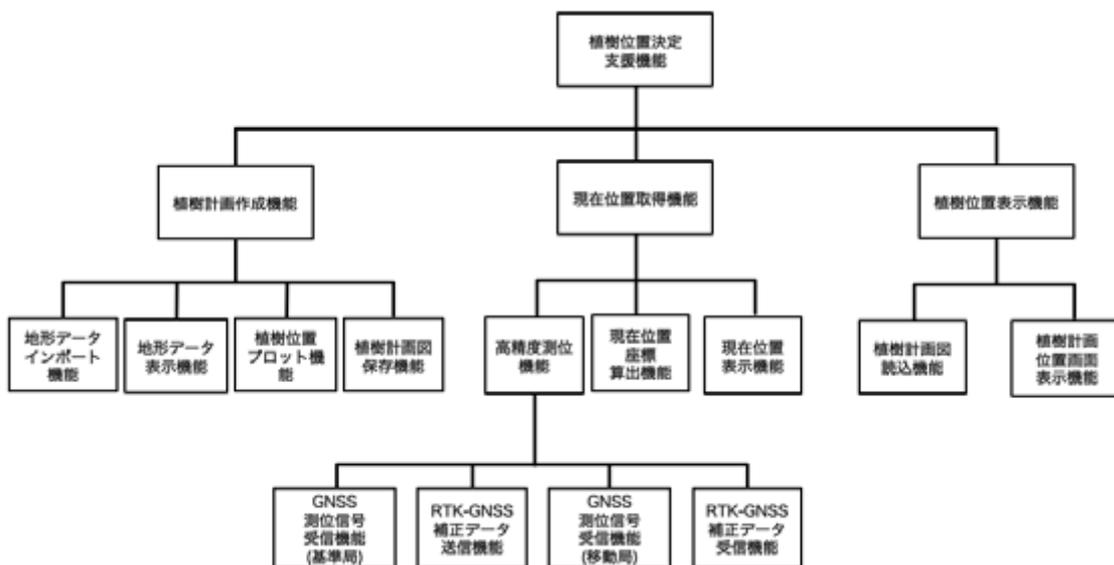


図 3-7 システムの機能構成図

3.3.5. 物理設計

3.3.4 項の機能設計で明らかになった機能を、システムを構成する要素に割り付けた。図 3-8 にシステムの物理構成図を示す。本システムは「植樹計画作成システム」「現在位置取得システム」「植樹位置表示システム」に大別される。「植樹計画作成システム」は「地形データインポートサブシステム」「地形データ表示サブシステム」「植樹計画プロットサブシステム」「植樹計画図保存サブシステム」で構成される。「現在位置取得システム」は「高精度測位サブシステム」「現在位置算出サブシステム」「現在位置表示サブシステム」から構成される。「植樹位置表示システム」は「植樹計画図読み込みサブシステム」「植樹位置画面表示サブシステム」から構成される。

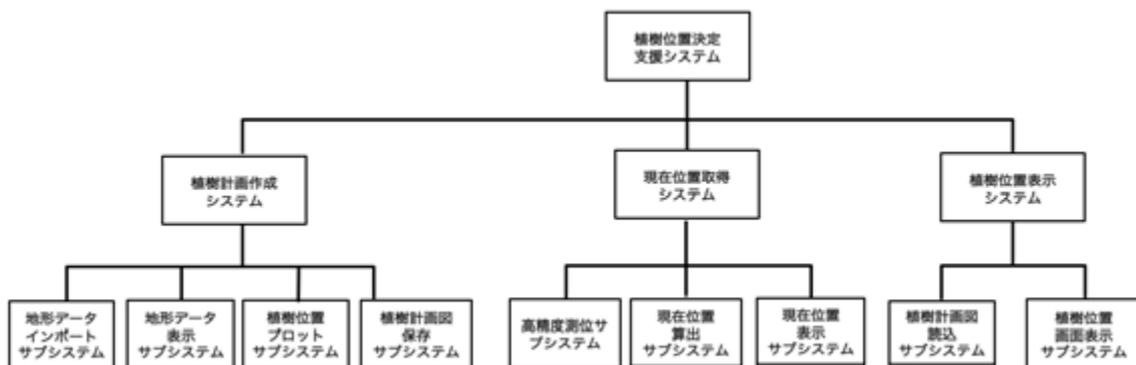


図 3-8 システムの物理構成図

3.3.6. システム構成

図 3-9 に本研究で構築するシステム(以下、本システム)の構成図を示す。本システムは現場監督者が植樹計画を作成する「植樹計画作成フェーズ」と現場作業員がプランテーションにおいて植樹する位置をマーキングする「植樹位置決めフェーズ」に分けられる。本システムは「Windows 計算機」、「観測衛星・UAV」「地理情報システムソフトウェア」、「全地球測位システム(GNSS)」、「マルチ GNSS 受信機」、「GNSS ソフトウェア」、「地図ソフトウェア」から構成される。

本システムでは UAV や観測衛星にて撮影した地形データを元に植樹計画を作成することで、地形に応じて最も適切な配置の植樹計画を作成することが可能となる。また、植樹位置をマーキングする際には、予め植樹計画図を地図ソフトウェアに保存しておく。人工衛星を用いた高精度測位による正確な現在位置と植樹位置を視覚的に明らかにすることで、ユーザである現場作業員は目印の棒を挿してマーキングすべき位置の特定を

簡単に特定することができる。人工衛星を利用した測位方法には利用する衛星整数により、単独 GPS 測位に加え、GPS 以外の衛星を合わせて利用するマルチ GNSS 測位などが挙げられる。また、測位の精度を向上させるために、測位する地点の受信機に加えて基準点と呼ばれる他の受信機の受信データを補正信号として利用する RTK-GNSS 測位などがある。本システムではシステム要求「Sy3: システムは 1 フィートの精度で現在位置を特定する」を満たすため、センチメートル級の測位を実現する RTK-GNSS 測位を利用した。この RTK-GNSS 測位では基準局となる受信機から測位したい点の受信機(移動局)に補正データを送信するためのネットワークが必要となる。また、日本国内では基準局は政府機関等によって設置された恒久的な基準局を利用することが可能であり、マレーシアにおいてもマレーシア測量地図局(JUPEM)により各地に電子基準点が整備されている。しかしながら、パームヤシプランテーションにおいては携帯電話ネットワークなどのインフラストラクチャの利用は丘の上などに限られるため、JUPEM による電子基準点を基準局とした RTK-GNSS 測位は利用できない。そこで、丘の上に簡易な基地局を設置し、基地局から UHF による無線通信を利用することで RTK-GNSS 測位を実現する。UHF 通信に対応した RTK-GNSS 対応の受信機は精度に応じて 10 万円程度から 200 万円程度まで様々存在する。そこで、本研究では必要な精度とコストを比較検討し、低価格な GPS の L1 信号にのみ対応したマルチ GNSS 受信機と汎用的な機器を用いてシステムの構成を行った。

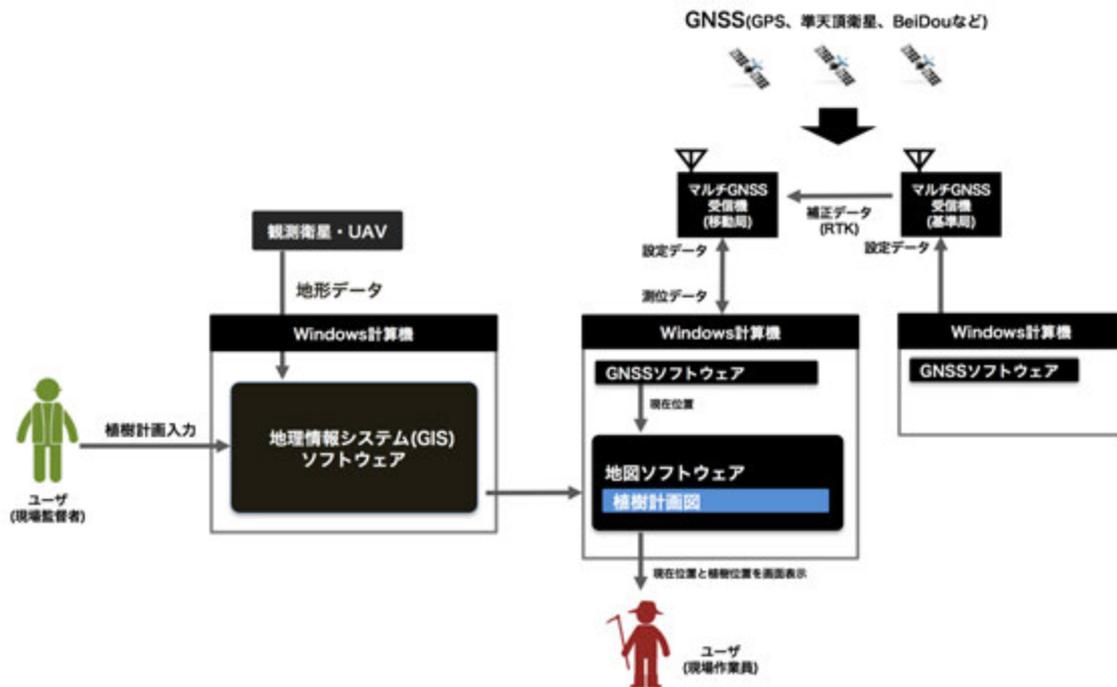


図 3-9 システム構成図

システムの構成のフローを説明する。「植樹計画作成フェーズ」では現場監督者が UAV や静止衛星によって撮影されたプランテーションの地形データを地理情報システムソフトウェアにインポートする。この地形データを元に、その土地において最も適切なパームヤシの配置を検討し、パームヤシの植樹位置をプロットすることで植樹計画図を作成する。「植樹位置決めフェーズ」ではユーザである現場作業員が利用する Windows 計算機の地図ソフトウェア上に予め作成しておいた植樹計画図を読み込む。また、RTK-GNSS 高精度測位のための基準局をマルチ GNSS 受信機を利用して設置する。この基準局のマルチ GNSS 受信機から現場作業員が利用する移動局のマルチ GNSS 受信機に補正データを送信する。移動局側のマルチ GNSS 受信機はこの補正データと測位データを Windows 計算機上の GNSS ソフトウェアにて解析し、現在位置の緯度経度情報を算出する。この現在位置の緯度経度情報と植樹計画図を地図ソフトウェア上に表示することで、現場作業員は視覚的に現在位置とマーキングすべき位置を認識することが可能となる。

3.3.7. システム構成への機能の配分

システムに要求されている機能を、システムを構成する要素に配分して構成要素の仕様を明確にする事、構成要素間のインターフェイスを明確化するため、図 3-10 にアーキテクチャ図を示す。

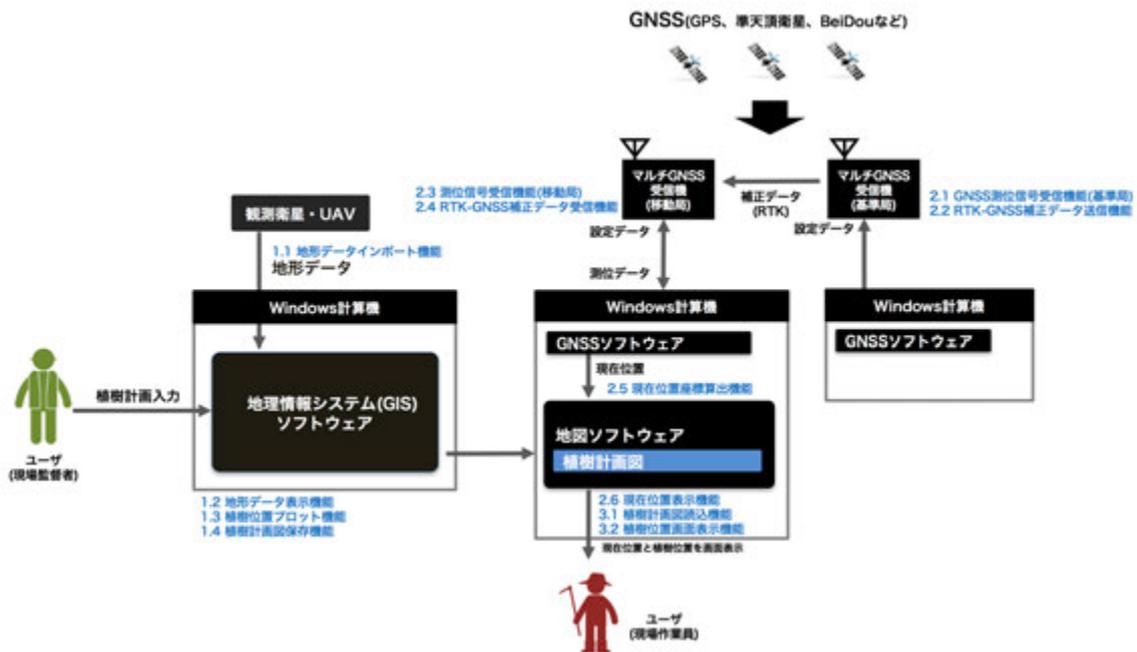


図 3-10 アーキテクチャ設計図

地形データを撮影する観測衛星や UAV には機能 1.1 「地形データインポート機能」が配分されている。地理情報システムソフトウェアには機能 1.2 「地形データ表示機能」、機能 1.3 「植樹位置プロット機能」、機能 1.4 「植樹計画図保存機能」が配分されている。基準局と移動局のマルチ GNSS 受信機にはそれぞれ機能 2.1 「GNSS 測位信号受信機能(基準局)」、機能 2.2 「RTK-GNSS 補正信号送信機能」、機能 2.3 「GNSS 測位信号受信機能(移動局)」、機能 2.4 「RTK-GNSS 補正信号受信機能」が配分されている。移動局の Windows 計算機上の GNSS ソフトウェアには機能 2.5 「現在位置座標算出機能」が地図ソフトウェアには機能 2.6 「現在位置表示機能」、機能 3.1 「植樹計画図読込機能」、機能 3.2 「植樹位置画面表示機能」が配分されている。

4.実装

4章で設計したシステムを実装するにあたり、衛星測位システムの精度の検証と使用するマルチ GNSS 受信機のテクニカルフェージビリティの確認のため予備実験を行った。その上でシステムの評価を行うためのプロトタイプを設計し、実装した。

4.1.実験フィールド

実験は Felda Global Ventures Plantations (M)社が管轄するパームヤシプランテーションである FELDA Krau2 Estate を対象エリアとして行った。図 4-1 が示すとおりこの Krau2 Estate はマレーシアの首都であるクアラルンプール直轄市から自動車で2時間半ほどの場所に位置する。この Krau2 Estate は 26 個のブロックから構成されており、総面積はおよそ 3000 ヘクタールである。この対象エリアの大半が多数の丘から構成される傾斜地である。

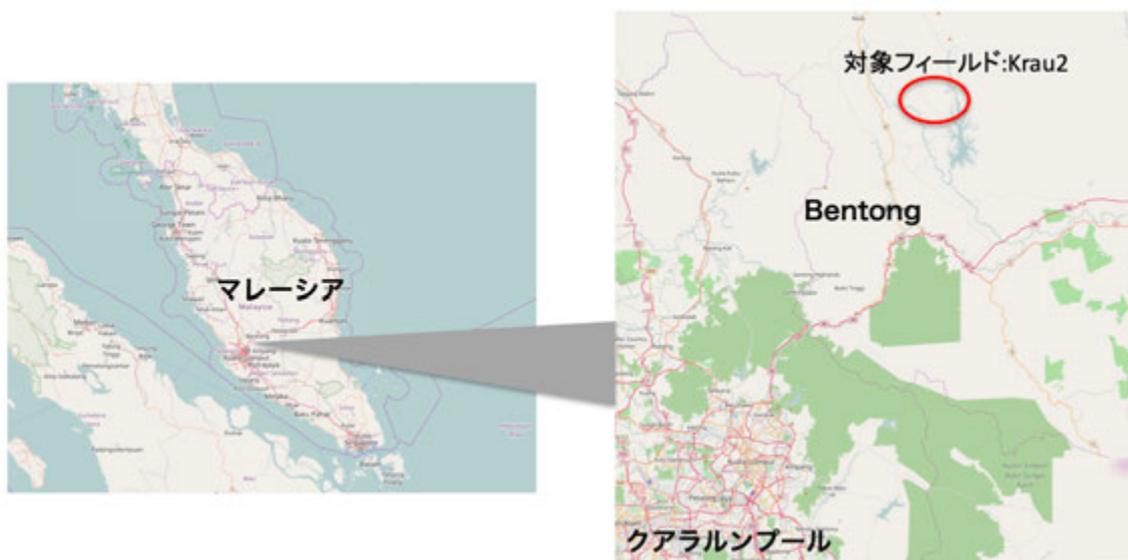


図 4-1 実験フィールドの場所 [25]

4.2.予備実験

4.2.1.衛星測位実験

4.2.1.1. 検証の概要と目的

システムの物理設計における「高精度測位サブシステム」についてマルチ GNSS 測位、RTK-GNSS 測位をそれぞれの測位精度を比較・検討しシステムに於ける有効性を検証するために衛星測位実験を行った。2.5.3 で述べたように、GNSS 受信機には性能に応じて様々な価格帯のものが存在する。そこで低価格な GPS の L1 信号のみの対応のマル

チ GNSS 受信機と L2C 信号に対応した高性能なマルチ GNSS 受信機を比較した。実験は 2016 年 7 月 21 日にマレーシア Bentong 近郊の Felda Global Ventures 社所有のプランテーションである Krau2 Estate で実施した。実際にプランテーションでの業務で使用することを想定し、10:00 から 14:00 の時間帯に実施した。また、実際のプランテーションに業務では伐採後のみならず伐採前にも使用することが考えられるため、伐採後の傾斜地の他に伐採前の傾斜地と平坦地の 3 つのコンディションで実験を行った。測位精度の比較は三脚上にアンテナを設置し、30 分間測定した。さらに、プランテーション業務に最適なハードウェアインターフェイスを検討する上でアンテナ位置は重要な要素であることから、アンテナ位置を頭上、肩の上、手持ちの 3 箇所で歩行し比較した。表 4-1 に実験概要をまとめる。

表 4-1 衛星測位実験の概要

日時	2016 年 7 月 21 日 10:00~14:00
場所	FGV Krau2 Estate (マレーシア Bentong 近郊)
使用衛星	GPS, 準天頂衛星, BeiDou

実験に使用した機器を表 4-2 にまとめる。u-blox 社製マルチ GNSS 受信機を 3 台使用し、それぞれを u-blox 社製 GNSS 受信ソフトウェア u-center のインストールされた Windows 計算機に接続してデータを取得した。1 台は基準局用にオープンスカイ環境に設置し、残り 2 台をそれぞれ静止実験用、歩行実験用に使用した。また、Topcon 社製マルチ GNSS 受信機 GR-5 を 1 台基準局用にオープンスカイ環境に設置し、もう 1 台で静止実験を同様に行った。それぞれデータを取得した後、オープンソースの GNSS データ解析ソフトウェアである RTKLIB を用いて、マルチ GNSS 測位、RTK-GNSS 測位に後処理解析を行った。

表 4-2 衛星測位実験の使用機器

システム	使用機器
GNSS 受信機 1(L1 のみ)	u-blox EVK-M8T-0
GNSS アンテナ 1	u-blox 付属のもの
GNSS 受信機 2(L2C 対応)	Topcon GR-5
GNSS アンテナ 2	GR-5 付属のもの
計算機	Lets Note RZ4

データ取得ソフトウェア	u-center/Magnet
解析ソフトウェア	RTKLIB 2.4.2



図 4-2 衛星測位検証のためのシステム構成(1 台あたり)

4.2.1.2. 検証結果

実験よりプロトタイプシステムの実験フィールドにおいて、RTK-GNSS 測位を利用することで要求を満たす高い精度で測位を行えることを確認した。実験結果を表 4-3 に示す。オープンスカイ環境では L1 信号のみの受信機でも RTK-GNSS 測位を利用することでセンチメートル級での測位が可能であった。木の下の遮蔽環境では L2C 信号対応受信機を利用することで L1 信号受信機の 2 倍程度の精度での測位が可能であったが、RTK-GNSS 測位を利用することで平坦地では要求を満たす高い精度を実現できることがわかった。

また、図 4-3 に示す天空の衛星配置図より、現地において利用可能な衛星を確認した。マレーシアの上空においては BeiDou の静止衛星が 3 つ存在し、測位精度の向上に高い影響を与えていることがわかった。

図 4-4 は u-blox の GNSS アンテナをそれぞれ頭上、肩の上、手の平に設置して歩行した場合の結果である。これより GNSS アンテナの位置は頭上においた場合と手で持った場合では測位に差がでることがわかった。これは人体が衛星からの電波を遮蔽してしまうためであり、アンテナは頭より上に設置するべきであることがわかった。

表 4-3 衛星測位実験の結果(m)

	L1(u-blox EVK-M8T)		L1+L2(Topcon GR-5)	
	マルチ GNSS	RTK-GNSS	マルチ GNSS	RTK-GNSS
オープンスカイ	0.2382	0.0021	0.3652	0.0020
遮蔽環境(平坦地)	1.5338	0.0122	0.7426	0.0110
遮蔽環境(傾斜地)	1.7558	0.4521	0.9048	0.0269

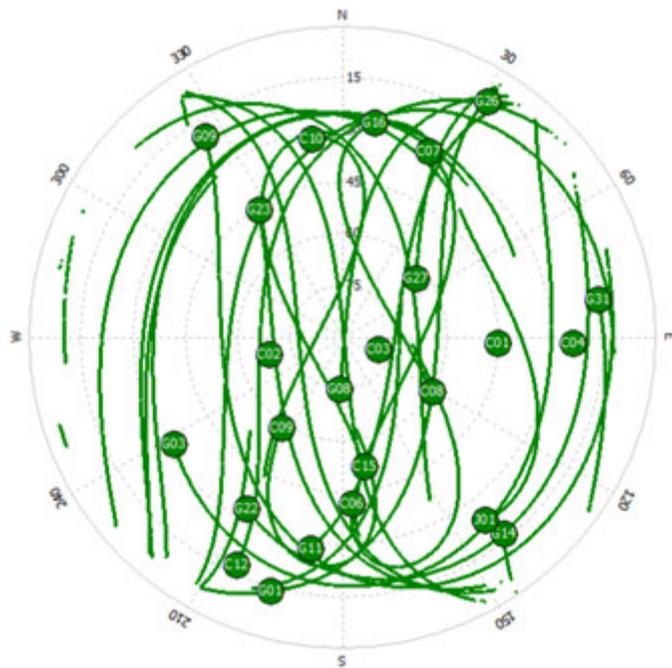


図 4-3 実験フィールドに於ける上空の衛星配置

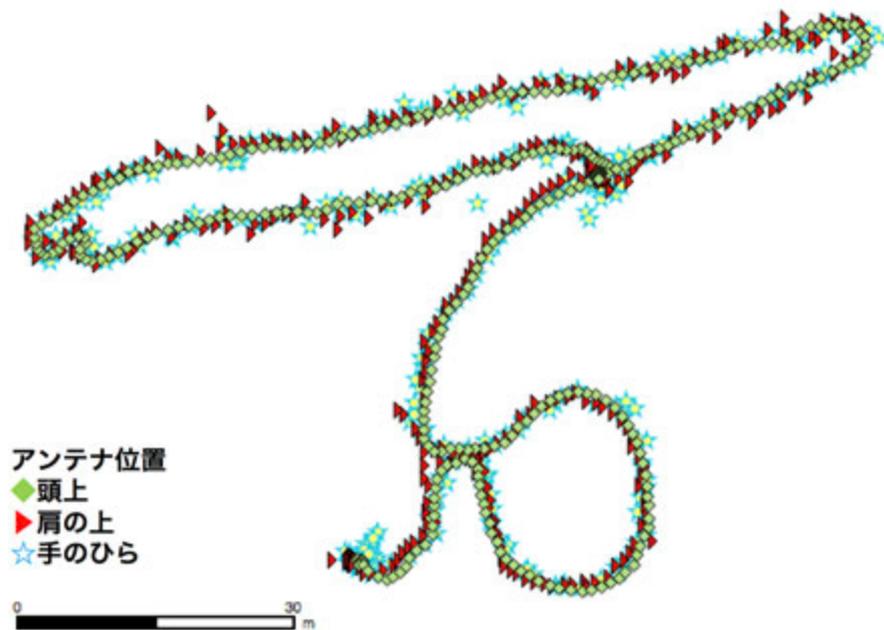


図 4-4 アンテナ位置によるばらつきの差

4.2.2. UHF 通信を用いた RTK-GNSS 測位の検証

4.2.2.1. 検証の概要と目的

RTK-GNSS 測位による高精度測位は基準局となるオープンスカイエリアに設置されたマルチ GNSS 受信機から補正データを移動局に送信し、基準局側で解析を行うことで測位精度の向上を実現したものであるため、基準局から移動局に向けた通信環境が必要である。一般的に RTK-GNSS に於ける通信環境は 3G W-CDMA や 4G LTE などモバイルネットワーク通信が利用されるが、パームヤシのプランテーションに於けるモバイルネットワークのカバレッジは丘の上など一部の地点に限られる。そこで、表 4-4 に示すように UHF 通信機を搭載したマルチ GNSS 受信機を利用した RTK-GNSS 測位の検証を行った。システム要求「Sy8: システムは現行プロセスより少ないコスト、期間での再植樹を実現する」を満たすため、一般的な高性能な UHF 搭載のマルチ GNSS 受信機よりも低価格で入手できる u-blox 社製の C94-M8P-0 を利用した [26]。

表 4-4 UHF を利用した RTK-GNSS 測位の検証の概要

日時	2016 年 7 月 21 日 10:00~14:00
場所	FGV Krau2 Estate (マレーシア Bentong 近郊)
使用衛星	GPS, BeiDou

4.2.2.2. 使用機器とシステム構成

検証のための実験に利用した機器を表 4-5 に示す。GNSS 受信機は基準局、移動局共に u-blox 社製 C94-M8P-0 を利用した。この GNSS 受信機は GPS、BeiDou、GLONASS の衛星測位信号の受信機能に加え、RTK-GNSS 測位用の UHF 送受信機を兼ね備えたものである。この受信機 1 台をオープンスカイで見晴らしの良い丘の上に設置し、u-center にて基準局として設定した。

表 4-5 UHF を利用した RTK-GNSS 測位の検証の使用機器

システム	使用機器
GNSS 受信機	u-blox C94-M8P-0
GNSS アンテナ	u-blox 付属のもの
計算機	TOUGHPAD FZ-M1 Lets Note RZ4
データ取得ソフトウェア	u-center

4.2.3. 検証結果

基準局を丘の上に設置した場合、基準局からおよそ 1.5 キロメートル離れた地点でも UHF 電波を受信し、RTK-GNSS 測位が可能ながわかった。図 4-5 に移動局を車両に載せプランテーション内を移動した場合の結果を示す。青色線が UHF の電波が到達し RTK-GNSS 測位が成立していた(FIX)地点である。基準局を設置した丘が見通せる地点では UHF 電波を受信し RTK-GNSS 測位が成立することを確認した。しかしながら、基準局と移動局の間に丘など巨大な遮蔽物がある場合には電波が遮蔽されてしまうことが明らかとなった。

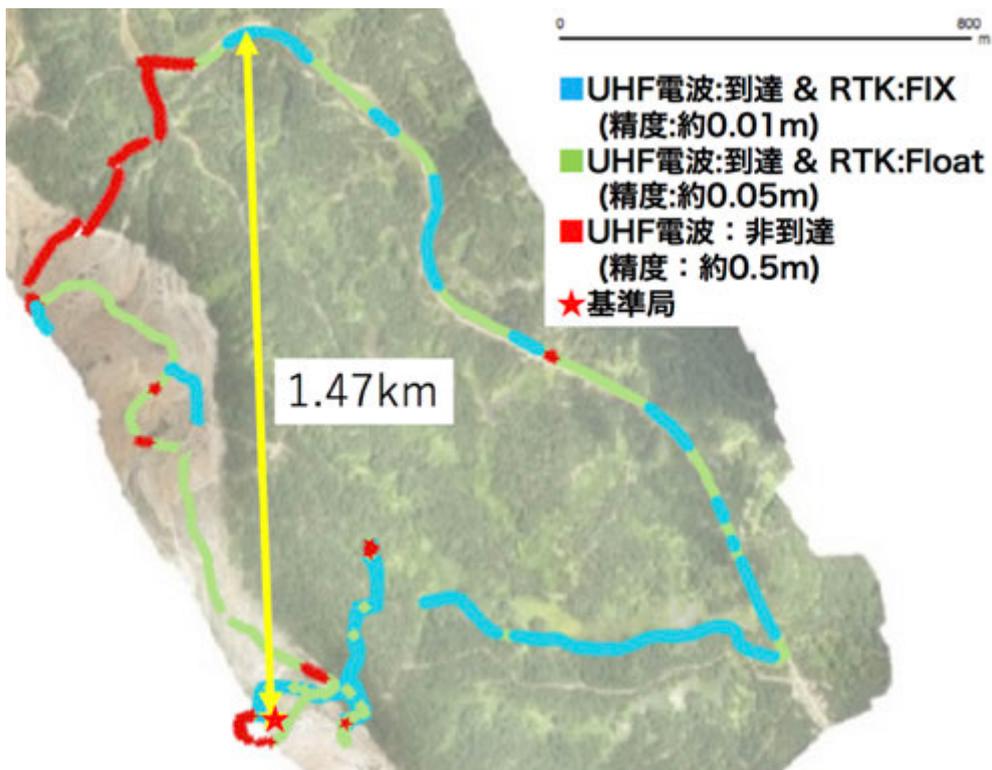


図 4-5 UHF 通信による電波到達距離

また、基準局を設置した丘のテラスを上から下に周回しながら下っていくことで、テラス全体がカバーされていることを図 4-6 の通り確認した。

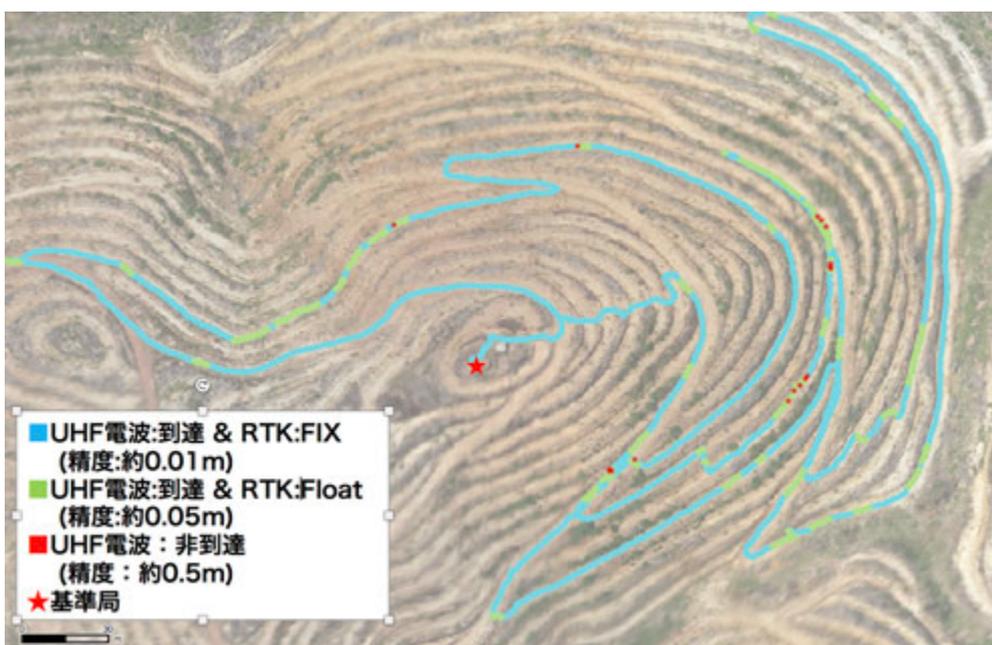


図 4-6 基準局を丘の頂上に設置した場合の UHF 電波の到達確認

4.3. プロトタイプ実装

4.3.1. プロトタイプの構成

本システムについてシステム要求「Sy1: システムは地形データ上に植樹計画の作成を可能にする」「Sy2: システムは植樹計画図を元に植樹を可能にする」「Sy3: システムは 1 フィートの精度で現在位置を特定する」「Sy4: システムは現場作業員が簡易に利用できるものである」「Sy5: デバイスは作業時に負担のない重量である」「Sy8: システムは現行プロセスより少ないコスト、期間での再植樹を実現する」を検証するために、プロトタイプによる実証実験を行った。「Sy6: システムは耐候性を兼ね備えている」と「Sy7: システムは 9 時間以上のバッテリー稼動をする」はプロトタイプによる検証の対象外とした。

実証実験を行うにあたり、図 4-7 に示す構成のシステムをプロトタイプとして作成した。作成したプロトタイプの全体構成を図 4-8 に、完成写真を図 4-9、図 4-10 に示す。マルチ GNSS 受信機を耐水性を兼ね備えたプラスチック容器に収納した。また、アルミ製のポールの上部に GNSS アンテナを設置した。実験では予め UAV にて撮影した地形データ上に伐採方向、植樹位置をマーキングするためのポイントをプロットした計画図を地理情報システムソフトウェア「Global Mapper」を用いて作成した。このデータをユーザである現場作業員が利用する移動局用端末に収納した。また、RTK-GNSS 測位のための基準局を設置し、現場作業員が利用する移動局に UHF 通信にて補正データを送信した。ユーザである現場作業員が利用する移動局用の端末は耐候性に優れたパナソニック社製の Windows タブレットである TOUGH PAD を利用した。TOUGH PAD に u-blox 社製の GNSS ソフトウェア「u-center」をインストールし u-center に付属する地図ソフトウェアで植樹計画図と現在位置を表示した [27]。

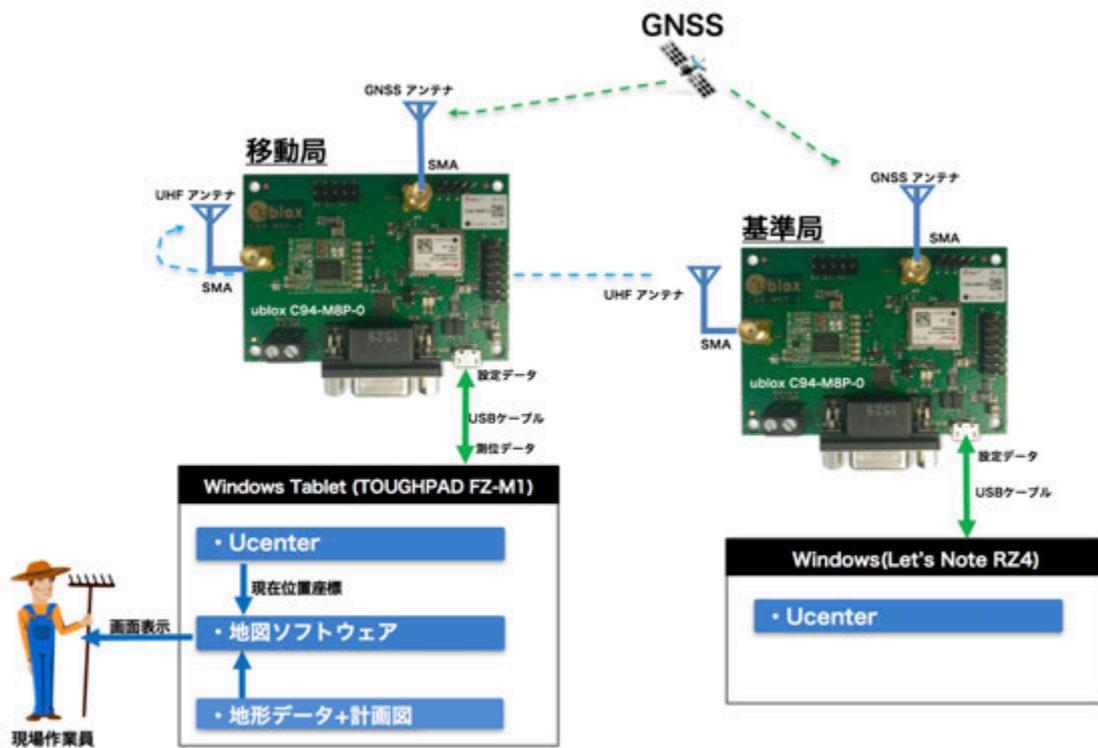


図 4-7 プロトタイプのシステム構成図

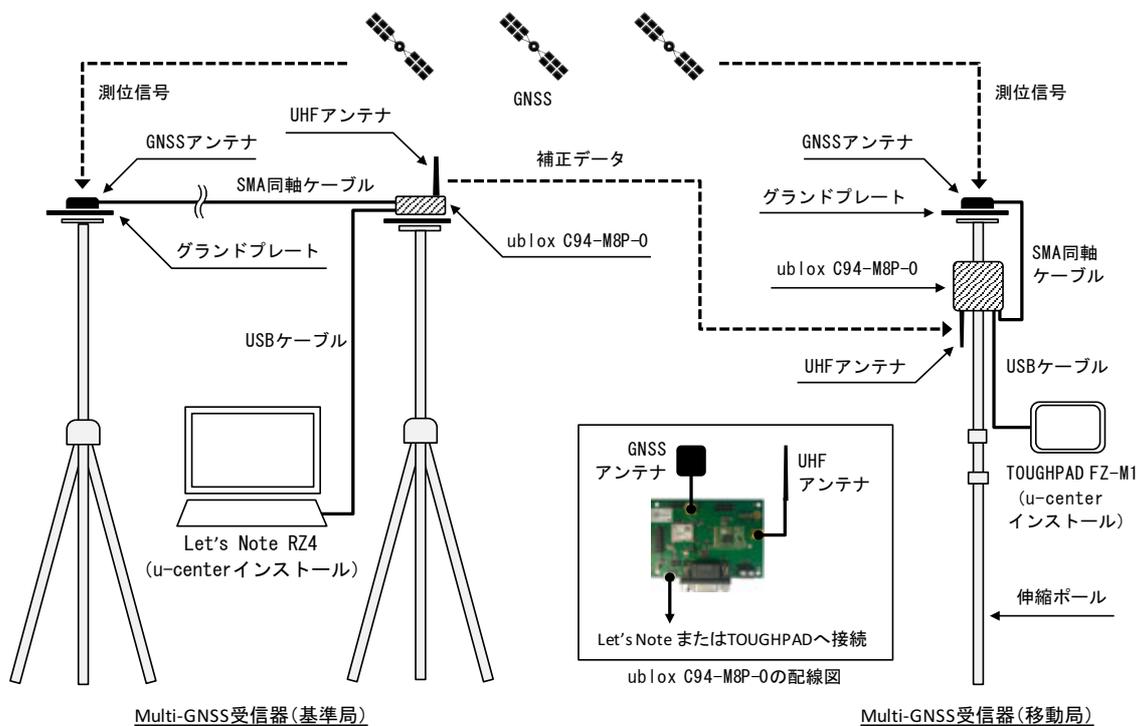


図 4-8 プロトタイプの全体構成



図 4-9 作成したプロトタイプ



図 4-10 プロトタイプの受信機部

4.3.2. プロトタイプによる実証実験

4.3.2.1. 実証実験の概要

実験は 2017 年 1 月 12 日にマレーシア パハン州 Bentong 近郊の Felda Global Ventures Plantations(M)社所有のパームヤシプランテーションである FELDA Krau2 Estate で実施した。パームヤシプランテーションの再植樹プロセスのうち平坦地の伐採方向決めと傾斜地の植樹位置決めの二つのプロセスをプロトタイプを用いて実施した。

システム設計では地形データを用いた植樹計画図の作成を従来手法同様に現場監督者が行うものとしているが、プロトタイプを用いた実験では研究開発担当者より作成されたデータを利用する。地形データは予め UAV を用いて 30 センチメートルの精度で撮影を行い、地理情報システムソフトウェア「Global Mapper」を用いて処理し、デジタル標高モデル(DSM)化を行った。この地形データ上に平坦地での伐採方向決めと植傾斜地での植樹位置決めのためのポイントをプロットし、計画図を作成した。

それぞれある一点を既知の点として予め棒を用いてマーキングを行い、その点より従来手法とプロトタイプそれぞれを用いて実施した。それぞれの手法においてすべての予定されたポイントのマーキングに要した時間を測定した。また、実験後に各ポイント間の距離と、隣接する壁からの距離をレーザー距離計を用いて測定し、計画図との誤差を評価した。また、それぞれのポイントを再度 RTK-GNSS 測位を用いて 30 秒間測定し、座標の平均値を取得した。なお、現場作業員はプロトタイプのシステムを利用するのは初めてであることから、実験前に 1 時間ほどシステムに慣れるための練習時間を設けた。

① 伐採方向決め(平坦地)

伐採方向決めに必要な正三角形を作成するために、図 4-11 に示すように正三角形の 3 つの頂点を成すメインポイントを 3 つとメインポイント間にサブポイントとして 4 つの点からなる計画図を作成した。本来、伐採方向決めに必要な点はメインポイントの 3 点とメインポイント間のサブポイントのみであるが、伐採方向決めの際に利用した計画図を伐採後の植樹位置のマーキングにも利用することを想定し、植樹用のサブポイントも計画図には含めた。実験にあたっては従来手法の伐採方向決めと比較するため、メインポイントの 3 点とメインポイント間のサブポイント 12 点のみで行った。南端のメインポイントを既知の点として予めマーキングし、この点より実験開始した。

② 植樹位置決め(傾斜地)

従来手法では丘の頂上の中心点からコンパスを用いて真北にワイヤーを張り、最初の植樹位置を決定する。そこで、実験では丘の頂上の中心点を既知の点として予め設置して比較を行った。中心点から北方向の線上の点を一つ目の植樹位置とし、天空方向から見て時計回りに 8.7メートルの間隔で植樹位置を設計した。

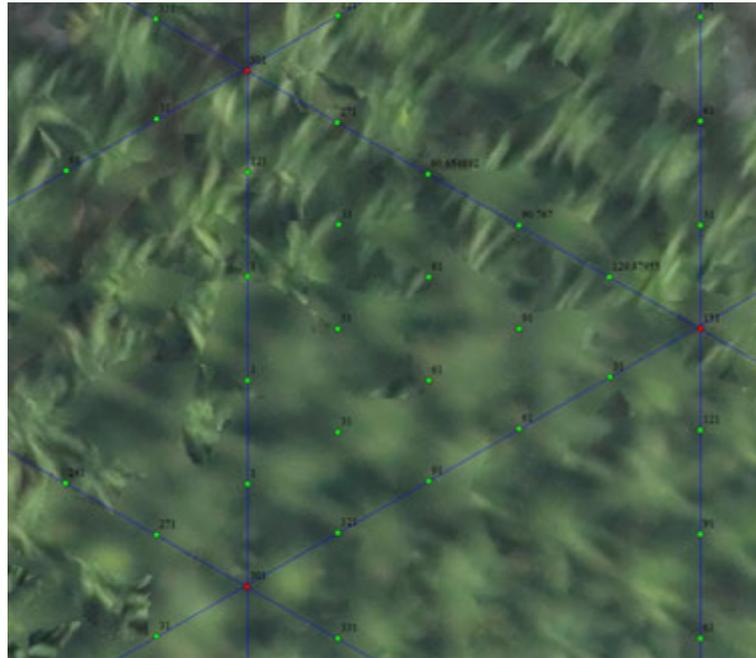


図 4-11 伐採方向決めのための計画図



図 4-12 植樹位置決定のための計画図



図 4-13 実験のために設置された基準局



図 4-14 プロトタイプを利用した植樹位置決めの様子



図 4-15 プロトタイプを利用した伐採方向決めの様子

4.3.2.2. 実証実験の結果

4.3.2.2.1. 精度

① 伐採方向決め(平坦地)

従来手法を利用した場合、プロトタイプを利用した場合のそれぞれの植樹ポイントを RTK-GNSS を用いて座標を取得し、ソフトウェア上で測定した設計位置からの誤差とポイント間の距離と壁からの距離をそれぞれレーザー測定器で測定を行った。結果を表 4-6 に示す。設計位置からの誤差は従来手法が 0.79 メートルだったのに対し、プロトタイプを用いた場合は 0.63 メートルとなった。ポイント間の距離は設計値が 9.144 メートルに対し従来手法は平均 9.02 メートル、新手法は 9.00 メートルとなり、従来手法に比べ新手法は誤差が増えた。次に RTK-GNSS 測位を利用して取得したマーキング位置をプロットし図 4-16 に示す。図の上部のメインポイントにおいて従来手法を利用した場合はコンパスによる誤差や実験場所の傾斜により三角形の頂点が正しく形成できていない。

表 4-6 伐採方向決めの結果

	従来手法	プロトタイプ
設計位置からの誤差(m)	0.79	0.63
ポイント間隔の測定値(m)	9.02	9.00
ポイント間隔の誤差(m)	0.13	0.21
ポイント間隔の誤差率(%)	1.37	2.27

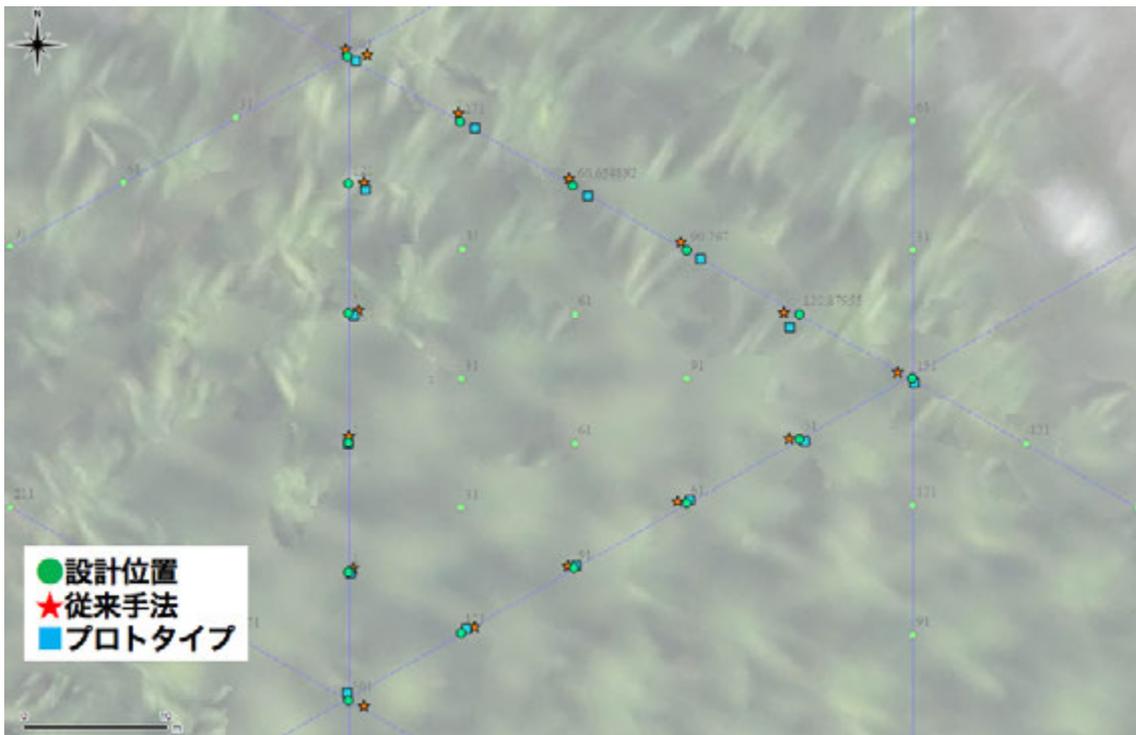


図 4-16 伐採方向決めの結果

② 植樹位置決め(傾斜地)

従来手法を利用した場合、プロトタイプを利用した場合のそれぞれの植樹ポイントを RTK-GNSS を用いて座標を取得し、ソフトウェア上で測定した設計位置からの誤差とポイント間の距離と壁からの距離をそれぞれレーザー測定器で測定を行った。結果を表 4-7 に示す。設計位置からの誤差は従来手法が 1.69 メートルだったのに対し、プロトタイプを用いた場合は 0.15 メートルとなった。ポイント間隔の誤差は従来手法が平均 0.06 メートル、プロトタイプを利用した場合が 0.13 メートルであった。また、テラスの壁からの距離の設計値 1 メートルからの誤差は従来手法が 0.21 メートル、プロトタイプを利用した場合が 0.43 メートルであった

表 4-7 植樹位置決めの結果

	従来手法	プロトタイプ
設計位置からの誤差(m)	1.69	0.15
ポイント間隔の測定値(m)	8.68	8.61
ポイント間隔の誤差(m)	0.06	0.13
ポイント間隔の誤差率(%)	0.71	1.51
壁からの距離の測定値(m)	0.87	1.12
壁からの距離の誤差(m)	0.21	0.43
壁からの距離の誤差率(%)	20.64	43.45



図 4-17 植樹位置決めの結果

4.3.2.2.2.時間

平坦地の伐採方向決めでは植樹計画図の左下の点は既知の点として予め棒を用いてマーキングをしておき、従来手法とプロトタイプそれぞれでこの点からすべてのポイントのマーキングに要する時間を計測した。傾斜地の植樹位置決めでは丘の頂上の中心点を既知の点として予めマーキングをしておき、この点から従来手法とプロトタイプそれぞれでこの点からすべてのポイントのマーキングに要する時間を計測した。

結果を表 4-8 に示す。伐採方向決め、植樹位置決めのどちらも所要時間は従来手法のほうが短く、プロトタイプを利用した場合に時間が増大した。所要時間からマーキングしたポイント数を割ることで求められる、1ポイントあたりの所要時間ではプロトタイプを用いることで従来手法よりおよそ 10 秒時間が増大する。

表 4-8 プロトタイプを用いた実証実験の所要時間

	手法	所要時間(秒)	ポイント数	1ポイントあたりの 所要時間(秒)
伐採方向決め	従来手法	711	15	47
	プロトタイプ	819	15	55
植樹位置決め	従来手法	409	11	37
	プロトタイプ	514	11	47

5.評価

5.1.システム要求に対する評価

3.3.3 項の表 3-6 で示した、本システムにおける各要求項目を満たしていることを評価した。各要求項目に対する評価方法と評価結果を以下に述べる。

- A) 要求 1.1 「地形データのインポートができること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において、地形データのインポートを行えることを確認した。
- B) 要求 1.2 「地形データを画面上に表示できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において、A)で取り込んだ地形データを画面上に表示できることを確認した。
- C) 要求 1.3 「植樹計画を地形データ上に作成できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において、地理情報システムソフトウェアを用いて A)で取り込んだ地形データ上に植樹計画を設計できることを確認した。
- D) 要求 1.4 「植樹計画図を保存できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において、C)で作成した植樹計画を植樹計画図として保存できる個をと確認した
- E) 要求 2.1 「RTK-GNSS 測位ができること」の評価
予備実験とプロトタイプを用いた実証実験において UHF を利用することで RTK-GNSS 測位が行えることを確認した。
- F) 要求 2.1.1 「GNSS 測位信号を受信できること」の評価
予備実験とプロトタイプを用いた実証実験において、衛星信号の受信ログより GNSS 測位信号が受信できていることを確認した。
- G) 要求 2.1.2 「RTK-GNSS 補正データ送信できること」の評価
予備実験とプロトタイプを用いた実証実験において RTK-GNSS の補正データが送信されていることを確認した。

- H) 要求 2.1.3 「RTK-GNSS 補正データ受信することができること」
予備実験とプロトタイプを用いた実証実験において RTK-GNSS の補正データが受信されていることを確認した。
- I) 要求 2.2 「現在位置を 1 フィートの精度で取得できること」の評価
予備実験において衛星測位実験を行うことで現在位置を 1 フィート以下の精度で取得できることを確認した。
- J) 要求 2.3 「現在位置を画面に表示できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において現在位置が画面上に表示されることを確認した。
- K) 要求 3.1 「植樹計画図を読み込みできること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において D)で作成した植樹計画図を読み込みできることを確認した。
- L) 要求 3.2 「植樹計画図を画面に表示できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験において K)で読み込みした植樹計画図を画面表示できることを確認した。
- M) 要求 3.2.1 「植樹計画図通りマーキングできること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験の結果より、植樹計画図通りにマーキングできることを確認した。
- N) 要求 4.1 「現場作業員が簡易に利用できること」の評価
プロトタイプを用いた実証実験におけるオブザベーションと表 5-1 で示すインタビューより確認した。
- O) 要求 4.2 「デバイスは作業時に負担のない重量である」の評価
プロトタイプを用いた実証実験におけるオブザベーションと表 5-1 で示すインタビューより確認した。

- P) 要求 4.3 「システムのデバイスは耐候性を兼ね備えていること」の評価
耐候性の確認は長時間の実験を行わないと確認することが困難であるため、本研究における検証の対象外とした。
- Q) 要求 4.4 の評価 「システムのデバイスは9時間以上バッテリー稼働すること」
バッテリー持続時間の確認は長時間の実験を行わないと確認することが困難であるため、本研究における検証の対象外とした。
- R) 要求 4.5 の評価 「システムは従来手法よりコストを短縮すること」
プロトタイプを用いた実証実験におけるオブザベーション結果より、本システムで必要な人員を算出し、従来手法との人件費を元にしたコスト比較を行うことで確認した。
- S) 要求 4.6 の評価
4.6 の要求は 「システムは従来手法より時間を短縮すること」である。これを測る指標は 「時間の測定」である。この確認方法は 「デモンストレーション実験(D)」と 「分析(A)」である。

5.2.ステークホルダ要求に対する評価

本システムが 3 章で明らかになったステークホルダの要求を満たしていることを評価するため、4 章のプロトタイプ実験の被験者である Felda Global Ventures Plantation(M) 社の現場作業員にインタビューを行った。インタビューの結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 現場作業員インタビュー

日 時	2017 年 1 月 12 日
場 所	FELDA Krau2 Estate(マレーシア パハン州 Bentong 近郊)
対象者	Felda Global Ventures Plantations(M) 現場作業員 5 名 -インドネシア出身 -プランテーションでの業務歴は 2 年～3 年
目 的	システムの実用性を評価するため
インタビュー方法	プロトタイプを利用した実験後にフィードバックをもらう
結 果	<p>【良い所】</p> <ul style="list-style-type: none">• 簡単に位置(マーキング箇所)がわかった• 従来手法だと低木や地形など環境によりワイヤーで測定しにくかったのが、改善された• マーキング箇所を素早く見つけることが出来た <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none">• デバイスの質量がもっと軽いほうが良い• 植樹ポイントに近づいた際に音声などで知らせたい <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none">• 普段の作業で一番大変なのは暑さ• 1 日 50 箇所の植樹位置のマーキングを目標としている

続いて現場監督者、植樹管理担当者、研究開発担当者にインタビューを行った。インタビューの結果を表 5-2 に示す。

表 5-2 ステークホルダインタビュー

日 時	2017 年 1 月 12 日
場 所	FELDA Krau2 Office(マレーシア パハン州 Bentong 近郊)
対象者	Felda Global Ventures R&D 研究開発担当者 Felda Agricultural Services 植樹管理担当者 Felda Global Ventures Plantations(M) 現場監督者
目 的	システムの実用性を評価するため
インタビュー方法	実験結果を元に議論を行いフィードバックをもらう
結 果	<p>【良い所】</p> <ul style="list-style-type: none"> 従来手法より時間の短縮や人員の削減が可能になる 植樹した位置を後から確認することも可能なため、植樹後の管理にも利用できる 植樹位置決め以外のプロセスにも RTK-GNSS 測位の活用が期待できる <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 台の基準局で複数箇所作業できると良い 外部委託の契約作業員をどのようにトレーニングするかを検討する必要がある <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> 従来手法のコンパスなどの道具も利用方法を熟知している作業員は一部に限られる 精度は伐採方向決めよりも植樹位置決め(伐採後)のほうが重要

以上のインタビュー結果を踏まえて、ステークホルダ要求に対す評価を表 5-3 にまとめる。

表 5-3 ステークホルダ要求に対する評価

	ステークホルダ要求	評価	根拠
S1	地形データを元に植樹計画図を作成したい	満たされている	プロトタイプによる実証
S2	植樹計画通りの植樹を実現したい	満たされている	プロトタイプによる実証
S3	1フィートの精度で植樹を行いたい	満たされている	プロトタイプによる実証
S4	簡単なトレーニングのみで利用できるが良い	満たされている	インタビューより
S5	デバイスは作業時に負担のない重量であること	満たされている	インタビューより
S6	雨天時でも作業を継続したい	N/A	N/A
S7	9時間以上連続作業をしたい	N/A	N/A
S8	現状よりコスト、時間を短縮したい	一部満たされている	考察より

6. 考察

6.1. 実証実験結果に対する考察

実証実験の結果より、RTK-GNSS による高精度測位を利用したプロトタイプは設計通りに作動し、伐採方向決めや植樹位置決めを利用できることを確認した。そこで本システムを精度(Quality)、コスト(Cost)、時間(Delivery)の観点から考察する。

6.1.1. 精度

表 4-6～表 4-7 で示した通り、各ポイント間の距離はプロトタイプよりも従来手法のほうが設計値に近い数字となり誤差が小さかった。まだ古いパーマヤシの存在する遮蔽環境で実施した伐採方向決めではポイント間の誤差の平均が従来手法 0.13 メートルに対し、プロトタイプは 0.21 メートルであった。2.3.2.1 項で述べた通り、従来手法では伐採方向や植樹位置を決める際に、一つ前のポイントからワイヤーを用いて次のポイントを決定する。このため、ポイント間の距離における誤差が僅かであっても、一度発生した誤差は次のポイントの位置にも引き継がれる。このため、一つのポイントのマーキングで発生する誤差が仮に 0.13 メートルであっても、10 ポイント先では最大 $10 \times 0.13 = 1.3$ メートルの誤差となる。仮に対象エリアが縦横 1 キロメートルからなる 100 ヘクタールであった場合、ポイント間の距離が 9.14 メートルで設計を行うと、100 ヘクタールあたり 12100 本の植樹が行える。しかし、一つのポイントあたり 0.13 メートルの誤差が余分に発生していたとすると、1 辺 1 キロメートルあたり、108 本しか植樹できず、100 ヘクタールあたりでも 11664 本に低下し、最大 436 本分の損失が生じる。一方、本システムを利用した場合は、各ポイント間の距離の誤差は従来手法に比べて僅かに大きくなるものの、次の点に誤差は引き継がれない。このことから、本システムを利用することで一定の面積において最大限の本数の植樹を実現できると考えられる。

6.1.2. コスト

従来手法では伐採方向や植樹位置決めでは 5 人 1 組で作業を行っていた。これはワイヤーで位置を決定する際にコンパスを見る担当、ワイヤーの両端を持つ担当、マーキングするための棒を指す担当、途中のワイヤーのたわみを治す担当などが挙げられる。プロトタイプを利用した場合は受信機を持ち端末上の画面を確認する担当とマーキングするための棒を持つ担当の 2 人のみで作業が成り立つ。このため人員を半分以下に削減することが可能であり、人件費の削減が実現すると考えられる。

6.1.3. 時間

従来手法では傾斜地、平坦地共にある一点から順番に伐採方向や植樹位置のマーキングを実施していくことから複数箇所ですべて同時に植樹位置のマーキングをし難いといった課題があった。しかしながら本システムでは予め設計された植樹計画図を元に植樹位置のマーキングを実施できることから複数箇所ですべて同時に実施することが可能となる。また、実証実験では一つのポイントを決定するのに必要な時間が従来手法に対してプロトタイプの方が10秒ほど長くなったが、ユーザのシステムに対する習熟度が更に高まることでより短縮できると考えられる。

6.2. インタビュー結果に対する考察

プロトタイプ実験後にユーザである現場作業員に行ったインタビューよりシステムの妥当性が確認された。短時間でのトレーニングのみでの実証実験だったものの、利用に関する感想は概ね良いものであった。デバイスに対する評価として「もっと軽い方がいい」「音で知らせてくれると良い」といったものがあった。今回の実験は傾斜地と平坦地それぞれ1時間程度のものであったが、丸一日の作業をする場合は更に軽量なものにするなどの検討が必要となる。一方で従来のワイヤーを用いた手法では障害となっていた低木やテラスの地形の影響を受けずに植樹位置を決定できることが評価された。また、現場管理者や研究開発担当者、植樹管理担当者へのインタビューからは植樹位置や伐採方向決め以外へのRTK-GNSS高精度測位の応用が期待された。パーマヤシそれぞれにID番号が付与されているため、どの番号の木がどこに存在するかの管理が簡易になるなどが考えられる。

6.3. 本システムの課題

6.3.1. 地形データの精度

本システムはUAVや観測衛星によって撮影された地形データを元に植樹計画を作成する。そのため、地形データの精度に誤差が存在するとそのまま植樹位置に反映されてしまう。例えば表4-7に示した、傾斜地での植樹位置とテラスの壁からの距離の誤差は地形データの精度に問題があると考えられる。RTK-GNSSを搭載したUAVの実現など地形データを取得する際にも高精度で取得できる手段の検討が求められる。

6.3.2. 耐候性

プロトタイプを用いた実験は傾斜地、平坦地それぞれ練習時間を含めて1時間ほど行った。プランテーションは高温で日中は40度近い気温になる上に、直射日光が当たることから、実際に直射日光が当たる高温な環境でも長時間動作するデバイスを用意する必要がある。特にRTK-GNSS測位のための基準局はオープンスカイ環境に設置する必要があるため、日陰のない日差し環境となる。また、マレーシアの気候の特性上突然の豪雨なども多く、小雨の場合は作業が継続される。プロトタイプを用いた実証実験ではデバイスに耐候性の優れたパナソニック社製のTOUGHPADを利用したが1台あたりのコストが高額であるなど課題がある [28]。

6.3.3. ユーザのリテラシー

プランテーションで業務を行う現場作業員はスマートフォンを所持している人もいるものの、情報通信技術に対する知識は少ないと考えられる。プロトタイプを利用した実証実験に協力してくれた現場作業員もスマートフォンを所持している人は5人中2人であったが、2人共「GPS」という言葉は知らなかった。実験では基準局の設置を含めて各種設定をした上で端末を渡して行ったが、実際の業務への導入を検討する場合、現場作業員自身が設定を行える仕組みを作る必要がある。また、植樹計画図の作成も地理情報システムソフトウェア上で地形データを用いて行う場合、相当な知識が求められる。現状では現場監督者はこれらの技術は持ち合わせていない。

6.4. 今後の展望

6.4.1. 実用化に向けて

プロトタイプを用いて実証実験を行ったが、本システムの実用化にあたっては上記で述べた課題の改善が必要である。特にシステムを利用する現場作業員のリテラシーの考慮したインターフェイスの設計が重要である。特に従来手法でもマニュアルに沿わない作業が見受けられることから、簡単なトレーニングのみで利用可能な直感的な操作性が求められる。また、プロトタイプではRTK-GNSS測位のための利用衛星としてGPS衛星とBeiDouを利用したが衛星配置は時間帯や時期によって変わるため、衛星測位によって得られる精度も変化することを考慮する必要がある。

6.4.2. リモートセンシングを利用した木単位での管理

植樹計画図を作成する際にパームヤシ一本ずつに固有の ID 番号を付与 [3]し、それぞれの位置データと関連付けて保存しておくことで、植樹後も木単位での管理が実現する。パームヤシプランテーションではガノデルマと呼ばれる病原菌が課題となっている。このガノデルマに感染したパームヤシは収穫量が徐々に低下し枯死する。更にガノデルマは感染力を持つため、放置しておくとも周辺のパームヤシにも感染する。この様にガノデルマに感染したパームヤシを早期に発見し、対処することが求められている。ガノデルマに感染したパームヤシを発見する方法として観測衛星や UAV を利用した画像解析の利用が検討されている [29]。パームヤシに ID と位置情報を付与し、木単位で管理をすることで、ガノデルマを初めとする病原菌問題などへの対応が可能となる。

6.4.3. 植樹の自動化

再植樹の効率化の先行事例で述べた、植樹に特化したトラクターと RTK-GNSS 高精度測位を統合することで、植樹計画図を作成した後に植樹位置に目印の棒を用いたマーキングをすることなく植樹位置の掘削や苗付けが可能となることが考えられる。特に平坦地においては伐採後に植樹に特化したトラクターを利用することで苗の植樹までを一気に実施することが期待される。

7.まとめ

本研究では、マレーシアのパームヤシのプランテーションにおいて重要な再植樹プロセスの際に新たな植樹位置や伐採方向の決定を、RTK-GNSS 高精度測位を利用することで支援するシステムをステークホルダの要求分析に基づき設計した。また、プロトタイプを作成し、システムを検証するための評価実験を行った。

その結果、プロトタイプを用いた実証実験により、RTK-GNSS 高精度測位を利用することで伐採方向決めや植樹位置のマーキングが高精度で実施できることを確認した。さらにシステムにより作業に必要な人員の削減や時間の短縮が実現できることを明らかにした。また、ステークホルダのインタビューより本システムを利用することでプランテーションの業務の効率化を実現できることを確認した。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員である神武直彦准教授には研究方針から論文執筆に至るまで丁寧にご指導頂きました。また、外部発表など様々な機会を与えてくださいました。二年間のご指導に心より感謝いたします。また、副査として様々なご助言を下さりました中野冠教授にも厚く御礼申し上げます。中島円特任准教授にも研究の推進や論文の執筆にあたってアドバイスを頂きました。御礼申し上げます。

現地実験や調査を実施するにあたり、様々な面でご協力をいただきました研究員の小高暁氏には大変感謝しております。神武研究室博士課程の西野瑛彦氏、佐藤章博氏にもご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究はアジア・太平洋地域宇宙機関会議(APRSAF)における Space Applications for Environment プロトタイププロジェクトの一環で実施しました。研究を推進するにあたり、宇宙航空研究開発機構の濱本昂氏、糸田綾香氏、東京大学の竹内渉准教授、Universiti Putra Malaysia の Abdul Rashid Bin Mohamed Shariff 氏には様々な面で大変お世話になりました。一般社団法人リモート・センシング研究センターの小出理史氏、永野嗣人氏と一般社団法人日本宇宙フォーラムの小林功典氏にもご助言をいただきました。心より感謝いたします。また、Topcon Singapore Holdings Pte. Ltd. の加藤丈典氏と東海林篤史氏にはマルチ GNSS 受信機を貸与いただくなどご協力頂きました。また、パナソニック株式会社の酒井原邦彦氏にはプロトタイプの実装にあたりタブレット端末を貸与頂きました。感謝いたします。

本研究のフィールド調査、要求分析、実証実験は Felda Global Ventures グループと共同で実施しました。Felda Global Ventures Research & Development Sdn. Bhd. の Mohd Na'aim Bin Samad 氏と Haryati Abidin 氏、Fairul Nizam Yahya 氏、Osman Mat Rifin 氏、Felda Agricultural Services Sdn. Bhd. の Mohd Najib Abdul Rasid 氏には実験環境の確保や従来手法の伝授を含め、様々な面でご協力頂きました。心より感謝いたします。また、Felda Global Ventures Plantations(M) Krau2 Estate 所長の Muhammed Anuar B. Asmuni 氏、現場管理責任者である Mohd Amir Aizudin B. Abdul Jalil 氏や現場作業員の方々には従来手法の調査や実証実験にあたり多大なるご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたっては GESTISS(Geospatial and Space Technology Consortium for Innovation Social Service)による人材育成プログラム G-SPASE において多くのアドバイスをいただきました。特に東京海洋大学の久保信明准教授と博士過程の土倉弘子氏、東京大学の Dinesh 氏には GNSS 高精度測位に関して技術的な知見をいただきました。ま

た、東京大学の柴崎亮介教授にも評価方法などアドバイスをいただきました。厚く御礼申し上げます。

修士課程の同期である江幡彩氏、佐藤亮氏、竹田和広氏、原田利江子氏、白井徳彦氏を始め、神武研究室の修士課程、博士課程、研究員の皆様とは議論やフィールドワークなどの活動を通して切磋琢磨することができました。厚く御礼申し上げます。また、システムデザイン・マネジメント研究科 2015 年春入学の皆様とは授業でも授業以外でもお互い励ましながら楽しい研究生生活を送ることが出来ました。感謝いたします。

最後に、SDM への進学を認めてくれていつも暖かく支えてくれた両親と祖父母に感謝して謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 蒲原弘継, 後藤尚弘, 藤江幸一, “インドネシアにおけるパーム油生産拡大に伴う環境影響と低減策,” 環境情報学会論文誌, Vol. 23 No.4 pp332-340, 2010.
- [2] “OIL PALM IN MALAYSIA,” [オンライン]. Available:
http://www.palmoilworld.org/about_malaysian-industry.html. [アクセス日: 15 1 2017].
- [3] 根本昌彦, “熱帯林破壊を先導するアブラヤシ農園の拡大,” 鳥取環境大学紀要 = Bulletin of Tottori University of Environmental Studies (13), pp59-78, 2015.
- [4] 三菱商事株式会社農水産本部 油脂ユニット, [オンライン]. Available:
http://www.maff.go.jp/j/study/daizu_yuryo/02/pdf/data3-7.pdf <2017/01/27 閲覧>.
- [5] 林田秀樹, “パーム油生産の急増とその需要側要因について,” 社会科学 94, pp89-107, 2012.
- [6] 中西宣夫, “オイルパームプランテーションの拡大と環境保全活動:スカウでの聞き取り調査を基にした一考察,” ボランティア学研究 8, pp 35-54, 2008.
- [7] 高多理吉, “マレーシア・パーム油産業の発展と現代的課題,” 季刊 国際貿易と投資 Winter 2008/No.74, 2008.
- [8] A. Kushairi, “Malaysian Oil Palm Industry Performance 2016 and Prospects for 2017,” Malaysian Palm Oil Board (MPOB), [オンライン]. Available:
http://www.mpob.gov.my/images/stories/pdf/2017/2017_Dr.KushairiPALMEROS2017.pdf <2017/01/26 閲覧>.
- [9] 松良俊明, “熱帯雨林の消失とアブラヤシ・プランテーション —マレーシアでの経験から—,” 京都教育大学環境教育研究年報 第19号 pp57-69, 2011.
- [10] A. K. Din, “Malaysian Oil Palm Industry Performance 2016 and Prospects for 2017,” Malaysian Palm Oil Board (MPOB)(2017年1月18日閲覧) . [オンライン].
- [11] “Sime Darby Plantation,” [オンライン]. Available:
<http://www.simedarbyplantation.com/our-businesses/upstream/upstream-malaysia> <2017/01/26 閲覧>.
- [12] “IOI Group Annual Report2016,” [オンライン]. Available:
http://www.ioigroup.com/Content/IR/IR_Reports <2017/01/26 閲覧>.

- [13] “MALAYSIA: Stagnating Palm Oil Yields Impede Growth,” [オンライン]. Available: <http://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2012/12/Malaysia/> <2017年1月18日閲覧>.
- [14] FELDA GLOBAL VENTURES HOLDINGS, “Annual Integrated Report 2015,” [オンライン]. Available: http://ir.chartnexus.com/fgv/docs/ar/ar_2015.pdf <2017年1月18日閲覧>.
- [15] I Nur Aini, Aimrun W., M S M Amin, M H Ezrin , H Z Shafri, “Auto Guided Oil Palm Planter by using multi-GNSS,” 7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition, 2014.
- [16] S. M. ROODI, A. YAHYA , S. A. AZIZ, “Field Performance of a Single Chassis Integrated Machine System in Planting Oil Palm Seedlings,” Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science), 7 (2), 185-190, 2011.
- [17] 久保信明, “マルチ GNSS 時代の高精度測位,” システム制御情報学会誌 59(4), pp120-125.
- [18] 浪江宏宗, “RTK-GPS の原理と応用,” www.nda.ac.jp/~nami/research/pdf/CGSIC2001.pdf <2017/01/17 閲覧>.
- [19] 高須知二, “RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術,” Text for GPS/GNSS Symposium 2007, p.267-278, 2007.
- [20] “Real Time Kinematic (RTK),” [オンライン]. Available: <https://www.jupem.gov.my/v1/en/product-services/real-time-kinematic-rtk/> <2017/01/25 閲覧>.
- [21] H. Jamil, A. Mohamed , D. Chang, “The Malaysia Real-Time Kinematic GNSS Network (MyRTKnet) in 2010 and Beyond,” TS 08F – GNSS CORS Networks – Positioning Infrastructure, Analysis and Applications III, 2010.
- [22] “GPSMAP® 62SCJ,” [オンライン]. Available: http://www.garmin.co.jp/products/discontinued/gpsmap_62scj/ <2017/01/25 閲覧>.
- [23] 坂井丈泰, 福島荘之介, 武. 昇, 荒蒔昌江 , 伊藤憲, “GPS 第二民間周波数信号 (L2C) の 受信試験,” 社団法人電子情報通信学会 信学技法, pp75-80 , 2007.
- [24] “GNSS 基準局用受信機 「Trimble NetR9」 ,” [オンライン]. Available: http://www.nikon-trimble.co.jp/products/gnss/trimble_net9.html <2017/01/25 閲覧>.

- [25] “OpenStreetMap,” [オンライン]. Available: <https://openstreetmap.jp/>.
- [26] “C94-M8P u-blox RTK アプリケーション・ボード・パッケージ,” [オンライン]. Available: <https://www.u-blox.com/ja/product/c94-m8p> <2017/01/25 閲覧>.
- [27] “u-center GNSS evaluation software for Windows User guide,” [オンライン]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/u-center_UserGuide_%28UBX-13005250%29.pdf <2017/01/25 閲覧>.
- [28] “パナソニック タフパッド FZ-M1,” [オンライン]. Available: http://ec-club.panasonic.jp/biz/products/pc/tough/pad/m1/?utm_source=ITP_Biz&utm_medium=banner&utm_campaign=FZ-M1_main <2017/01/25 閲覧>.
- [29] 竹内渉, “マレーシアのアブラヤシ管理におけるリモートセンシングの活用,” 報文 小特集 圃場モニタリングのためのリモートセンシング技術の最前線, 2016.

付録

A) 衛星測位実験の結果

I. 実験エリアの天空写真

- 基準局



図 基準局の天空写真

- オープンスカイテラス

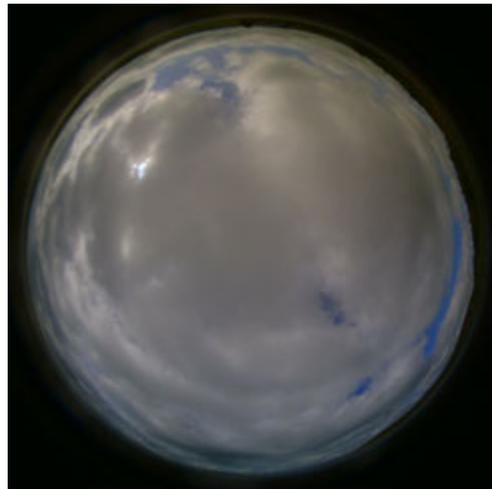


図 オープンスカイテラスの天空写真

- 遮蔽環境(平坦地)



図 遮蔽環境(平坦地)の天空写真

- 遮蔽環境(傾斜地)



図 遮蔽環境(傾斜地)の天空写真

II. 実験結果

結果は●がマルチ GNSS、●を RTK-GNSS の FIX 解、●を RTK-GNSS の FLOAT 解を示す。

Ublox EVK-M8T-0

- オープンスカイテラス

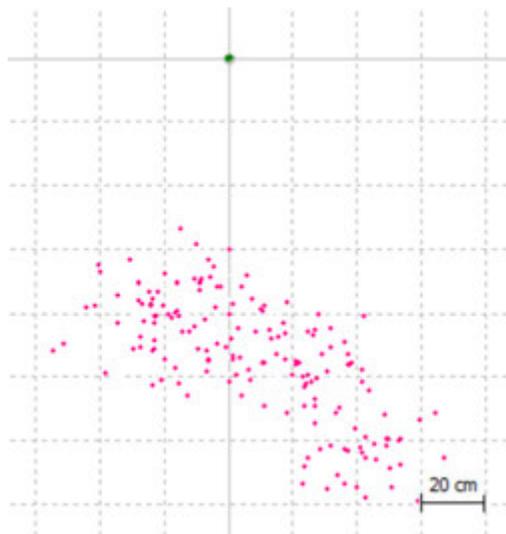


図 オープンスカイテラスにおける測位結果(静止)

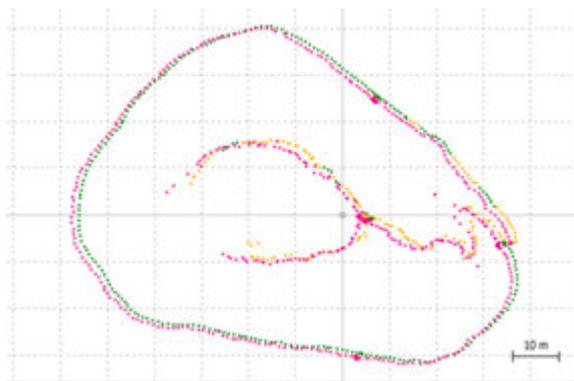


図 オープンスカイテラスにおける測位結果(歩行)

- 遮蔽環境(平坦地)



図 遮蔽環境(平坦地)における測位結果(静止)

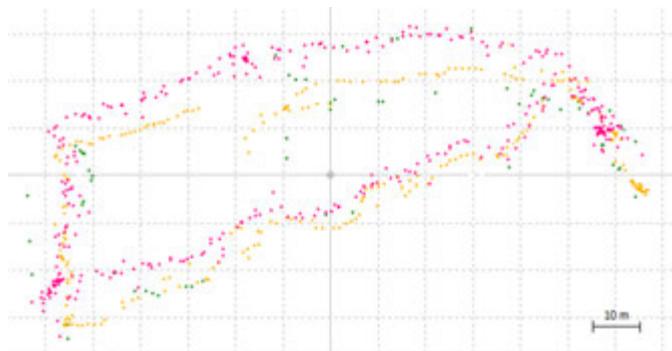


図 遮蔽環境(平坦地)における測位結果(歩行)

- 遮蔽環境(傾斜地)

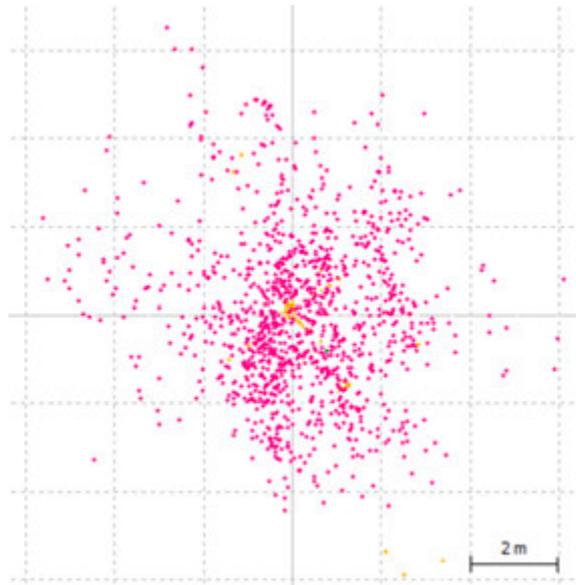


図 遮蔽環境(傾斜地)における測位結果(静止)

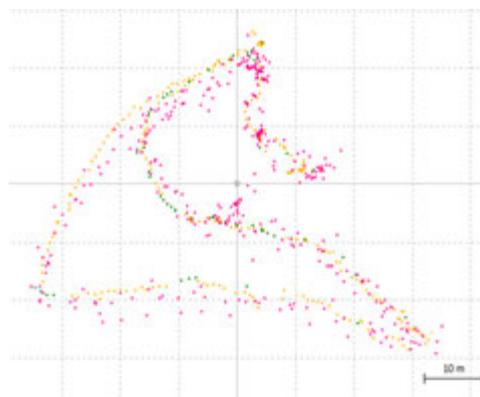


図 遮蔽環境(傾斜地)における測位結果(歩行)

Topcon GR-5

① オープンスカイテラス

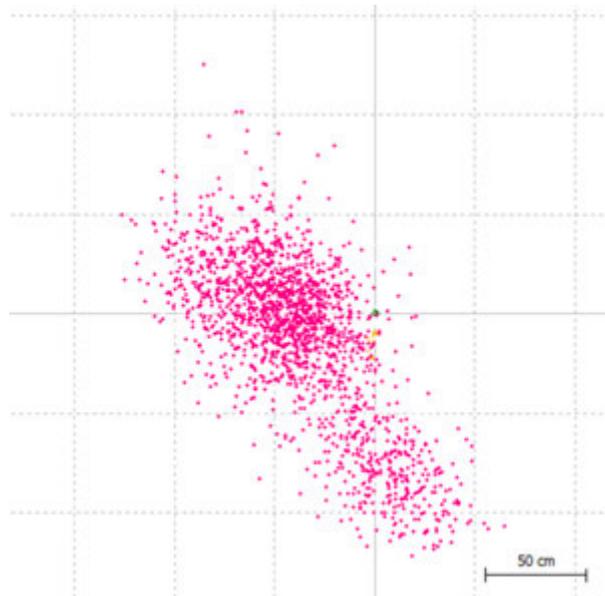


図 オープンスカイテラスにおける測位結果(静止)

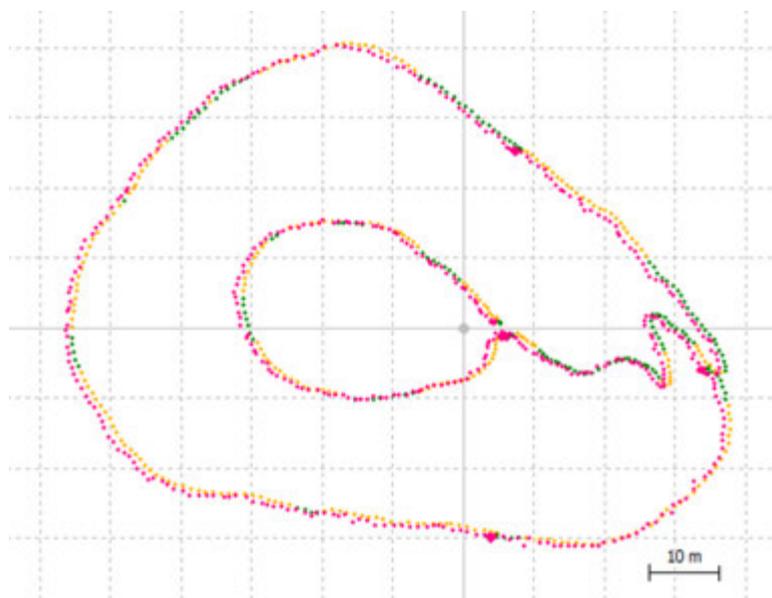


図 オープンスカイテラスにおける測位結果(歩行)

② 遮蔽環境(平坦地)

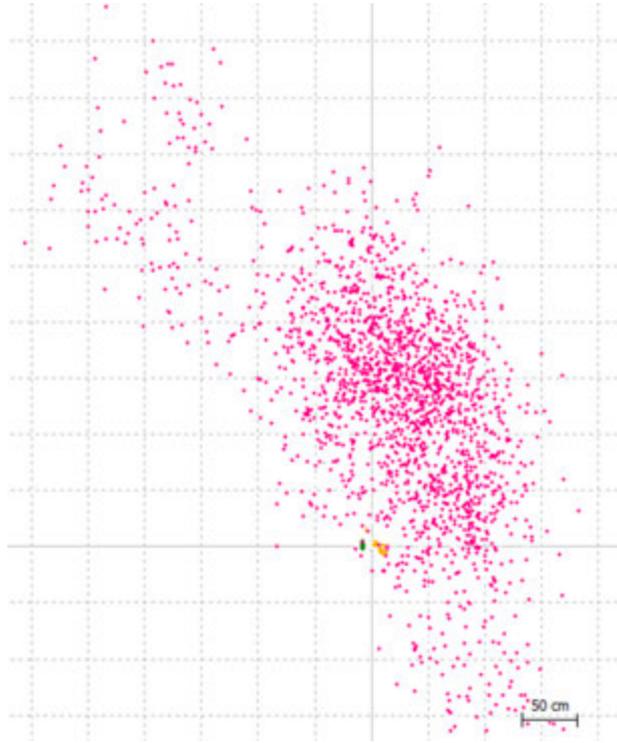


図 遮蔽環境(平坦地)における測位結果(静止)

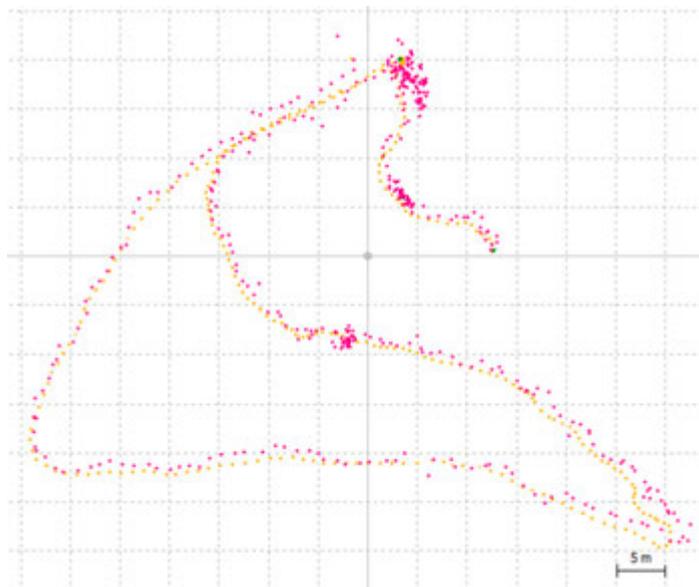


図 遮蔽環境(平坦地)における測位結果(歩行)

③ 遮蔽環境(傾斜地)



図 遮蔽環境(傾斜地)における測位結果(静止)

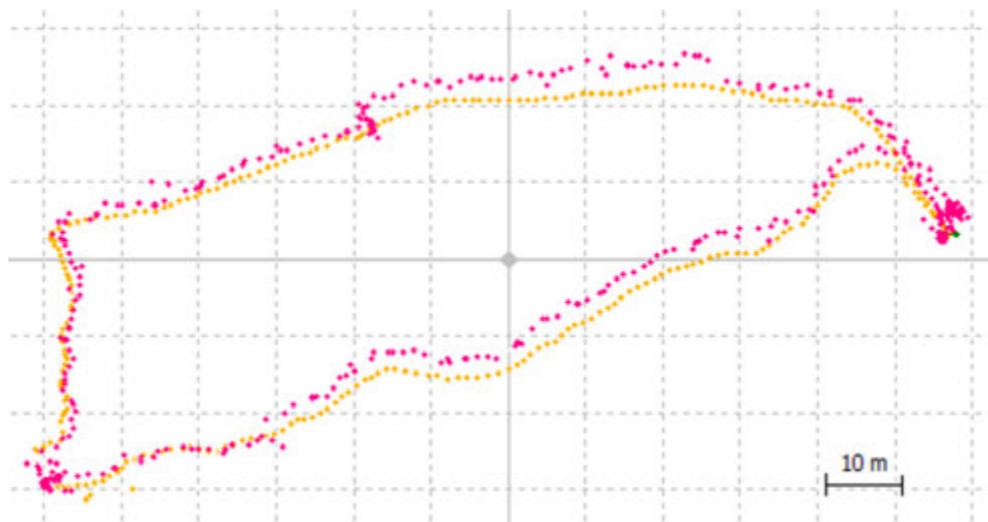


図 遮蔽環境(傾斜地)における測位結果(歩行)

表 衛星測位実験の結果(STD=標準偏差 単位:m)

			Multi:U	U+U	Multi:T	T+T(L1)	T+T(L2)
Open Sky Terrace	Pedestrian	FIX Rate	-	63.9	-	100	49.7
		STD E	-	-	-	-	-
		STD N	-	-	-	-	-
	Stationary	FIX Rate	-	100	-	98.7	99.5
		STD E	0.2765	0.0016	0.3232	0.0019	0.0021
		STD N	0.1925	0.0025	0.4028	0.0038	0.0029
Canopy Flat	Pedestrian	FIX Rate	-	17.9	-	3.5	6.3
		STD E	-	-	-	-	-
		STD N	-	-	-	-	-
	Stationary	FIX Rate	-	81.6	-	81.3	84.7
		STD E	1.4398	0.0144	0.7768	0.0145	0.0102
		STD N	1.6224	0.0094	0.7068	0.0129	0.0117
Canopy Terrace	Pedestrian	FIX Rate	-	15.7	-	0.5	18.2
		STD E	-	-	-	-	-
		STD N	-	-	-	-	-
	Stationary	FIX Rate	-	0.5	-	22.1	55
		STD E	1.6644	0.3283	0.7694	0.0468	0.0151
		STD N	1.8426	0.5487	1.0225	0.1039	0.0349

Multi: Mutil-GNSS

U+U: Ublox EVK-M8T を利用した RTK-GNSS 測位

T+T: Topcon GR-5 を利用した RTK-GNSS 測位

B) プロトタイプを用いた実証実験のデータと結果

I. 実験データ

① 伐採方向決め

表 伐採方向決めのための設計データ

Point Name	Long	Lat
9	101° 57' 56.5259"	3° 39' 15.7637"
10	101° 57' 56.2689"	3° 39' 15.6155"
11	101° 57' 56.0120"	3° 39' 15.4672"
12	101° 57' 55.7550"	3° 39' 15.3189"
4	101° 57' 55.4976"	3° 39' 16.3504"
C	101° 57' 56.7817"	3° 39' 15.9018"
5	101° 57' 55.7527"	3° 39' 16.4927"
B	101° 57' 55.4955"	3° 39' 16.6404"
A	101° 57' 55.4965"	3° 39' 15.1640"
3	101° 57' 55.4976"	3° 39' 16.0527"
6	101° 57' 56.0100"	3° 39' 16.3450"
2	101° 57' 55.4976"	3° 39' 15.7550"
7	101° 57' 56.2672"	3° 39' 16.1973"
1	101° 57' 55.4976"	3° 39' 15.4573"
8	101° 57' 56.5245"	3° 39' 16.0495"

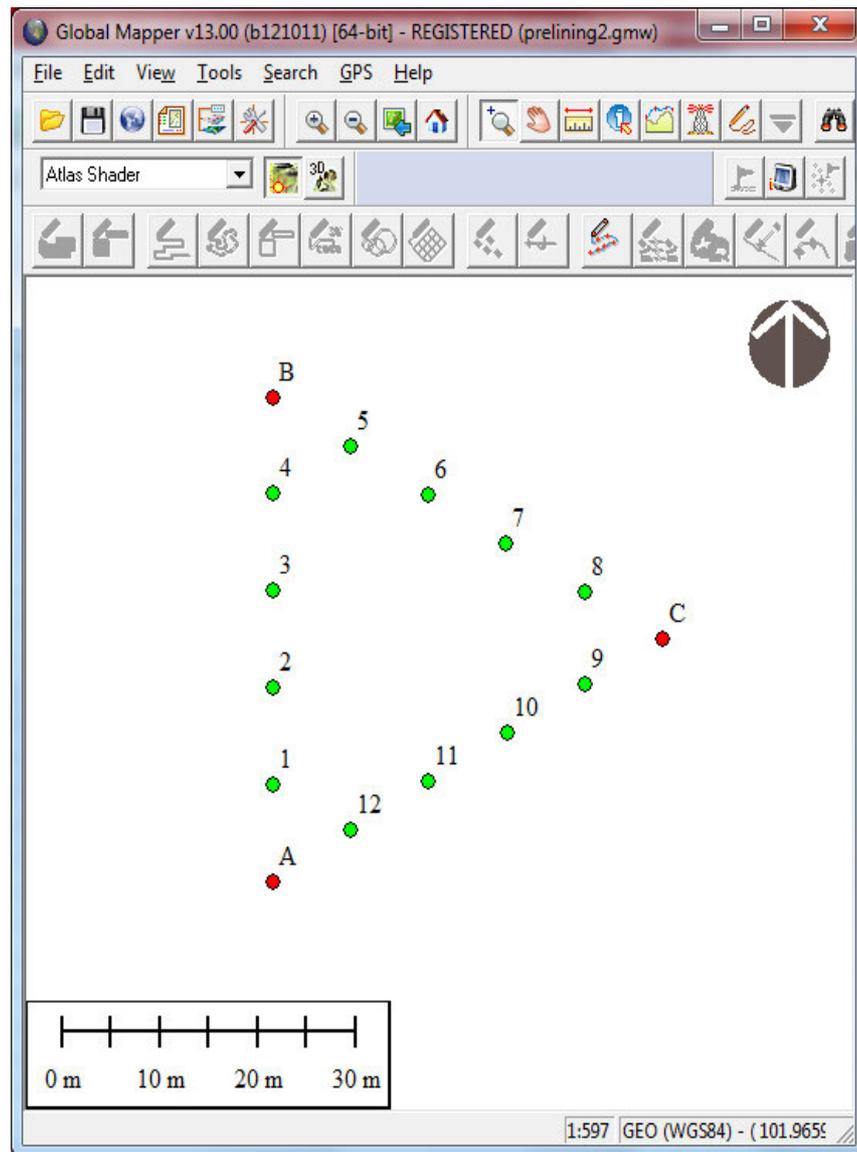


図 伐採方向決めのための設計データ

② 植樹位置決め

表 植樹位置決めのための設計データ

Point Name	Long	Lat
Centroid1	101° 57' 8.0503"	3° 39' 40.7397"
P1	101° 57' 8.0497"	3° 39' 41.1441"
P2	101° 57' 8.2980"	3° 39' 41.0114"
P3	101° 57' 8.5143"	3° 39' 40.8302"
P4	101° 57' 8.6272"	3° 39' 40.5710"
P5	101° 57' 8.4076"	3° 39' 40.3943"
P6	101° 57' 8.1319"	3° 39' 40.3299"
P7	101° 57' 7.8520"	3° 39' 40.3583"
P8	101° 57' 7.5974"	3° 39' 40.4786"
P9	101° 57' 7.4709"	3° 39' 40.7318"
P10	101° 57' 7.5343"	3° 39' 41.0070"
P11	101° 57' 7.7681"	3° 39' 41.1398"

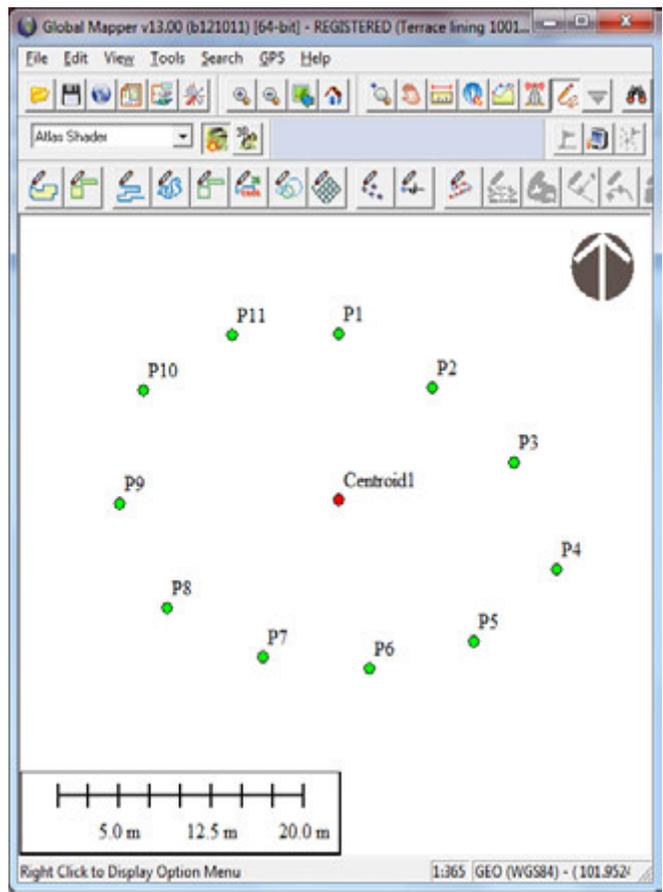


図 植樹位置決めのための設計データ

II. 実験結果

- 伐採方向決め

表 伐採方向決めの結果(ポイント間の距離)

設計値：	Measurement (m)		Absolute error (m)		Error(%)	
	CM	RTK	CM	RTK	CM	RTK
9.144	CM	RTK	CM	RTK	CM	RTK
A - 1	9.05	8.23	-0.09	-0.92	-1.01	-10.01
42737	9.01	9.15	-0.13	0.01	-1.43	0.11
42769	9.06	9.22	-0.09	0.08	-0.93	0.87
42798	8.99	9.18	-0.15	0.04	-1.68	0.43
4 - B	9.02	8.61	-0.13	-0.53	-1.4	-5.83
A - 12	9.01	9.33	-0.13	0.19	-1.45	2.03
43080	9.04	9.01	-0.1	-0.13	-1.14	-1.43
43049	9.01	9.08	-0.13	-0.06	-1.42	-0.69
43017	9.01	8.97	-0.13	-0.18	-1.44	-1.95
9 - C	9.03	9.19	-0.12	0.05	-1.27	0.52
C - 8	8.93	8.88	-0.22	-0.26	-2.39	-2.89
42954	9.00	9.27	-0.15	0.12	-1.63	1.32
42922	8.99	8.86	-0.16	-0.29	-1.71	-3.16
42891	9.00	9.14	-0.15	-0.01	-1.6	-0.08
5 - B	9.15	8.90	0	-0.25	0.03	-2.68
平均	9.02	9.00	0.13	0.21	1.37	2.27

- 植樹位置決め

表 植樹位置決めの結果(ポイント間の距離)

8.7m	Measurement (m)		Absolute error (m)		Error(%)	
	CM	RTK	CM	RTK	CM	RTK
P1 - P2	8.58	8.89	-0.12	0.19	-1.39	2.16
P2 - P3	8.71	8.58	0.01	-0.12	0.08	-1.38
P3 - P4	8.76	8.56	0.06	-0.14	0.68	-1.63
P4 - P5	8.62	8.58	-0.08	-0.12	-0.91	-1.43
P5 - P6	8.65	8.67	-0.05	-0.03	-0.61	-0.3
P6 - P7	8.68	8.56	-0.02	-0.14	-0.28	-1.66
P7 - P8	8.75	8.62	0.05	-0.08	0.59	-0.87
P8 - P9	8.7	8.68	0	-0.02	0.04	-0.18
P9 - P10	8.58	8.64	-0.12	-0.06	-1.44	-0.65
P10 - P11	8.79	8.28	0.09	-0.42	1.05	-4.87
平均	8.68	8.61	0.06	0.13	0.71	1.51
P11 - P1	5.71	8.53	-2.99	-0.17	-34.39	-2.01

C) ユーザ(現場作業員)インタビュー

I. インタビュー項目

- Name
- Gender
- Age
- Position
- Do you have smartphone?
- Where are you from?
- Work experience
- What is your challenge?
- What is evacuation point on your work?
- What is big issue in pre-lining
- What is big issue in palm-lining
- Is there another issues in work?
- How many holydays in 1 week
- How do you think prototype?
- Improve point
- Good Point
- How many times experience plam lining/prelining?

II. インタビュー結果

表 インタビュー結果

Name	Jayade	Amir	Salimudin	Sudarman	Rahmi
Gender	Man	Man	Man	Man	Man
Age	35	39	31	28	45
Position	worker	worker	worker	worker	worker
Do you have smartphone?	none	Yes	Yes	None(Future phone)	NONE Future phone
Where are you from?	Indonesia	Indonesia	Indonesia	Indonesia	Indonesia
Work experience	3years	3years	2years	3	3years
What is your challenge?	Hard work Whether Hot	Whether Hot	Hot weather	Hot(インドネシアより暑い)	Hot whether
What is evaluation point on your work?	Target 50 palm/day/person No pennarty	左同	左同	左同	左同
What is big issue in pre-lining	Difficult to prelining by small trees and hills.	Error in conventional method	Prelining is difficult by bushes (Small trees)	Prelining is difficult by bushes (Small trees)	標高による Error
What is big issue in palm-lining	Nothing(Easy to do)	Error in curve angle area	Error in corner area	Distance palm to palm have errors	Error in corner area
Is there another issues in work?	苗木が夜中に届くとどっかに移さなくて	No issues	None	no	None

	はいけない トラックは朝 まで待ってく れない 1台：2-3時 間→2-3台く る 暑い岩の除去				
How many holyday in 1 week	Friday only				
How do you think prototype	Easer Faster	Good device	Device is ok	Easy Light(Not heavy)	Can be usable
Improve point	Pole would be more lighter Warning siren があると いい	Pole is more light	none		None
Good Point		Easy Fast to get a point	More fast get a point		
How many times plam lining/prelining ?					pre:4mont h Palm:4mon th