

林業における近接作業防止のための Bluetooth を用いた距離推定

永野蒼志¹・亀山翔平²・坂元伸幸³・矢部和弘²・今富裕樹²

1 東京農業大学大学院

2 東京農業大学

3 株式会社 情報システムエンジニアリング

要旨：林業における労働災害の一因に近接作業があげられる。労働安全衛生規則等では、近接作業防止のため、伐木作業時と刈払作業時にそれぞれ危険区域を定めている。しかし森林内では視界が悪く、目視に頼らない接近検知手法が必要である。本研究では小型、省電力でスマートフォン等に搭載されている Bluetooth を用いて、伐倒作業、刈払作業を想定した接近検知試験を行った。電波特性から受信強度による距離の推定が可能と考え、障害物のない河川敷にて RSSI 値による距離推定の可能性を確認した。その後、演習林内にて距離を設定して受信強度の取得試験を行った。その結果、距離条件 10 m では急傾斜地で-63 dbm、緩傾斜地で-57 dbm に RSSI 値を閾値として設定することで安全率 95%の距離推定が可能と考えられた。

キーワード：林業、近接作業、Bluetooth、距離推定

Distance estimation using Bluetooth to close proximity work in forestry

Soshi NAGANO¹, Shohei KAMEYAMA², Nobuyuki SAKAMOTO³, Kazuhiro YABE², Yuki IMATOMI²

1 Graduate school of Tokyo University of Agriculture

2 Tokyo University of Agriculture

3 Information System Engineering Inc.

Abstract: Close proximity work is a notable cause of industrial accidents in forestry. The Occupational Safety and Health Regulations stipulate hazardous areas for logging and brush cutter operations in order to prevent close proximity work. However, visibility is often poor in forests, and there is a need for a method of detecting proximity that does not rely on visual observation. In this study, we conducted an approach detection test using Bluetooth, which is a compact and power-saving technology used in smartphones and other devices, assuming logging and brush cutting operations. The use of radiofrequencies enables the estimation of distance based on the reception strength because of radio wave characteristics. We examined the potential in estimating the distance using received signal strength indicator (RSSI) values in a riverbed without obstacles. Subsequently, we performed a reception strength acquisition test by setting the distance in an exercise forest. Our results indicate that a distance estimation with a 95% safety rate is possible by setting the threshold at -63 dbm for a steep slope and -57 dbm for a gentle slope at 10 m.

Key-word: Forestry, Close proximity work, Bluetooth, Distance estimation

1 はじめに

林業における問題の 1 つに労働災害の発生数の多さがあげられる。令和 2 年の労働者 1,000 人当たり 1 年間で発生する死傷者数の割合を表す死傷千人率は全産業の中で最も高い。死傷災害は年々減少傾向にあるが、死亡災害は近年、減少の傾向が見られない(4)。そのため労働災害防止のための対策が必要である。

過去に発生した労働災害の事例を見ると、伐木作業時や刈払作業時多く発生しており、原因として近接作業が

あげられている(2)。近接作業について、労働安全衛生規則では、「伐倒作業を行う際は伐倒しようとする立木を中心として当該立木の高さの 2 倍に相当する距離を半径とする円形の内側に他の労働者を立ち入れさせてはならない」と定めている(1)。また、林業・木材製造業労働災害防止規程では、「刈払機の操作者から 5 メートル以内を危険区域としこの区域に他の者が立ち入らないこと」と定めている(3)。しかし、森林内では地形や植生等により作業者間での目視による確認は難しく、結果として

近接作業を一因とする労働災害が発生している。そのため、近接作業防止のための目視に頼らない接近検知手法が有効と考えられる。その手立てとして位置推定手法や通信機器を用いて森林内で利用可能な距離推定手法の検討を行った。

現在、主な距離推定手法として、GPS、無線 LAN、RFID、等があげられる。しかし、森林内は立木や林冠、地形等の影響により、多くの場合「距離推定の精度が悪い」、「森林内での使用に適していない」といった課題があげられる。そのため、100 m 程度の近距離での通信が可能で、携帯電話やスマートフォン等に搭載されていて入手が容易な小型でかつ省電力の近距離無線通信規格である Bluetooth を利用することを考えた。

フリスの伝達公式から、電波の特性として自由空間上では、距離が離れると距離の2乗に比例して電界強度が減衰することが明らかになっている。そのため、受信側の電界強度からデバイス間の距離を推定することが可能であると考えられる。

本研究は、伐木作業時と刈払作業時の近接作業防止に向けて、樹高 25 m の立木の伐倒作業、刈払作業の複数による場合を想定した距離推定が目的である。そのため、はじめに障害物のない平地にて電界強度による距離推定の可能性を確認する試験を行い、次に、森林内にて電界強度を取得する試験を行った。

Bluetooth には、電波の最大出力や到達距離を規定した Class が存在する。本研究では、10 m と 50 m の距離推定を目的としているため、試験では規格上の最大出力が約 100 mW で最大通信距離が約 100 m の Class 1 を用いた。

II 方法

1. 試験地 試験は図-1 に示した多摩川河川敷（東京都調布市：以下、河川敷）と、図-2 に示した東京農業大学奥多摩演習林（東京都西多摩郡奥多摩町：以下、演習林）とした。

試験地概要を表-1 に示した。河川敷は障害物がなく見通しがきく平地で、直線状に 100 m の距離がとれる試験地を設定した。演習林は試験機（電波の送信機と受信機）間の見通しがきき、直線状に 70 m の距離がとれる試験地を4ヶ所設定した。設定した試験地は、傾斜や立木密度が異なっている。

2. 試験方法

障害物のない河川敷において、電界強度の取得試験を行った。電界強度の指標として 1 mW を基準で表した RSSI 値 (Receiver Signal Strength Indicator) を用いている。



図-1. 河川敷に設定した試験地 (出典: 国土地理院)

Fig.1 Test site set up in the Tamagawa riverbed.

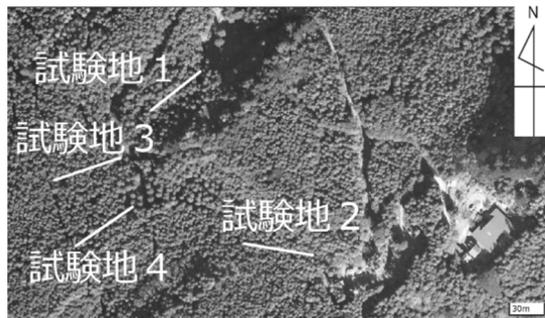


図-2. 演習林に設定した試験地 (出典: 国土地理院)

Fig.2 Set up in the Okutama Experiment Forest, Tokyo University of Agriculture

表-1. 試験地概要

Table.1 Test Site Outline

場所	傾斜 (度)	推定立木密度 (本/ha)	胸高直径 (cm)
河川敷	0	0	0
試験地1	20	450	29.2±0.078
試験地2	20	957	38.1±0.085
試験地3	40	1,200	24.6±0.092
試験地4	40	1,185	24.3±0.082

(注: 胸高直径は±標準偏差を示している。)

計測項目は RSSI 値、温度、湿度、気圧の4項目とした。RSSI 値は事前に試験機を作成して測定した。試験機の仕様は Raspberry Pi 4, Bluetooth ドングル (BSBT4D100) である。取得間隔は 6 秒/回、計測時間は 6 分とした。RSSI 値の傾向を観測するために試験地に直線状に 5 m と 10 m~100 m または 70 m までの 10 m 毎の距離を設定し試験を行った。試験機は三脚を使用して成人男性の腰部の高さにあたる高さ 1 m の位置に設置した。

温度および湿度はおんどとり (TR-72nW) を用いて、気圧は GFTB-200 を用い測定を行った。測定間隔は 1 分とした。

演習林において傾斜は傾斜計を用いて計測し、立木密度は試験機同士を結んだ直線を縦軸として左右に 10 m ずつの、縦 70 m×横 20 m の範囲の毎木調査を行った。

傾斜は下側を 0 m, 上側を 70 m とした。試験は斜面による電波への影響を想定して, 各試験地において電波の送信機を 0 m 地点および 70 m 地点に設置した 2 パターンでそれぞれ 1 回ずつ試験を行った。

距離および試験地ごとの RSSI 値について Tukey 法による多重比較検定 ($\alpha=0.05$) を行った。また, 度数分布による RSSI 値の分析も行った。RSSI 値を度数分布するために, 試験地の傾斜が約 40° の試験地を急傾斜地, 傾斜が約 20° の試験地を緩傾斜地として 2 条件に分けた。そのため, 度数分布による分析では急傾斜地, 緩傾斜地においてそれぞれの 4 回の試験で得られたデータを合算し最大 240 個のデータを用いる。

電波の特性として, 自由空間における距離と受信強度の関係は定まっており, RSSI 値のパラツキは環境によるものと考えられる。したがって, RSSI 値の分布は正規分布に従うと予測される。そのため, 検出確率を 95% とし, 得られた RSSI 値の受信強度が強い方から累積比率が 95% に当たる RSSI 値を判別のための閾値とすることにした。

III 結果

河川敷における距離と RSSI 値を図-3 に示した。試験を 2 回行ったため, 1 回目の実験を河川敷 1, 2 回目の実験を河川敷 2 としている。試験機間の距離が離れるにつれて RSSI 値が減衰している傾向が認められたため, RSSI 値から距離推定ができる可能性を確認できたと判断した。

演習林において, 送信機を 0 m に設置した場合の試験結果を図-4, 送信機を 70 m に設置した場合の試験結果を図-5 に示した。全体の傾向として, 受信距離が離れるにつれて RSSI 値も減衰しており, 森林内においても RSSI 値により距離の推定が可能と考えられる。RSSI 値から距離を推定すると考えた場合, 5 m ~ 30 m 程度の近距離では各条件間の平均値に明確な差があり推定できる可能性があるが, 40 m 以上の遠距離では差は小さく推定は難しいと考えられる。また, 多重比較検定の結果すべての距離との間に有意差が認められたのは 10 m では全 8 試験のうち 4 試験, 50 m では 1 試験であった。そのため, 50 m において RSSI 値による距離の推定は難しいと判断した。原因として, 距離が離れることで生じる RSSI 値の差に対して, 標準偏差が大きいため距離により生じる差が打ち消されていると考えられる。

試験地間で多重比較検定を行った結果, 傾斜の異なる試験地間において有意差が認められた。そのため, 傾斜による RSSI 値への影響があると考えられる。また, 傾

斜の度合いによる RSSI 値への影響の大きさについても明確にする必要があると考えられる。

距離条件 10 m における度数分布による分析結果を図-6, 図-7 に示した。データの取得数は急傾斜地および緩傾斜地ではともに 238 個である。全体的な傾向として大きなピークが存在し, 概ね正規分布に従う分布を表している。また, 図-6 における RSSI 値の -61 ~ -66 dbm のように, 小さく固まって分布している場合もある。図-7 では -49 dbm がピークになっているが, -46 dbm および -52 dbm をピークとした小さな分布が観測された。この小さな分布は試験地の立木密度による影響が異なることを表していると考えられる。つまり試験地による RSSI 値への影響の違いが分布として表れていると考えた。そのため, データ数を増やし試験地ごとの度数分布による分析

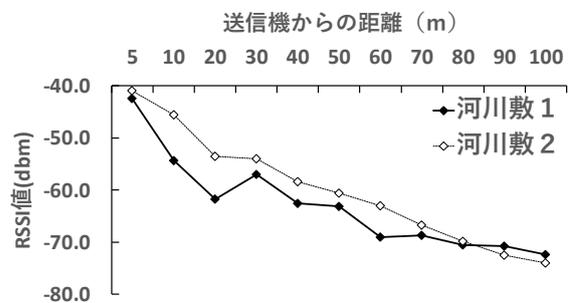


図-3. 河川敷における距離と RSSI 値

Fig.3 Distance and RSSI value in riverbed.

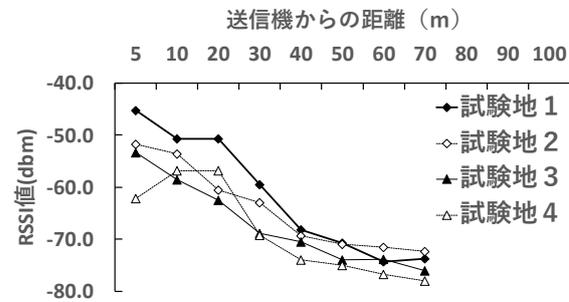


図-4. 送信機が 0 m にある時の距離と RSSI 値

Fig.4 Distance and RSSI value when installed at 0 m.

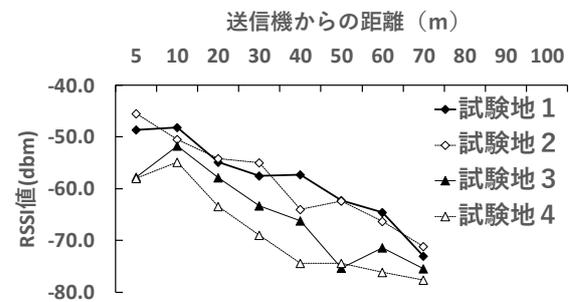


図-5. 送信機が 70 m にある時の距離と RSSI 値

Fig.5 Distance and RSSI value when installed at 70 m.

を行う必要がある。

度数分布の傾向から、得られた RSSI 値の出現分布は正規分布に従うと考えられる。そのため、距離条件 10 m において累積比率 95 %に該当する、急傾斜地では-63 dbm、緩傾斜地では-57 dbm が判別の閾値として考えられた。

傾斜により 95 %に該当する RSSI 値が異なるのは、斜面による電波の吸収や反射が起きたためと考えられる。比較的平地に近い緩傾斜地の方が急傾斜地で観測された RSSI 値に比べ全体的に強い RSSI 値が検出されていることから、傾斜が急であるほど RSSI 値への影響は大きいと考えられる。

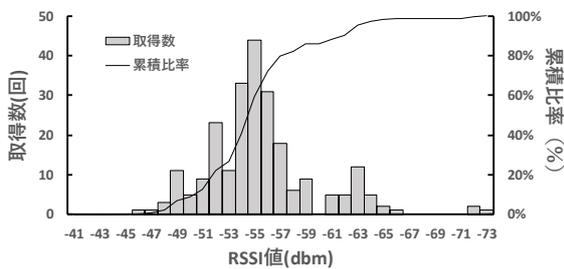


図-6. RSSI 値の取得数と累積比率 (急傾斜地, 距離 10 m)

Fig.6 Number and cumulative ratio of RSSI values (Steep slopes, Distance 10 m)

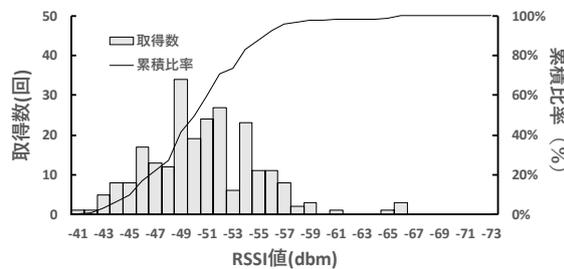


図-7. RSSI 値の取得数と累積比率 (緩傾斜地, 距離 10 m)

Fig.7 Number and cumulative ratio of RSSI values (Gentle slope, Distance 10 m)

IV 結論

伐木作業時と刈払作業時の接近検知手法として、Bluetooth を用いた距離推定について検討した。10 m と 50 m の距離推定を目的として、河川敷と演習林にて試験を行った。結果として、50 m の距離推定は難しく、10 m では距離推定の可能性がみられた。また、10 m における接近検知の場合、急傾斜地では-63 dbm、緩傾斜地では-57 dbm を判別の閾値に設定することにより、検出確率 95 %

で 10 m 以内への接近を検知できると考えられた。

本研究における距離推定手法では、最大通信可能距離より短い距離であっても、距離が離れるに従い距離の変動による RSSI 値の差は小さくなる。そのため、環境により変動した RSSI 値のばらつきで距離の変動により生じた差が打ち消され、距離の推定が困難となった。また、森林内では斜面や立木といった障害物により RSSI 値のばらつきが大きくなるためこの傾向が強くなると考えられる。

度数分布による分析では、得られた RSSI 値を測定した試験地の傾斜ごとに分けた。RSSI 値は概ね正規分布に近い分布を表したが、一部異なる分布を示した。これは、試験地により RSSI 値が受ける影響の大きさが異なることを表していると考えられる。そのため、傾斜ごとの度数分布だけでなく、試験地ごとの度数分布による分析を行う必要があると考えられる。

試験地間の多重比較検定の結果から傾斜による影響が考えられた。傾斜の割合による RSSI 値への影響の大きさについて明確にするため、傾斜の異なる試験地において同様の実験を行うことが必要と考えられる。

引用文献

(1) 中央労働災害防止協会 HP (2021) 労働安全衛生規則.中央労働災害防止協会, オンライン.

(<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-2/hor1-2-1-m-0.htm>) Retrieved on Nov 5th,2021

(2) 林業・木材製造業労働災害防止協会 HP (2021) 災害事例研究.林業・木材製造業労働災害防止協会, オンライン. (http://www.rinsaibou.or.jp/cont02/02_frm.html) Retrieved on Nov 5th,2021

(3) 林業・木材製造業労働災害防止協会 HP (2017) 林業・木材製造業労働災害防止規程 (全文).林業・木材製造業労働災害防止協会, オンライン.

(http://www.rinsaibou.or.jp/cont02/items02/pdf/saibokitei_291026_2.pdf) Retrieved on Nov 5th, 2021

(4) 林野庁 HP (2021) 労働災害の現況.林野庁, オンライン.

(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/routai/anzen/iti.html>) Retrieved on Nov 5th,2021