

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04227

研究課題名（和文）セルロースナノファイバーの積層造形に適する連続繊維配置設計法の構築と製作物の評価

研究課題名（英文）Construction of a continuous fiber placement design method suitable for additive manufacturing with cellulose nanofibers and evaluation of fabricated objects

研究代表者

館野 寿丈（Tateno, Toshitake）

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：30236559

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：生分解性を有するセルロースナノファイバー（Cellulose Nano-Fiber, CNF）材料を機械部品に実用するための製作方法として、連続繊維と樹脂との複合材料を積層造形する方法に着目し、この製作方法に適する連続繊維配置設計法を確立するとともに、製作システムを開発して製作物を評価した。連続繊維配置設計法の研究では、形状モデルをスライスする方法とコンピューショナルデザインを用いる方法それぞれでアルゴリズムを考案した。製作システムについては、ロボットアームを用いた多軸装置による曲面積層造形を実現した。さらに、CNF連続繊維とポリ乳酸による複合材料の開発およびこの材料を用いた製作も実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積層造形（Additive Manufacturing, AM）は従来の加工方法では実現できない形状での設計を可能にすることから革新的な製品やサービスのキーテクノロジーとして大きな期待がされている。その一つに軽量設計など少ない材料による設計を可能にすることがあり、環境負荷を減らす製品設計が期待されている。本研究では、生分解性材料を有し、高強度なCNF材料を用いたAMの技術開発を行った。これは従来にない程度に生分解性材料で高強度に自由な形状を実現するAM技術として学術的に意義あり、また環境負荷軽減の設計推進に寄与することから、社会的にも大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：For a manufacturing method to apply cellulose nano-fiber (Cellulose Nano-Fiber, CNF), which has a bio-degradable property, to mechanical parts, an additive manufacturing method with continuous fibers and plastics was focused on. The design method for placing the continuous fiber was established, and the fabrication method was developed with evaluation of fabricated objects. In the design method, two approaches for placement of continuous fibers were considered. One is to use slicing from shape models, and another is to use computational design. In the fabrication system, multi-axis device with robot arms was developed and it realized curved-surface deposition. Additionally, composite materials with CNF continuous fibers and poly-lactic acid were developed and the fabrication by the developed system with the developed materials was realized.

研究分野：設計工学、生産システム工学

キーワード：アディティブマニュファクチャリング 曲面積層 連続繊維 セルロースナノファイバー 生分解性 双腕ロボットアーム 造形パス

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

セルロースナノファイバー(Cellulose Nano-Fiber, CNF)は紙や木材をナノサイズにまで細かくした繊維であり、強度が高く軽量で、しかも自然に優しい素材であることから、次世代の材料として注目を集めている。そこで申請者は、CNF 材料を糸状の連続繊維にして積層造形する方法を考案し、製作に成功した。しかし強度が繊維の向きによって大きく異なるので、強度設計法の確立が急務である。本研究では、強度が得やすくなるよう、物体を包み込むように繊維を配置する曲面積層法を採用した上で、目的の強度に見合う繊維配置設計法を構築する。さらに、計画された配置方法に従って6軸ロボットで物体を製作し、実際に強度評価を行って設計法の有効性を検証する。

2. 研究の目的

CNF 材料を機械部品として実用的に利用するための製造方法として、連続繊維と樹脂との複合材料を積層造形する方法に着目し、この製造に適する繊維配置設計法の確立を目指す。CNF 連続繊維の配置と強度との関係は複雑で、強度を考慮した設計が困難である。しかも対象形状が曲面を含む立体では、積層造形すれば、一層の中で連続繊維を短く切断することになり、連続繊維の長所を活かせない。

そこで本研究では、CNF 連続繊維材料を積層造形する上での特長を活かす設計を課題とする。具体的には、連続繊維を切らずに表面を包み込むように積層する曲面積層法を採用し、この状態で要求強度に見合う繊維の位置と方向を容易に導出する設計法を構築する。さらに、連続繊維で包まれた立体形状を実際に製作して強度特性を実験的に評価し、提案した設計法と比較して有効性を検証する。

3. 研究の方法

研究内容は、熱溶解積層法(Fused Deposition Modeling, FDM)として知られる材料押出 (Material Extrusion, ME)によって、CNF を含む糸状の連続繊維と樹脂との複合材料を押し出して積層造形することを想定し、次の2点について研究する。(1) 3次元形状モデルに基づいて連続繊維を配置する位置と方向を適切に設計するアルゴリズムを作成すること。(2) 多軸の運動機構により曲面積層を行える装置によって実際に設計対象物を製作し、機械的特性の試験を通して、設計した繊維配置で期待される強度を持つかを評価すること。

(1) アルゴリズム作成において一般の積層造形と異なる点は、層が平面ではなく曲面形状であることと、強度を考慮して連続繊維を配置することである。この実現に必要なアルゴリズムとして、申請当初はスライスアルゴリズム、強度モデル変換アルゴリズム、造形パス生成アルゴリズムの3つを想定した。ここでは、まず対象立体を複数の三角形から構成される STL フォーマットデータで表現し、それぞれの面から物体の内部の方向に一定の厚みだけシフトした面をスライスして、各層を作成する。そして、その造形パス群に近い強度モデルから強度予測値を導出するという一連の流れを想定した。しかし、研究を進める中で、異なるアプローチが発想され、新たな展開が生じた。それは、コンピューショナルデザイン(Computational Design, CD)の利用である。CD は、コンピュータプログラムによって形状を生成する設計方法であり、人がコンピュータを使って形状を生成するコンピュータ援用設計(Computer-Aided Design, CAD)とは異なる。これにより処理の流れが変わり、従来の CAD を使って生成された形状をスライスし、強度を予測し、造形パスを導出するという流れではなく、コンピュータプログラムによって直接に形状生成、強度解析、造形パス生成をする流れとなる。CD を利用することで、スライスが不要となるほか、複雑な形状を扱うことが可能になる。

(2) 多軸の運動機構による曲面積層では、6軸の運動機構に材料押し出しユニットを設置し、CNF 連続繊維と樹脂との複合材料フィラメントを用いて曲面積層できる装置を製作する。既に申請者は3軸ロボットによる曲面積層に成功しており、これを6軸ロボットに置き換えて製作する。次に、上述の提案アルゴリズムによって作成された経路計画に従って対象物を造形する。最後に、対象物が要求強度を満たしているか機械的特性の試験を行うことで評価する。

4. 研究成果

(1) アルゴリズム開発においては、薄板を曲げて曲面のようにしたいいわゆるシェル構造を設計対象とする。申請当初の計画による成果として、スライスアルゴリズムと造形パス生成アルゴリズムの開発がある。シェル構造の下面の曲面を含む基礎となる形状を設定し、ベースモデルとする。ベースモデルをスライスすることで造形パスを生成していく。一般のスライスアルゴリズムでは高さ方向であるz軸に垂直な水平面をスライス面として用いるが、新たな方法として、x軸、y軸に垂直な面を用いる方法を開発した。そして、スライス面とベース形状との交点をつなぎ合わせることで、造形パスを作成するアルゴリズムを開発した[1][2]。

また、新たなアプローチとして採用した CD 利用によるアルゴリズムの研究も進められた。CD 利用によるアルゴリズムは、形状生成、造形パス生成、強度解析で構成される。形状生成においては、目的の3次元形状を一筆書きの線状物体の集まりで生成するアルゴリズムを開発した。まず、設計対象の曲面と同等の大きさを持つ平面を設定し、コンピュータプログラムによって平面上にある割合で埋める一筆書きによる線を生成する。その後、平面をシェル構造の下面の曲面に合うよう変換することで設計対象の形状を生成する[3]。この方法を用いて、オーゼティ

ック構造などの複雑な形状を含む曲面の生成を可能にした。次に、造形パス生成の方法としては、形状生成で作成された一筆書きの線をそのまま造形パスにするプロセスとして開発した。そして、強度解析の方法としては、一筆書きの線を市販の 3D-CAD に取り込み、この線を元にした 3 次元ソリッドモデルを生成し、これを解析するプロセスとして開発した。現在の多くの 3D-CAD には、有限要素法(Finite Element Method, FEM)による解析ソフトウェアが付帯されている現状を考慮すると、有用な方法と言える。

(2) 造形システムの開発としては、6 軸ロボットアームの先端にエクストルーダを設置して曲面積層することを可能にした[1][2]。さらにはロボットアームを 2 台用いて軸数をさらに増やし、一方のアームにベースモデル、もう一方にエクストルーダを装着しすることで、物体の表面を包み込むように積層する機能実現の試みも行った[4]。CNF 連続繊維の複合材料においては、連続繊維の製法を改良して、強度を大幅に向上させた細長の CNF シートを用いて、CNF 連続繊維とポリ乳酸 (Poly-Lactic Acid, PLA) とで複合フィラメントを製作し、通常のエクストルーダを使って造形することに成功した[5]。さらに、板状の製作物の引張試験を行ったところ、PLA 単材料よりも高強度を得ることが確認できた。

参考文献

- [1] 藁谷忠, 舘野寿丈, “垂直多関節ロボットを用いたアディティブマニュファクチャリングによる曲面積層に関する研究”, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会, pp.69-70, 2021.
- [2] Kosuke KUROKAWA, Tadashi WARAGAI, Toshitake TATENO, “Curved Surface Deposition in Additive Manufacturing for Cloth Products Using Composite Material with Continuous Fiber”, The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century (LEM21), pp.464-469, 2021.
- [3] Nasa ITOHARA, Toshitake TATENO, “Toolpath Generation Algorithm Using Route Model for Non planar Layering in Additive Manufacturing”, International Conference on Design and Concurrent Engineering 2023 & Manufacturing Systems Conference, Paper No.30, 2023.
- [4] Kosuke Kurokawa, Toshitake Tateno, “Effect of Nozzle Orientation on Accuracy of Formed Objects in FFF Process of Additive Manufacturing with Dual-Arm Robot”, Proc. Of the 9th Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2022), Paper No.OR-01-0098, 2022.
- [5] Toshitake TATENO, ”Environmentally Conscious Light-Weight Design and Fabrication with Continuous Cellulose Nanofiber String in Additive Manufacturing”, Proceedings of EcoDesign 2023 International Symposium, No.P3-2, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Jimbo Koki, Tateno Toshitake	4. 巻 74
2. 論文標題 Design optimization of infill pattern structure and continuous fiber path for CFRP-AM: Simultaneous optimization of topology and fiber arrangement for minimum material cost	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 447 ~ 459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.10.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 JIMBO Koki, TATENO Toshitake	4. 巻 87
2. 論文標題 FEM Simulation as an Element Based on Infill Pattern Structures Fabricated with CFRP-AM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 127 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.87.127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yaguchi Yuta, Takeuchi Kenji, Waragai Tadashi, Tateno Toshitake	4. 巻 14
2. 論文標題 Durability Evaluation of an Additive Manufactured Biodegradable Composite with Continuous Natural Fiber in Various Conditions Reproducing Usage Environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 959 ~ 965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2020.p0959	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Toshitake TATENO
2. 発表標題 Environmentally Conscious Light-Weight Design and Fabrication with Continuous Cellulose Nanofiber String in Additive Manufacturing
3. 学会等名 EcoDesign 2023 International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nasa ITOHARA, Toshitake TATENO
2. 発表標題 Toolpath Generation Algorithm Using Route Model for Non planar Layering in Additive Manufacturing
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2023 & Manufacturing Systems Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西田敦哉, 田中友基, 館野寿丈
2. 発表標題 CNFシート及び撚糸の引張試験とその評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kosuke Kurokawa, Toshitake Tateno
2. 発表標題 Effect of Nozzle Orientation on Accuracy of Formed Objects in FFF Process of Additive Manufacturing with Dual-Arm Robot
3. 学会等名 The 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 糸原奈冴, 館野寿丈
2. 発表標題 FFF-AMにより製作された非平面積層セル構造の機械的特性
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倉林大空, 館野寿丈
2. 発表標題 鎖を用いたクラッチジョイント機構の特性評価
3. 学会等名 日本設計工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野雅大, 館野寿丈
2. 発表標題 円弧ばねを用いた擬人化ハンドの一体成形に関する研究
3. 学会等名 日本設計工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 館野寿丈, 須藤翔, 日置蓮
2. 発表標題 金属ワイヤと形状記憶高分子とのコンポジットを含む複数材料AMによるメカトロニックデバイスの一体製作
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川洸介, 館野寿丈
2. 発表標題 双腕ロボットによるアディティブマニファクチャリングのための造形パスと初期位置姿勢探索
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kosuke KUROKAWA, Tadashi WARAGAI, Toshitake TATENO
2. 発表標題 Curved Surface Deposition in Additive Manufacturing for Cloth Products Using Composite Material with Continuous Fiber
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koki JIMBO, Toshitake TATENO
2. 発表標題 Graph-based Optimization of Continuous Extrusion Path in FRP-AM for Compliant Mechanism Fabrication
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki YAMAHASHI, Toshitake TATENO
2. 発表標題 Design for Motion Range of Joint Braces Using Geometric Patterns and Fabrication by AM
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering (iDECON&MS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山橋悠希, 館野寿丈
2. 発表標題 幾何学模様を利用した関節装具の運動拘束機構設計
3. 学会等名 日本設計工学会春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木智也, 館野寿丈
2. 発表標題 超音波振動援用金属粉末押し出し型AMにおける材料の温度が造形精度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本謙伸, 館野寿丈
2. 発表標題 金属ワイヤと樹脂の複合材料AMによる筐体とセンサの一体製作に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki JIMBO, Toshitake TATENO
2. 発表標題 Design Optimization of infill pattern structure and continuous fiber path for CFRP-AM
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藁谷忠, 館野寿丈
2. 発表標題 垂直多関節ロボットを用いたアディティブマニファクチャリングによる曲面積層に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

明治大学工学部機械情報工学科 設計工学研究室
<http://www.isc.meiji.ac.jp/~taten/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------