

令和元年9月2日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18918

研究課題名(和文) 間伐材資源の有効活用を可能にするロボット加工機の応用試験

研究課題名(英文) Study on robotic fabrication for effective use of thinned timber

研究代表者

平沢 岳人(HIRASAWA, Gakuhito)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30268578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：間伐材のような小径で不整形な素材から建築部品を得るためには解くべき問題がある。この研究では、素材毎の事前の形状スキャンとそのデータベース化、3D CADからの適材の問い合わせ、ロボット加工機での無理のない加工のための素材把持装置の開発を行った。データベースには素材毎の三次元形状が保存されており、3D CADで設計したターゲット形状をから切り捨てる材料をできるだけ少なく効率的に取得できる素材の選択を可能にしている。加工においては、不整形な素材をロボットの姿勢に無理なく精密に加工するための把持機構を開発した。代表的なログハウスの納まりを数例実作し、これらのシステムの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

里山の荒廃などの林業の衰退により生じた環境の変化は、土砂崩れ等の自然災害や危険動物の居住区への浸入による獣害などの原因となっている。これらを未然に防ぐためには、林業の復興が最も効果的な対策である。本研究は、ロボットを応用した高機能な木工機械を応用することにより、間伐材のような価値の低い小径木から高品質な建築部品を生産可能にすることを目的とする。これにより、間伐材の市場価値を高めて林業者の間伐へのインセンティブを高め、結果的に、林業の復興に寄与する。

研究成果の概要(英文)：There is a problem that thinned woods are overly small diameter and un-uniform shape to saw up into lumbers as building elements. This research attempts to solve this problem by developing thinned woods processing system that consists of a thinned wood management database and robotic fabrication. In the database, thinned woods are managed as features based on photogrammetry. Appropriate materials are suggested when intended shapes are input into an inquiry function. In the robotic fabrication, a lathe-like work bench synchronously rotates the material with the robot's movement. Validation by building log walls shows that variational shapes of thinned woods can be processed efficiently.

研究分野：建築学

キーワード：間伐材 ロボットファブリケーション データベース 建築構法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

森林の健全な維持管理には間伐が不可欠だが、間伐材の価格低迷により十分に間伐がなされず里山の荒廃を招いている。間伐材を用いた高付加価値な製品を生み出せば、間伐材の価格も上昇し、林業において間伐へのインセンティブを創出できる。当研究室で開発・運用中の多軸腕型ロボットを用いた最先端の木工工作機械を用いれば、間伐材の有効活用により、高付加価値の木製建築製品を生産可能である。

2. 研究の目的

昨今では人工林の持つ水源かん養や土壌流出の防止などの機能が見直されており、間伐等特措法の施行など間伐による森林整備が推進されている。しかし、間伐材の市場価格に対して間伐にかかる費用が高いため、間伐されずに放置される人工林も多く存在している。間伐材の価格が低い理由は、材径が小さくかつばらつきが大きく、旧来の加工技術と装置では付加価値を高められる加工が難しいからと考えられる。自由度の大きい多軸の加工機ならば、刃物の柔軟な操作が実現でき多様な加工が可能である。当研究室ではこれまでその特性を活かした多品種少量生産の実現に精力的に取り組んできた。間伐材を多軸加工機の加工対象とするならば、製材とは異なり、材料の固定方法が課題となる。事前の計測により、効率的な材料把持の方法をロボットに教示する研究なども行われている。

間伐材のような不揃いな曲面に対し人による視認のみで固定方法を導出することは困難であるが、コンピュータビジョンにより、加工の為の事前調査に十分な精度での計測が可能である。現在利用可能な計測手法には、レーザースキャン、ステレオ測量、SfM(Structure from Motion)など複数あり、これらの処理を実装したハンディなツールは市販ソフトウェアなども見られるようになってきた。同時に、これらにより取得できる3Dデータを分析する手法についても様々な手法が確立されている。中にはオープンソースライブラリとして公に提供され自由に使用ができるものも存在している。

間伐材は、製材とは異なり形状が不揃いであり、今までの大量生産を前提とした生産システム・加工装置では、付加価値の高い活用は難しい。しかし、腕型ロボットを応用した拡張性の高い加工機やコンピュータビジョン技術、さらには、3D形状データの解析手法などを活用することで、個々に形状が異なっても、それぞれに適切な属性評価を簡便に行い、付加価値を高められる加工が可能になると考えられる。特に製材工程なしに間伐材の加工を行う事ができれば、加工に伴う欠損を最小にし、間伐材の断面をできるだけ大きく保ったままの部品化が可能となる。これにより、いままでは採算が合わなかったために顧みられなかった間伐材に対しても、新たな用途を提示し、間伐材の利用率の向上、更には間伐材の市場価値の向上に貢献できると考えられる。

3. 研究の方法

本研究は、豊富な加工バリエーションを実現する多軸加工機を応用し、間伐材を効率よく高付加価値な部品に加工することが目的である。具体的手法は、1) 間伐材個々の形状を取得しデータベース化することで大量のストックでも破綻しない統一的な手法を確立する、2) 3DCADから間伐材ストックデータベースに照会し、設計中の部品形状を得られる最適な候補を得られるようにする、3) 大量のストックから候補となった間伐材を正確かつ簡便にピックアップできるようにする、4) 間伐材を効率的に固定できる把持機構を制作し多軸加工機と連携させ、高付加価値な加工を実現する、からなる。これらのサブシステムを構築し、最終段階では全てを連携させての設計・加工試験を行う。ロボットで間伐材を対象に加工を行う研究では、Pawlofskyはロボットに装着したチェーンソーによる丸太の加工を報告しているが、3DCADとロボットの連携に主眼が置かれており、間伐材を有効利用という問題意識に取り組むものではない。またKaicongは3Dスキャンを用い間伐材で構成されるオブジェクトの制作を報告しているが、これは間伐材の形状を活かしたデザイン手法の提案を行うものである。間伐材の新たな活用方法と捉えることもできるが、本研究の目的とは異なるものである。

4. 研究成果

4.1 間伐材データベース

4.1.1 間伐材のピックアップとシステム

間伐材のストックをデータベースで管理するためには間伐材とその計測データの紐付けの維持が必要である。間伐材を目視により個体同定することは困難であるため、一般には木口に番号をふるといった手法がよく取られている。しかしながら、この手法はストックする材数が膨大になるほど効率が著しく損なわれ、また、ほぼ円柱形状の間伐材は回転しやすく、書き込んだ数字が天地逆になるなど、視認そのものが負担になりがちである。そこで、間伐材の木口に機械可読な二次元マーカを貼付し、対象となる間伐材をストックから瞬時に選択可能とする。目的の間伐材のIDを入力すると、赤い点によって位置が示される。これによりカメラ視野内における間伐材位置は示されるが、たとえば広いストックヤードで材の位置を特定するには、カメラ視野を作業者が把握していなければならないため、作業者の装備に何らかの装置が必要になる。これは効率的でないため、たとえば、ストックヤード内に設けたレーザーポインタにより材を指示すれば、作業者が専用の装置を必要としないで材のピックアップが可能になる。このような手法で膨大なストックとなっても、直感的かつ迅速に該当する間伐材の位置を特定できる。

4.1.2 間伐材の 3D 形状の取得

間伐材の形状データの取得には、SfM とマーカートラッキングを組み合わせた写真測量を用いた。間伐材毎に周囲から 20 枚程度写真撮影を行い、三次元復元を行うが、この際に木口に貼られたマーカをトラッキングし、ID の取得および、SfM のみでは不定となるスケールの調整、形状データの座標系をマーカ座標に変換する処理を行う。今回の実験では、用意した間伐材の本数は 100 本程度であったためこのような手法を採れたが、実用上は効率的な 3D 形状の取得手法が必要である。これには、後述する把持機構を応用した専用スキャナの開発が必要であると考えられる。

4.1.3 評価用の特徴量の取得

作成した 3D 形状データはそのままでは頂点座標と頂点連結リストからなるメッシュデータであり、間伐材の不整形さからメッシュデータも軽量とはいえない大きさとなる。3DCAD で設計中のターゲットと膨大なストックの個々の材を照合しての適合性判断は困難である。そこで間伐材の概形が概ね円柱形であることを活用し、間伐材の概形円柱の直径と長さで表す。直径は RANSAC(RANdom SAMple Consensus)を用いた円柱推定によって自動的に取得することが可能である。これにより取得した円柱の軸中心を間伐材の中心とみなす。このとき、軸中心のベクトルでみた時の最大長が軸長さとして得られる。また計測データは閉じたメッシュデータのため、間伐材の体積の計算が可能である。円柱推定、体積の計算はそれぞれオープンソースのライブラリである、PCL と CGAL を用いた。個々の間伐材の 3D 形状を得たら、これらの特徴量の計算を事前に行い、形状データと共にマーカの ID に紐づけしてデータベースに格納する。

4.1.4 設計ターゲットに最適な間伐材の選択

設計したターゲットが軸材である場合、間伐材の軸中心とターゲットの軸中心をあわせるとき、ターゲットの頂点座標の全てが間伐材の 4.1.3 で求めた概形円柱の内部に含まれれば切削可能にあると推定される。このとき、ある程度の幅を持って候補リストとし、候補リストの個々のメッシュデータとターゲットをもう一度比較評価し、切削可能な間伐材の最終候補を得る。メッシュデータとの比較評価は計算コストが非常に高いため、このような二段階の選択としている。二段目の評価では、切削の可否に併せて切り捨てられる部分の材積も得られるため、効率面での最適化も可能と考えられる。ただし、加工機の加工精度とも関係するため、効率面での最適化は今後の研究課題とする。

4.2 加工実験

加工実験では、六自由度を持つ腕型ロボットに刃物を装着した加工機を用いた。

4.2.1 把持台

間伐材の場合、形状が円柱に近い形状をしており、これを事前の製材加工なしでワークとするための特別な把持機構が必要になる。また、間伐材の 3D 形状の凹凸を把握しながら加工しないと、寸足らずの箇所ができる可能性も高く、間伐材の向きを制御する機構も必要である。これらの二つの要件を実現するためにオリジナルの間伐材用把持台を制作した。把持台では、間伐材の片端をチャックでつかみ、反対側を心押しで固定する構成となっている。チャックは、ステッピングモーターとプーリーで結合されており、指定した角度に回転させ位置を決めることができる。また心押し治具のベース台はリアガイド上にあり、一定の範囲内で長さの異なる間伐材を把持できる。回転機構により、間伐材側面全てに加工を行う場合に、ロボットがアプローチしやすいように加工面をロボット側に持って来ることができる。

4.2.2 CAM

当研究室のロボット加工機では、刃物の制御は設計したターゲットの形状から動的に得る。製材の場合、切り落とし加工のための刃物の切り込み深さは一定となる場合が多いが、間伐材の場合は断面の大きさが間伐材の成長軸方向に沿って変動するため、切り込み深さの計算が難しい。今回の実験では、間伐材の概形円柱の形を根拠に切り込み深さを設定した。断面が小さくなる箇所では切り込み深さが過剰になるが、ターゲットの残存すべき部位と干渉しない限りこの設定で問題は生じない。ターゲットが次節で示すようなものよりも複雑になれば、最適な切り込み深さの計算ロジックを CAM に追加する必要がある。こちらも今後の研究課題とした。

4.3 実例

4.3.1 正七角形断面の井楼組

以上開発したサブシステムを統合して間伐材の切削実験を行う。制作対象は正七角形断面を持つ井楼組 壁とする。4.1 の既往事例に示したように、五角形以上の断面の部材を丸太から直接得られれば、長方形断面への事前の製材加工を経るよりも大断面の部材を得ることができる。また、四角形を超える多角形断面は、意匠にもなり、付加価値を高められる可能性がある。ロボット加工機にとって多角形の頂点数の偶奇に関わらず加工難易度に違いはないが、人による加工を前提とした場合には頂点数が奇数となるものは難易度が高い。そこで、最初の実験では、正七角形断面を持つ井楼組の部材を切断することにした。実験でデータベースに登録した間伐材は全部で 90 本、直径が 112 ~ 180mm 程度、長さが 860mm~1360mm 程度である。このすべての間伐材の木口にマーカを貼り付けた。4.2 の通りデータベースに登録した。

次に 3DCAD から設計ターゲットに適した材の候補を問いあわせる。対象は正七角形断面の壁とし、断面は 110mm の円に内接する正七角形とした。使用する材は径が 55mm 以上、長さ 900mm 以上これをクエリとして切削に最適な間伐材を取得する。検索の結果は、細い材ほど上になるよう示されている。候補となった素材複数に対して第二段階の評価を適用し、これら

から必要な部材を切り出せることを確認した。決定した3本の間伐材は、4.1に示したピックアップシステムによって、ストックから簡易に抜きとることができた。次にCAMを用いて、七角形断面モデルを切削するパスの生成を行う。七角形断面の側面は七角形断面の側面の平面と丸鋸の表が同一平面にのっている状態で刃をなぞるようにして侵入、切断、退避を行う。七角形断面の端部については溝加工を行った。最終的には切り落とす部位であるが、ここを切り落とすとワークが暴れロボット加工機との接触事故になりかねないため、端部に切断位置を示す溝を切るに留めた。把持機構から脱着後、この溝を手がかりに手動で切り落とす。正七角形断面はそのままでは重ねられないため、底面を下段の形状に合わせた溝とし、積み上げることが可能にしている。

4.3.2 ピースエンピース構法の壁体

ピースエンピース構法の加工実験では断面形を正六角形とし、柱材の溝にはめ込むほぞ加工を端部に設けている。仕口の加工まで含めて実装しているため、CAMでのパス生成は4.3.1よりも手数が多いが、適用したシステム全体での手順は同様である。

4.4 まとめ

間伐材の写真測定から得た3Dデータを処理し、設計ターゲットに適切な間伐材を取得する在庫データベースおよび新たに制作した間伐材の把持機構によるロボット加工を示し、その有用性について制作を通し検証した。小径かつ形状が不揃いである間伐材が、本研究で提案するシステムにより事前の製材加工を経ず合理的に加工できたことから、間伐材の高付加価値に寄与する提案ができたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

古庄玄樹、中村優介、加戸啓太、平沢岳人、間伐材の属性データベースと高付加価値な加工の試行 間伐材の有効利用を可能にするロボット加工機の応用研究、日本建築学会技術報告集(登載決定、掲載号未定)

〔学会発表〕(計2件)

諸橋 俊大、古庄 玄樹、中村 優介、加戸 啓太、平沢 岳人、ロボットを用いた間伐材の高付加価値加工に関する研究 その1 在庫管理データベースとピックアップ支援システム、日本建築学会大会(北陸)2019.9

古庄 玄樹、中村 優介、諸橋 俊大、加戸 啓太、平沢 岳人、ロボットを用いた間伐材の高付加価値加工に関する研究 その2 間伐材加工のためのハードウェア設計と試作、日本建築学会大会(北陸)2019.9

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。