

# 伐採作業シミュレーションを利用した かかり木回避アルゴリズムの提案と伐採難易度の評価

伊能健悟<sup>1</sup>・仁多見俊夫<sup>1</sup>

1 東京大学大学院農学生命科学研究科

**要旨:** チェーンソーを用いた人力伐倒作業において、かかり木の発生は効率性・安全性を低下させるイベントである。本研究では、周囲の立木と接触することなく伐採できる伐採方向を持つような伐採対象木の数を最大化する伐採順序・伐採方向を出力するアルゴリズムを提案する。その際に難易度という概念を伐採対象木に対して導入し、周囲木との接触における伐採対象木の時空間的な特徴を表現することで、単純なアルゴリズムによる最適化を実現した。また、難易度の概念を伐採作業全体に対しても導入することで、新しい作業計画の評価指標としての可能性についても検討した。

**キーワード:** かかり木, 人力伐倒作業, 作業評価, 難易度

## The algorithm avoiding hang-over and evaluation of felling operation difficulty by felling simulation

Kengo INO<sup>1</sup> and Toshio NITAMI<sup>1</sup>

The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi Bunkyo-ku Tokyo 113-8657

**Abstract:** Hang-over at manual tree felling operation negatively affects the efficiency and safety in forestry. This paper proposes the algorithm to maximize the number of trees that have felled angles not to touch to surrounding trees. This simple algorithm makes use of difficulty expressing time-spatial features of felling target trees in aspect of touch. In addition, an index “Difficulty” was introduced to enable evaluation of felling operation.

**Key-word:** hang-over, manual felling operation, operation evaluation, difficulty

### I はじめに

チェーンソーを用いた人力伐倒作業において、かかり木の発生は林業において作業の効率性・安全性に悪影響を及ぼすイベントであり、かかり木による災害事例や力学的特性、安全な処理方法など、多くの研究がなされている(4, 5, 6)。しかし、これまでの研究ではかかり木の発生を抑えるための具体的な作業手順を提案するものはなかった。かかり木は伐採対象木と周囲木の物理的な接触によって発生するものであるため、伐採時に周囲木との接触そのものが起きない伐採対象木の数が最大となる伐採順序・伐採方向を求めることにより、かかり木回避数を減少させることが出来ると考えられる。そこで、本研究では上記の目的を達成するために、伐採作業における難易度という概念を導入し、作業計画の意思決定支援を検討する。

3D レーザー測量によって得られた情報から、伐採対象木を周囲木との時空間的な接触可能性による難易度に

よって分類を行い、周囲木との接触が起きない伐採対象木数が最大となるようなアルゴリズムを提案する。加えて、本研究では伐採作業計画にも難易度の概念を導入し、伐採木と周囲木との接触の面での作業難易度の評価を行い、作業を考察する際の新しい概念としての利用可能性についても検討した。

### II データと提案概念・手法

#### 1. データ

本研究ではアドイン研究所の3D レーザー測量機器「OWL」によって得られた森林情報に対して提案概念・アルゴリズムの適用を行なった。対象森林の情報と立木位置図は表-1, 図-1に記す。提案手法に必要となる未取得のデータ(枝張り, 樹冠長)については推定式(1, 2)を用いて推定を行った。

#### 2. 作業の仮定

本研究での伐採作業は以下の4点の仮定のもとで検討

した。1) 全立木のうち、胸高直径が全体の下位 1/3 となるものまでを伐採対象木とする劣勢間伐を想定した。また、森林内には路網は存在しないという仮定のもと、全ての立木を人力伐倒するものとした。2) 伐採可能な方向は傾斜方向に対して安全な伐倒方向とされている横方向・斜め下方向(3)を伐採方向の候補とした。3) 伐採の方向は 0.1 度単位で正確に倒すことができるとした。4) 伐採木と周囲木の接触の判定は図-2 のような胸高直径・樹高・枝張り長・樹冠長で特徴付けられる簡易的な樹体モデルを用いた。

### 3. 提案概念：形式的難易度

本研究では難易度  $d$  を以下の式で定義する。

$$d = \frac{\text{理想状態と実現可能な状態の乖離度}}{\text{実現可能な状態の期待値}}$$

上式の分子は、あるタスクに対する、ある解の良さを表現しており、分母は、そのある解の実現する可能性を表現している。本研究で提案する具体的な難易度  $d$  は 0 以上の実数値として定義され、値が大きいくほど難しいタスク・解であることを示す。

### 4. 提案概念：伐採難易度

本研究では伐採対象木に対して、図-2 の接触判定の樹体モデルを用いた周囲木との接触可能性による難易度  $d$  で分類を行った。(1) Easy-Tree：任意の伐採タイミングで、周囲木との接触が起きずに伐採できる方向が存在する伐採対象木。すなわち、樹体モデル上で接触が発生しない伐採方向を、伐採作業前から持っているもの。

(2) Difficult-Tree：任意の伐採タイミングで、接触判定モデルを用いた周囲木との接触が起きずに伐採できる方向が存在しないもの。(3) Normal-Tree：伐採順序によっては、周囲木との接触が起きずに伐採できる方向を持つ伐採対象木。すなわち、伐採作業開始後から終了までのあるタイミングにおいて、樹体モデル上での接触が発生しない伐採方向を持つもの。

上述の難易度  $d$  において、理想状態は「周囲木との接触が起きないこと」、実現可能な状態は「その伐採対象木を接触無しで倒すために、事前に伐採しておかなければならない周囲木の本数」、実現可能な状態の期待値は「伐採対象木の伐採方向の候補範囲」として定義することができる。ただし、以下で見るように分子に着目するだけで上述の三つのクラスに分類することができる。Easy-Tree と Difficult-Tree での難易度の分子はそれぞれ 0、正の無限大と考えて良く、上式の定義においては、Easy-Tree の難易度は 0、Difficult-Tree では正の無限大、Normal-Tree の難易度は有限の正の数と考えることができる。以下で提案するアルゴリズムでは、伐採順

序・伐採方向の工夫によって周囲木との接触なしで伐採できる伐採対象木 (Normal-Tree) の数を最大にするような作業手順を考える。

### 5. 提案アルゴリズム

本研究では、上述した伐採対象木の伐採難易度による分類を利用して、Normal-Tree 群が伐採時に周囲木との接触が発生しない伐採方向を持つような伐採順序・伐採方向を出力するアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムは以下の五つのステップによって構成される。

**5-1. 前処理** 以降のアルゴリズムで必要な量を事前に計算する。ここでは立木間の距離行列や枝張り長・樹冠長を算出した。

**5-2. 伐採対象木の難易度による分類** 図-2 の樹体モデルと立木の位置情報を利用し、伐採対象木と周囲木との接触判定を行い、難易度による分類を行う。表-2 にそれぞれに分類された本数と立木の情報を示し、図-3 にそれぞれの位置のプロットを示す。

**5-3. 作業領域の設定** 本研究では 385 本の立木が伐採対象木となったが、これを一人のチェーンソー作業者が 1 日のうちに伐採することは非現実的である。そこで本研究では 1 日の伐採対象木の集合をクラスタと呼び、各クラスタに含まれる本数が、1 日の作業量として過少・過大にならないように検討した。「5-3-2. クラスタ修正」が提案アルゴリズムの本質的な部分であり、以降のステップで「クラスタ内での伐採順序」だけ考えることで Normal-Tree 群の周囲木との接触を避けることができるように、Normal-Tree 群の伐採順序を調整する。

**5-3-1. 初期クラスタの設定** このステップでは、空間的な情報のみを用いて、修正を行うことを前提としたクラスタを生成する。実際はこのステップは作業計画者が自由に決定することができるが、本研究では伐採対象木の xyz 座標に対して k-means 法を適用することで初期クラスタを定めた。本研究では  $k=15$  とし、1 日の伐採本数が 25 本程度になるように設定した。

**5-3-2. クラスタ修正** ここでは Normal-Tree 群内での関係性を定義する。本研究では、ある Normal-Tree に対して、「その木を伐採すれば、周囲木との接触なく伐採することができる」という伐採対象木を「親」と定義し、考えていた Normal-Tree を「子」として親子関係を定義する。上記で定義した親子関係に従い、クラスタ間での親子関係が齟齬が発生ないように修正を行う。具体的には、全ての Normal-Tree に対して、既に伐採したクラスタ内、もしくは同じクラスタ内に親が含まれているように、初期クラスタ内の立木構成を変更する。

**5-4. 伐採順序の最適化** 本研究では、伐採作業をし

ている斜面下方での伐採作業が生じないように、クラスタの中心の  $z$  座標が小さいクラスタから、かつクラスタ内で  $z$  座標が小さい立木から伐採することを考える。しかし、同クラスタ内での「親」立木が未伐採の場合は、その伐採対象木の伐採を後ろに回し、接触が発生しない伐採対象木の数を最大化するように伐採順序を決定する。

**5-5. 伐採方向の最適化** このステップではすでに伐採順序が決定しているため、1) 接触が起きない、かつ 2) それ以降の全移動経路(伐採対象木を、前節で求めた伐採順序に従って直線で結んだもの)に伐採木が交差する回数が最小になるような伐採方向を出力するものとする。この量が大きいほど、負荷の高い歩行が要求される(伐採された立木を乗り越える、遠回りして移動時間が長くなる、など)と考えることができ、この値の最小化には安全性の面で意味がある。

### III 実験結果と考察

本研究ではベースラインモデルを、提案アルゴリズムの「クラスタ修正」を行わずに伐採順序・方向を最適化したものとし、提案アルゴリズムを最適モデルと呼ぶこととする。本研究では上記の二つのモデルに対して、作業そのものの難易度の検討のため、1) 周囲木との接触なしで伐採できる伐採対象木の本数、2) 伐採木が移動経路を妨げる回数に加えて、3) Easy-Tree 群, Normal-Tree 群の伐採方向の範囲についての結果も示す。

#### 1. 周囲木との接触なしで伐採できる伐採対象木の本数

ベースラインモデルでは、周囲木との接触が起きずに伐採可能な伐採対象木の本数は385本の全伐採対象木のうち90本であり、最適化モデルでは94本であった。クラスタ修正のステップで、Normal-Tree 群内の親子関係を考慮して伐採順序を最適化する準備を行うことにより、物理的に周囲木との接触が起きない伐採作業の割合が増加し、提案アルゴリズムの有用性が示された。

#### 2. 伐採木が移動経路を妨げる回数

ベースラインモデルでは18回、最適化モデルでは14回であった。上記の結果より、モデルを適正化することで移動面での安全性を向上させることができた。

#### 3. Easy-Tree, Normal-Tree の伐採方向の範囲

ベースラインモデル、最適化モデルでの伐採方向の範囲の結果について、難易度による分類ごとに平均値と標準偏差を表-3に示す。ベースラインモデル、最適化モデルでの伐採方向の選択範囲レンジについて、難易度  $d$  による分類ごとに平均値と標準偏差を表-3に示す。

Normal-Tree 群, Difficult-Tree 群ともに、 $t$  検定

(Paired  $t$ -test) によっては有意水準 0.05 で有意差は

見られなかった。ここでの伐採方向の最適化評価は、接触が起きない伐採木の最大化の下で、移動経路への干渉を最小化させることを目標としており問題はない。

以上で見たように、最適モデルの出力した作業計画は、ベースラインモデルの出力した作業計画よりも、1) 周囲木との接触なしで伐採できる立木が多い、2) 伐採木が移動経路を妨げる回数が少ない、また、3) 必要とされる伐採の精度の要求が低いという3点において、実現可能な、より望ましい作業計画である。これを難易度  $d$  を用いて評価することを以下で考える。

### IV 伐採作業の難易度による評価

伐採の難易度を考えたように、難易度  $d$  の概念を伐採作業の表現に変換し、伐採作業の「良さ」に対する解釈を与えることを考える。形式的難易度において、理想状態である伐採作業は、「伐採対象木が、全て周囲木と接触することなく伐採することができる。加えて、伐採作業者の移動経路に伐採した木が存在しない」こととする。実現可能な状態は、ある伐採作業における結果そのものと考えることができ、理想状態と実現可能状態の乖離度は「伐採時に周囲木と接触が避けられない伐採対象木の本数」と「伐採した立木が移動経路上を妨げる回数」の関数と考えることができる。本研究では、この部分の詳細な定式化には踏み込まず、和をとることで乖離度とした。実現可能な状態の期待値は、ある作業計画が実現する期待値になる。本研究では伐採方向に期待通りに倒せる仮定に従うため、「伐採対象木が周囲木との接触を起こさずに伐採できる方向の範囲 (Easy-Tree 群と Normal-Tree 群の伐採方向の範囲の平均値)」として定義できる。以上の定義に従うと、それぞれのモデルの出力した作業計画の難易度  $d$  は以下のように計算できる。

$$\text{ベースラインモデル} = (295 + 18) / 44.9 = 6.97$$

$$\text{最適モデル} = (291 + 14) / 45.5 = 6.70$$

上記のように難易度  $d$  を構成する三つの量を、直感に背かない自然な定義(伐採時に周囲木との接触が起きない方がよい、伐採木が作業経路に入っていない方がよい、要求される伐採の精度は低い方がよい)に従うことで、作業計画の難易度を導入でき、最適化モデルの方が望ましい作業計画であると表現することができた。

### V まとめと展望

本研究は、1) 形式的難易度の概念を導入し、2) 詳細な森林情報を利用して、伐採対象木を「伐採時の周囲木との接触」の点の難易度で分類を行い、3) 接触を起こさずに伐採できる伐採対象木の数が最大となるアルゴ

リズムの提案を行なった。

### 1. 提案アルゴリズムについて

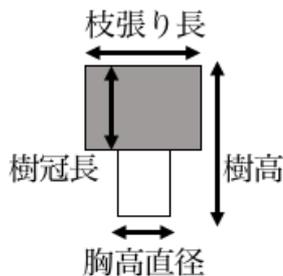
本研究で提案したアルゴリズムを利用することで、伐採木の周囲木との接触を避けるような伐採順序・伐採方向を求めることによって、粒度の細かい意思決定の支援を行える可能性が示された。今後は実証実験等を行うことで、有用性の評価、より有用な支援の実現を目指す。

### 2. 難易度の導入について

本研究での難易度での作業評価は、二つの実験結果での評価にとどまっていること、その値そのものが意味するものを明確に表現していない点など、今後の更なる検討が必要であり、提案アルゴリズムと同様に、追加の実験・検証を行っていくことで有用な支援の実現を目指す。

### 引用文献

- (1) 有田学 (1957) スギ孤立木の枝張りについて. 日本林学会誌 **39**(1) : 25-27
- (2) 石田敏之 (2016) 群馬県内スギ人工林における樹冠と直径の関係. 群馬県林業試験場 研究報告 **20** : 44-51
- (3) 厚生労働省 (2015) 「チェーンソーによる伐木作業等の安全に関するガイドライン」の策定について. [http://www.rinsaihou.or.jp/cont04/items173/pdf/27kiha\\_tsu271207\\_04.pdf](http://www.rinsaihou.or.jp/cont04/items173/pdf/27kiha_tsu271207_04.pdf) 2020年11月10日アクセス
- (4) 松本武 (2010) ヒノキ間伐林分において発生したかかり木が残存立木間を通過する際の接触抵抗力. 日本森林学会誌 **92**(3) : 134-138
- (5) 松本武 (2012) 文部省科学研究費補助金研究成果報告書「林業労働死亡災害の一因であるかかり木の発生メカニズムと力学的特性の解明」
- (6) 松本武 (2017) 傾斜地のヒノキ林分における2立木樹冠に接触して発生したかかり木のけん引処理 -上方伐倒時の引き倒し処理に必要なけん引力の測定と処理方法の比較-. 森林利用学会誌 **32**(1) : 15-23



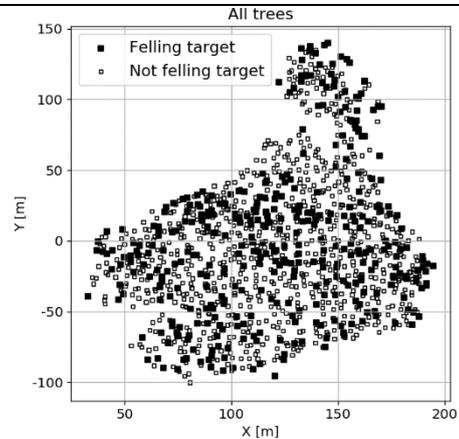
図一．接触判定に用いた樹体モデル

Fig.2 Tree model used for judge of touch among trees

表一．OWL で計測した対象林分の状況

Table 1 The data of target forest acquired by OWL

立木本数	面積	平均胸高直径	平均樹高	平均傾斜
1155 本	1.92 ha	44.1 cm	22.6 m	25.7 度



図一．全立木の xy 平面表示

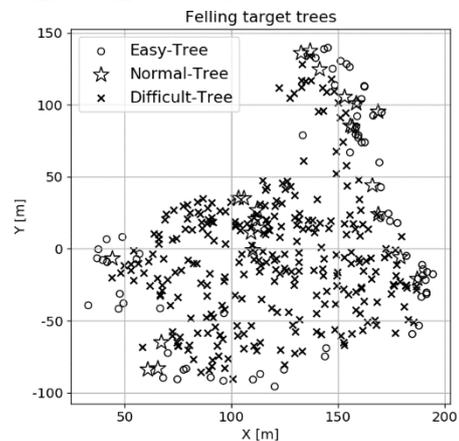
Fig.1 The plot of all trees in target forest

表二．伐採難易度による分類結果

Table 2 The result of categorization by Difficulty

	本数 (本)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
Easy-Tree	71	23.4 ± 10.1	13.8 ± 6.78
Normal-Tree	23	28.1 ± 7.51	17.1 ± 5.88
Difficult-Tree	291	33.7 ± 4.39	21.8 ± 4.01

各項目の値は平均値±標準偏差



図一．伐採対象木の分類結果のプロット

Fig.3 The plot of categorized trees

表三．伐採方向の範囲の結果

Table 3 The result of felling angle range

	ベースライン	最適化
Easy-Tree	54.0 ± 30.9	54.0 ± 30.9
Normal-Tree	16.5 ± 18.9	19.4 ± 20.4
Difficult-Tree	9.25 ± 11.2	9.27 ± 11.2

各項目の値は平均値±標準偏差であり、単位は(度)