

19. 間伐施業の生産性・安全性指標の強化学習を活用した可視化方法

株式会社まざらん ○西垣重臣
株式会社キック 才原勝敏
溝渕林業株式会社 溝渕真一

1. 問題が潜在する環境と問題解決の動機

本研究の目的をつぎに示す。

- (1) 林業機械の IoT 化を図ることで林業機械の振る舞いに潜む特徴を把握する。
- (2) 強化学習過程を通じて、この特徴を整理し、予測・判別モデルを構築する。
- (3) 予測・判別モデルを活用して、間伐施業に関わる生産性と安全性の定量的評価指標とインフォグラフィックスを生成する。

IoT 化とは、オブジェクト、人々、システム、情報資源などを相互接続し、知的サービス提供するインフラストラクチャである¹⁾。

著者らは、三軸加速度計を使って、オペレータに対するグラップルの登坂時と残渣処理時の危険警告機能、作業道に潜在するハザードの軽自動車走行による検知方法などについて研究してきた²⁾。この研究成果を活かし、発展させたものが、本研究である。

本研究が対象とする間伐施業工程は、図-1 に示すように、チェーンソーによる伐倒、単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ、プロセッサによる造材（原木造材のための素材玉切りと作業道への原木仮置き）、フォワーダによる山土場への原木運搬、グラップルによる山土場への原木仮置き、10t 運搬トラックによる原木市場までの原木運搬などの一連の施業で構成される。施業方法は、定性間伐による単木伐採であり、全幹地引きである。



図-1 本研究が対象とする間伐施業工程

間伐とは、樹木の生長に伴って混み合ってきたが主伐(利用期に達した樹木の伐採・収穫)には至らない森林で、樹木の生育を促すために間引くための伐採である。林業経営において、施業とは、森林に入り、主として樹木を伐採することにより木材を生産する事業を経営管理し処理することを

いう。ちなみに、林道や作業道の開設では施工という。工期とは、要求に応じるタスクの割り当てることをいい、工程と同じ意味である。林業分野では工期ということが多い。

この間伐施業工程の特徴をつぎに示す。

- (1) 用材：杉檜 57 年生、杉檜の比率約 2:1、胸高直径 26~30cm、樹高 20m、1 本当たり材積約 0.62m³
- (2) 目標出荷材積：約 90m³/ha 間伐率 30%
- (3) 施業エリア地況傾斜 8 度-42 度/ (平均)24 度
- (4) 面積：伐採面積 5.72 ha, 集材面積 5.72 ha
- (5) 作業道：施業エリア内作業道延長距離 1,207m(うち新設 395m), 路網密度 211m/ha, 施業エリアへのアクセスや原木搬出に使用される作業道延長距離約 5,439m
- (6) 構成人員：プロセッサ・オペレータ 1 名, 伐倒作業員 2 名, フォワーダ運転手とグラップルオペレータ：伐倒作業員のうち 1 名が兼務

この間伐施業は、山深い急峻な地形での少人数による作業であり、非常に危険な作業である。この施業エリアにおいては幸運にも携帯電話が使えるとともに、GPS データを受信できた。一般には、携帯電話網の圏外であること、GPS 衛星を捕捉できるが PDOP の値は大きく、連絡網が非常に脆弱である。

施業エリアにアクセスする作業道を図-2 に示す。A は施業エリアへの近道である。B と C の作業道は原木を山土場から原木市場まで運搬するために使用される。

施工エリアの斜面勾配を図-3 に示す。図-3 中の陰影の濃いところの斜面勾配は約 34 度である。斜面勾配の記述統計量は、Min. 7.809, 1st Qu. 19.96, Median 24.82, Mean 24.13, 3rd Qu. 28.52, Max. 41.99, 標準偏差 6.365 である。

林業分野の生産性に関する多くの研究がある。ここでのデータの収集・整形については、その多くが手操作であり、自動化されているとはいえない。測量に関しては GPS 測量が活用され、林業専門の測量ソフトがある。高性能林業機械（ハーベスタ、プロセッサなど）が導入されている。しかし、これらの情報資源が相互連携し、施業データ

の計測と保存・演算が自動化されているとはいいい難い。

IoT は、つぎのことを期待する。

- ①遠隔リアルタイム観測監視
- ②モノの状態の遠隔制御
- ③モノの稼働状況の最適化

しかし、林業分野の現状はこの期待から大きく乖離している。

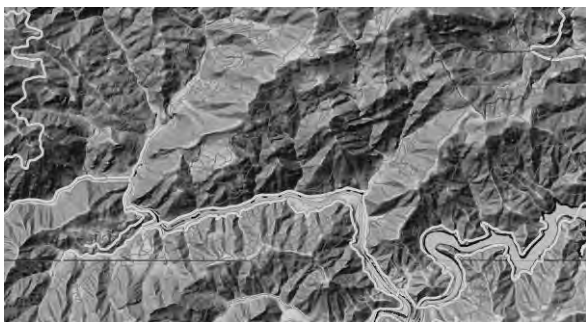
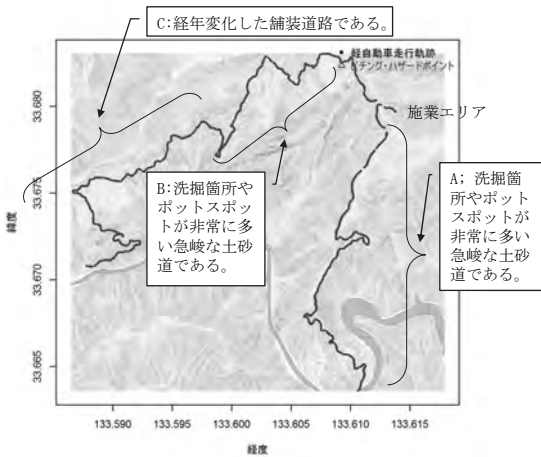


図-3 施業エリアの斜面勾配

まず、予測・判別モデルを構築する強化学習過程について述べる。つぎに、この予測・判別モデルにより生成した生産性と安全性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックの例を示す。最後に、期待効果と現状の問題、そして今後の課題を述べる。

2. 強化学習による予測・判別モデル構築過程

2.1 センサ

「スマートフォンが内蔵するセンサ」と「シングルボード PC である Raspberry Pi をコアに組み立てたセンサ」を使用する。本論文では、前者をスマホ・センサ、後者を ras センサと単に呼ぶことにする。プロセッサにはスマホ・センサと ras センサ

を、フォワーダ、荷下ろし用のグラップル、軽自動車にはスマホ・センサを車載する。チェーンソーによる伐倒を行う作業員はスマホ・センサを胸のポケットに収納する。

サンプリング周波数は、チェーンソーによる伐倒 100HZ, 単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ 1Hz, プロセッサによる造材 100HZ, フォワーダ運搬 1Hz, グラップル荷下ろし 1Hz, 軽自動車作業道走行 100HZ である。

2.2 強化学習過程

本研究で採用した強化学習過程を図-4 に示す。強化学習とは、試行錯誤を通じてより良い行動を選択していく制御の枠組みである。

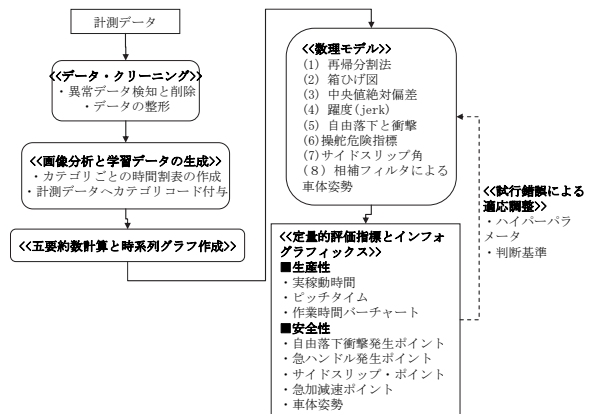


図-4 本研究で採用した機械学習過程

計測と同時にその作業状況を撮画する。画像データと計測時刻の同期は取り難い。そこでカメラ画像の中に時計が写るように工夫した(図-5)。最近、画像内に時刻を表示するカメラが市販されている。今後は、このようなカメラを使う。

画像と時刻に基づいて、作業種別の時間割表を作成する。作業種別ごとの id 番号を割り付ける。作業種別時間割表に基づいて、計測データに作業種別 id を付与し、学習データとする。



図-5 カメラ画像の中の時計

データ・クリーニング後に、五要約数の計算と時系列グラフを作成する。つぎに、問題に応じて、数理モデルを選択し、予測・判別モデルを作成する。予測・判別モデルにより、定量的評価指標の計算とインフォグラフィックスの作成を行う。これらの結果をみて、必要に応じてハイパーパラメータと判断基準の見直しを行い、定量的評価指標の計算とインフォグラフィックスの作成を行う。より良い結果を得るまで、この操作を繰り返す。

2.3 数理モデル

図-5 で示した数理モデルの一部についてその概要を以下に示す。

(1) 再帰分割法

再帰分割法は、説明変数の値を再帰的に分岐させ、それらを組み合わせて、予測・判別の樹木モデルを構築する。分析の結果を IF-THEN ルールとして返し、またそのルールを木構造で図示する手法である。手法として、AID(Automatic Interaction Detector)³⁾、CHAID(Chi-squared Automatic Interaction Detection)、CART(Classification And Regression Trees)、RPART (Recursive Partitioning and Regression trees)⁴⁾などがある。CHAID は AID を洗練した手法である。CART は RPART に組み込まれている。本研究では、RPART を使用した。RPART の使い方は、つぎのように大きく二つに分かれる。

- ① 目的変数が質的変数であるとき、群間分散が最大となるように再帰的分割を行い、分類木を作成する。AID と CHAID の手法と同じである。
- ② 目的変数が連続値などの量的データであるとき、回帰分析を使い、残差平方和が最小になるように再帰的分割を行い、回帰木を作成する。

再帰分割法は、データマイニングにおいて影響力のある因子（説明変数）を探索するために活用されることが多い。

(2) 中央値絶対偏差(MAD: Median Absolute Deviation)

中央値絶対偏差は、各値 (x_i から x の中央値を引いた値)の絶対値の中央値として(1)式により計算される^{5), 6)}。

$$MAD(x) = \text{median}(\text{abs}(x_i - \text{median}(x))) \quad (1)$$

ここで、MAD: 中央値絶対偏差、 $\text{abs}()$: 絶対値、 $\text{median}()$ は中央値を計算する関数である。

MAD を使用した外れ値の検出に(2)式が用いられる。外れ値とは他の値から大きく外れた値である。

$$\text{outlier} = K * \text{abs}((x - \text{median}(x)) / MAD(x)) \quad (2)$$

ここで、 outlier : 外れ値、 K : cut off パラメータ、 $\text{abs}()$ は絶対値を取る関数などである。

(3) サイドスリップ角

自動車工学の分野では、サイドスリップ角把握のための計測装置と計測方法、計算方法などについて多くの研究があり、市販の計測装置もある^{7), 8)}。ここでは精度のよい計測装置を多く搭載している事例が多い。

間伐現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォンに内蔵されている三軸加速度計と GPS 受信機をセンサとして活用し、計算負荷の小さい計算方法を採用する。サイドスリップ角計算方法のイメージを図-6 に示す。建設機械が移動していないときは、サイドスリップ角を計算しない。

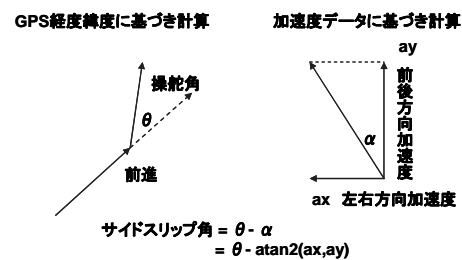


図-6 サイドスリップ角計算のイメージ

(4) 相補フィルタによる車体姿勢把握方法

3軸加速度データと3軸角速度のデータを使用し、相補フィルタを使い、車体姿勢（ピッチングとローリング）を計算する。車体姿勢計算のイメージを図-7 に示す。

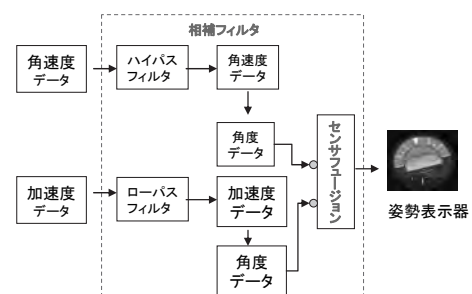


図-7 相補フィルタによる車体姿勢表示のイメージ

(5) 危険警告のトリガの考え方

定量的評価指標に関する危険警告のトリガの考え方について述べる。

簡便な方法であり、高い周波数や外れ値の影響を受けないと考えられる連検定の考え方を採用する。ここでは、計測データの連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。連数”7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。本研究では、連数が”7”に達したとき、または特性値(加速度応答値, サイドスリップ角, 車体姿勢角など)の既定の閾値に達したときに危険警告のトリッガを引き、そのときの観測値(計測値, 時刻, 位置)を警告ポイントとする。

3. 定量的評価指標とインフォグラフィック

3.1 チェーンソーによる伐倒

チェーンソーによる伐倒状況を図-8に示す。



図-8 チェーンソーによる伐倒状況

チェーンソーによる伐倒作業は、その他(移動, 切削準備態勢), 受け口切削, 追い口切削, くさび打ち込み, 伐倒追い切りなどの作業種別で構成される。チェーンソーによる伐倒を行う作業員はスマホ・センサを胸のポケットに収納する。このスマホ・センサにより三軸加速度, 三軸角速度, GPSなどのデータを計測した。サンプリング周波数は100HZである

ここでの強化学習手順をつぎに示す。

手順1:学習データの作成

記録動画に基づいて作業の時間割表を作る。

この時間割表に作業種別のカテゴリ番号を付与する。ここで作業種別は、その他:0と切削:1の二種類とした。

手順2:再帰分割法により最も影響力のある説明変数を選択する。

手順3:選択された説明変数の五要約数を計算する。

手順4:五要約数のうち中央値を選択し、(2)式を適用し該当する時刻を切り出す。

手順5:切り出した時刻に基づいて作業時間を計算し、作業時間表を出力する。

最も影響力のある説明変数は左右方向加速度であ

った。左右方向加速度の五要約数を表-1に示す。

表-1 左右方向加速度のカテゴリごとの五要約数

	Min.	1st Q	Med.	Mean	3rd Q	Max.
0	-0.975	-0.124	0.071	0.067	0.286	1.181
1	-1.325	-0.626	-0.442	-0.447	-0.261	0.385

(凡例 0:その他 1:切削)

手順4と手順5にて作成した作業時間表を表-2に示す。ここでcut offパラメータ=2とした。

伐倒本数は2本である。1本当たり材積は約0.62m³である。ピッチタイムは、

$$121.76(\text{秒}/\text{m}^3)=150.983/(0.62*2)$$

となる。

表-2 作業時間表

	時間(秒)	比率%
切削時間	150.983	53.373
その他時間	131.901	46.627
計測時間	282.884	100

3.2 単胴地曳き集材ウインチによる木寄せとプロセッサによる造材

プロセッサ・単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ状況を図-9に、プロセッサによる造材状況を図-10に、それぞれ示す。ここでの強化学習手順はチェーンソーによる伐倒の手順と同じである。最も影響力のある説明変数は前後方向加速度である。前後方向加速度の五要約数を表-3に示す。手順4と手順5にて作成した作業時間表を表-4に示す。ここでも同様にcut offパラメータ=2とした。木寄せ本数は3本である。1本当たり材積は約0.62m³である。

ピッチタイムは

$$401.134(\text{秒}/\text{m}^3)=\text{稼動時間}(\text{秒})/(1 \text{本当たり材積} * \text{本数})=746.109/(0.62*3)$$

である。



図-9 プロセッサ・ウインチによる木寄せ状況



図-10 プロセッサによる造材状況

表-3 前後方向加速度の五要約数

	Min	1stQu	Med	Mean	3rdQu	Max
その他	-0.01	0.001	0.003	0.008	0.005	0.1
ワイヤー	0.039	0.052	0.056	0.055	0.059	0.08
ウインチ	-0.01	0.058	0.062	0.06	0.066	0.09
玉切り	0.05	0.097	0.109	0.105	0.117	0.15

表-4 プロセッサ作業時間表

	計測時間(秒)	比率%
ワイヤー引き回し時間	161.024	11.387
ウインチ木寄せ時間	423.057	29.916
玉切り時間	162.028	11.458
稼働時間	746.109	52.761
その他時間	668.033	47.239
全作業時間	1414.142	100

フォワーダによる原木運搬，グラップルによる原木荷下ろしなどの作業についても，同様の手順にて作業時間とピッチタイムを計算している。これらの内容は紙面の都合上割愛する。

3.3 サイドスリップ

原木運搬時のフォワーダのサイドスリップ発生ポイントを図-11に示す。ここで，サイドスリップ角計算方法と危険警告のトリガの考え方を使った。図-12中の記号は，危険警告発生時の計測値をスケール化し，影響の強さとして円半径の長さで表した。オペレータは，このサイドスリップ発生ポイントを知覚していないようである。

オペレータの意見をつぎに示す。

- ① 視線位置は，遠近だいたい同じ程度の割合である。
- ② その場での転回（キャタピラの左右同時逆回転）は，機械に負荷がかかるので基本的にはしないが，狭い場所ではやることもある。
- ③ サイドスリップに関しては，通常作業でスリップを感じることはほぼ無いが路面状況等により，ごくまれに感じることもある。
- ④ 運搬中に一番気を付けることとしては，路肩の強

度の確認である。弱そうな路肩の場合は，山側ぎりぎりに寄せて路肩へ近づかないようにして転落を避ける。

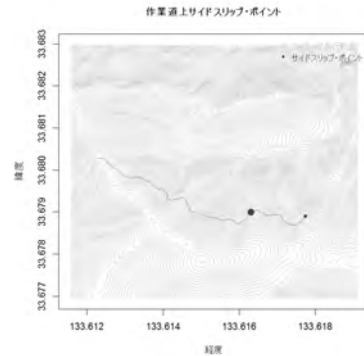


図-11 原木運搬時のフォワーダのサイドスリップ発生ポイント

同様に，自由落下・衝撃，急ハンドル，サイドスリップ，急加減速などの発生箇所図も出力している。これらの図については紙面の都合上割愛する。

3.4 作業道走行時の軽自動車車体姿勢

前述した相補フィルタによる車体姿勢把握方法を使ったプロセッサの造材時車体姿勢と作業道走行時の軽自動車車体姿勢について以下に示す。

(1) プロセッサの造材時車体姿勢

作業道走行時の軽自動車車体姿勢を図-12に示す。ここでrasセンサの計測データを使用した。太い縦線は危険警告のトリガの考え方を使った警告ポイントである。ここで，警告ポイントは，連数が“7”を超え，そのときの値が30度より大きく，または-30度未満のときのポイントである。単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ作業時ときに警告が発生している。全幹地引きであるため，根株や急斜面にひっかり，外れたときの反動の影響と思われるが，オペレータは知覚していないようである。

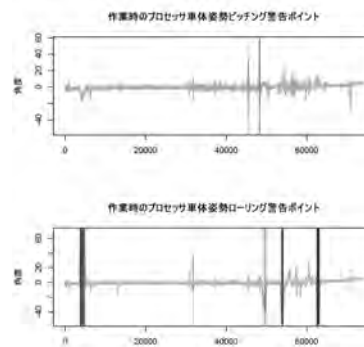


図-12 プロセッサの車体姿勢の経時変化

オペレータの意見をつぎに示す。

- ① 牽引力が強いので、無理をすると簡単にワイヤーが切れる
- ② 基本的には一定の動力で引くので、あまり大きな車体姿勢の変化はないはず。
- ③ 引いている最中に引っかかり等を感じた場合は、そのまま引いてよいかどうかを玉掛要員に確認をする。
- ④ 必要であればアームを下げるかワイヤーを出して調整をする。再度アームを上げて引く。

(2) 作業道走行時の軽自動車車体姿勢

図-2 に示した作業道を軽自動車で行き、相補フィルタを使い、そのときの車体姿勢を把握した。車体姿勢の経時変化を図-13 に示す。この急峻な作業道は、曲率半径の小さい曲線部、洗掘削とポットスポットが多く、非常に危険である。その結果、危険警告が多く発生している。煩雑な図を避けるため、危険警告の縦線表記は省略した。

この車体姿勢の経時変化を姿勢表示器で表現したデモサイトを

<http://ap.c2mp.com/f/Flight/AttDisp.asp>

に設定した。このデモでは車体姿勢の変化を読み取りやすいように値を修正してある。ご覧頂ければ幸甚である。

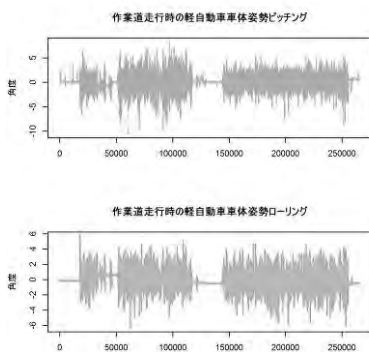


図-13 作業道走行時の軽自動車車体の経時変化

4. 期待効果と現状の問題、そして今後の課題

本研究では、安全性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスを生成方法と一部の出力例を示した。これらの情報のフィードバックは働き手の状況認識を向上させると期待される。

一般に、間伐作業エリアは通信圏外であることが多い。GPSデータを受信できることが多いが、そのときのPDOP値は大きいであろう。一般に、少人数による作業であり、働き手は散在することになる。そのため、スマートフォン、ナビゲータなどを使って事前に位置確認を行うのが通例である。

今後の課題をつぎに示す。

(1) サンプリング周波数

それぞれの作業の特性を考慮して、適切なサンプリング周波数を探る。

(2) 予測・判別モデルの改良

他の作業現場に展開しながら、予測・判別モデルの汎化誤差評価とパラメータのチューニングを行う。ここでは、架線集材のIoT化を視野に入れる。

(3) 遅延/途絶耐性機能を持つ作業エリア内の通信網の構築

(4) 間伐対象地の概況調査におけるGISの活用

(5) 土工における活用

チェーンソー伐倒時間計測方法は棒状バイブレータ時間計測に、サイドスリップや自由落下・衝撃検知は運搬道路に潜在するハザード検知、プロセッサの車体姿勢把握は掘削積込機械の車体姿勢把握に活用できる。

参考文献

- 1) ISO/IEC JTC 1 Information technology: "Internet of Things (IoT)," Preliminary Report, 2014
- 2) Katsutoshi Saibara, Shigeomi Nishigaki, Fujio Matsuda, Shinichi Kubota: "Contrivances to Assist Forest Machine Operator on Forest Road with Steep Slope," pp. 458-465, Proceedings of the 31st ISARC, 2014.
- 3) S. Nishigaki., J. Vavrin, N. Kano, T. Haga, J. Kunz and K. Law : "Human ware, Human Error, and Hiyari-hat: a Template of Unsafe Symptoms," Vol. 120, No. 2, pp. 421-442, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 1994.
- 4) Terry M. Therneau, Elizabeth J. Atkinson, Mayo Foundation: "An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines," 2017, on line: <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/vignettes/longintro.pdf>
- 5) Ronald K. Pearson , Yrjö Neuvo, Jaakko Astola and Moncef Gabbouj: "Generalized Hampel Filters," DOI 10.1186/s13634-016-0383-6, Pearson et al. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016.
- 6) Christophe Leys, Christophe Ley: "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median," YJESP-03038; No. of pages: 3; 4C.; Journal of Experimental Social Psychology, 2013.
- 7) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERSVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.
- 8) Brendan Watts: "How and why does slip angle accuracy change with speed?" Slip Angle Accuracy, Version: 120802, 2012.