

Graftin' Craftin': 接ぎ木と針金かけを用いた樹木の生長過程での形状制御による収穫可能な動的機構の生成手法

Graftin' Craftin': A Fabrication Technique inspired by Plant Grafting and Wiring for Production of Harvestable Automata

千葉 一磨¹, 橋田 朋子¹

Kazuma CHIBA¹, Tomoko HASHIDA¹

¹ 早稲田大学大学院

¹ Waseda University

【要約】

接ぎ木は複数の植物体を繋ぎ合わせる育種改良法であるが、近年、この園芸手法を接合技術と捉え、樹木を育てながら家具などを制作する取り組みがある。しかし、それらの接ぎ木による立体造形の対象が静的な構造物に限られていた。そこで、本研究では自然物を素材として用い、電力を必要としない動的機構を生成することで本来の意味での持続可能な開発が実現されると考え、針金かけにより若枝を折り曲げて形状保存させ、接ぎ木で所望の箇所を接合してリンク機構を制作し、樹木の切断後に動作する受動歩行機を制作した。その後、歩行機を動作させ、リンク機構の接ぎ木の成功と、歩行機が15度の傾斜を0.5m前進できることを確認した。

キーワード: 持続可能性, 接ぎ木, 針金かけ, からくり, 受動歩行機

【Abstract】

Plant grafting is a horticultural technique which combines two or more branches into a single tree. In general, this is used for breeding improvement, however, there are attempts to fabricate furniture such as a chair using grafting as a joining technology. Conventionally, grafting enabled constructing static artifacts, on the other hand, fabricating a dynamic machinery or automata through grafting is attempted in this research. Therefore, our approach aims to realize building a passive dynamic walking automaton through bending branches with wires and grafting to manipulate trees' shape. As the result, the plant-based passive walker was able to descend a slope with 15 degree of inclination.

Keywords: Sustainability, grafting, wiring, karakuri, passive walker

1. 序論

SDGsにより、持続可能な開発が社会に求められている今、ものづくりにおいても持続可能なファブリケーション技術や持続可能な機構の重要性が高まっている。筆者らは自然による持続可能なファブリケーション技術として植物の接ぎ木や針金かけに注目している。接ぎ木とは植物が切断された形成層の組織を修復する機能を活用して、複数の個体を繋ぎ合わせる品種改良法である。また、針金かけは針金を用いて人為的に植物体を折り曲げて生長方向を操作する手法である。最近では接ぎ木を接合技術として扱い、樹木を育てながら家具や建築を制作する試みもなされている[1][2]。このように接ぎ木といった園芸手法が自然の持続可能なファブリケーション技術である可能性が示されてはいるが、その立体造形のアウトプットは静的な構造物に限られているため、動的機構の生成が今後望まれる。

動的機構とは一般的に動力として電力を別途必要とするものが多い。しかし古くからあるからくりは電力を必要とせずに駆動するため、持続可能な機構として再び注目を集めている。たとえば製造業においてシステムの自動化や維持コスト削減のため、作業員の自重など

を動力源とするからくりを活用する事例がある[3]またPVCパイプでできた巨大な機構を、風を動力として動かすテオヤンセンによる人工生命体『ストランドビースト』[4]のように、アート分野でも自然と共生する作品としてからくりを用いるものがある。しかし、いずれのからくりもその素材はアルミやプラスチックといった人工物に限られていた。

筆者らは持続可能な開発の究極な形とは、自然のファブリケーション技術を用いて、自然物を素材とした電力を必要としない動的機構を生成することであると考える。そこで、本研究ではその一歩として、接ぎ木を接合技術として扱い、針金かけによる形状制御を行いながら樹木を素材とするからくりの制作を目指し、からくり、特に受動歩行機の実現を試みる。受動歩行機は位置エネルギーのみを動力源とし、センサシステムやアクチュエータを必要とせずに緩斜面を下る歩行機械を指す。一般的に接ぎ木の成功率は高くないとされているため、必要な機構数を最小限に抑えたミニマムな機構として本研究では受動歩行機を対象とした。本稿では、提案手法の詳細とリンク機構および受動歩行機の精度評価について述べる。

2. Graftin' Craftin'

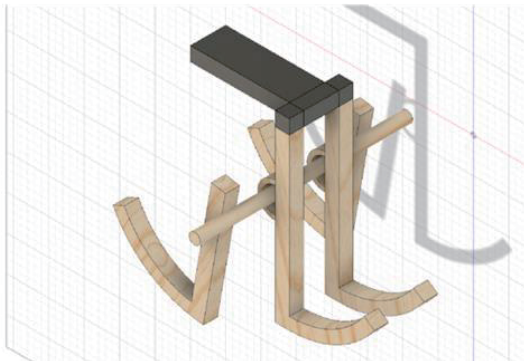
Graftin' Craftin'は接ぎ木と針金かけを用いた樹木の生長過程での形状制御によってからくり、特に受動歩行機を生成する手法である。受動歩行機は斜面に配置されると自重により振り子の原理に基づいて振動することで、地面に接する支持脚と空中に浮いた遊脚とを切り替える。同時に、両脚が節となるリンク機構が腰部に設けられており、それぞれの脚が地面から離れた際に脚の開閉を行う。このように、脚の振りと切り替えが融合した周期運動を繰り返して斜面を降る[5]。受動歩行機には様々なモデルがあるが、今回のような形状が一様でない植物を材料とするためには、歩行機が安定して自立するよう前後に2足1組の脚を持ち合計4点でバランスを保つモデルが最適と考えられる。以上を踏まえ、図1に提案する受動歩行機のイメージを示す。

受動歩行機の生成のために接ぎ木と針金かけで実現すべき要件は下記である。

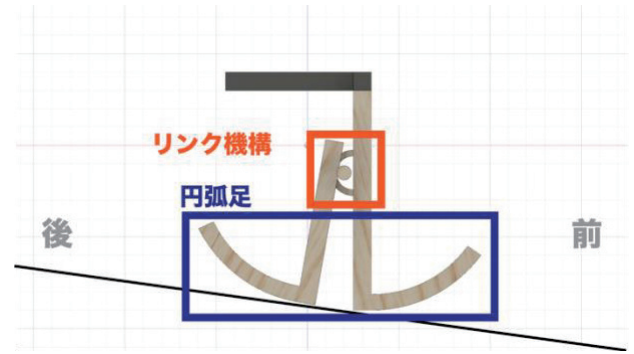
1. 接ぎ木:前後の脚部が節となるリンク機構を歩行機の腰部に設ける
2. 針金かけ:歩行機の前脚それぞれに2本1組の円弧足を作る

受動歩行機の脚が前後に開閉を行いながら前進するには腰部にリンク機構が不可欠である。リンク機構とは複数の節と共通するジョイントによって構成され、ジョイント部分は軸穴に中心軸が通っていることで回転の対偶を持つ。そこで、接ぎ木で作成した輪をジョイント軸穴とし、その中に別の幹を中心軸として通すことでリンク機構を実現する。さらに、受動歩行機の円弧状の足として若枝が生長する間で円弧状に針金かけをし、硬化するまで放置することで形状保存を試みる。なお、受動歩行を実現するうえで重要である歩行機の重心の安定は不規則な形状を持つ樹木のみでは対応できないと判断し、図1の黒色部分に示す通り、歩行機作成後に前脚上部に対して重りを固定し、重心位置を最適化する。

- 植物の接ぎ木・誘引で制作する部分
- 人工物を実装後に加えて補う部分



(a) 俯瞰図



(b) 矢上面図

図1 接ぎ木と針金かけによる受動歩行機のイメージ図:

(a) 俯瞰図, (b) 矢上面図

3. 実装

3.1 接ぎ木に用いた植物と用具

本研究では、一般的に接ぎ木の成功率が高く耐寒性や耐暑性等の環境による生長への影響が少ないとされる柑橘類の中からレモン属4本とカラタチ属1本の苗木を用いた。歩行機の部品制作のための接ぎ木は枝が休眠している4月上旬に実施した。接ぎ木の際、枝の形成層どうしの活着を促進させるために活着剤『カルスメイト』を植物の切断面に塗布し、乾燥を防ぐために接ぎ木用フィルム『ニューメダール』を接ぎ木部分に巻き付けた。また、接ぎ木が活着するまでには1ヶ月を要するとされているため5月上旬まで放置した後に剪定した。

3.2 接ぎ木を用いたリンク機構制作

歩行機の後脚はリンク機構におけるジョイントの中心軸と垂直に固定される必要がある。そこで、図2のように、ジョイント中心軸の役割を持つカラタチ苗木の幹をレモン苗木2本の幹に対して垂直になるように傾け、レモン幹とカラタチ幹の交点となる箇所の樹皮を剥離し互いの形成層を十字に重ね合わせて接ぎ木を行った。次に、前脚の役割を持つレモン2本の幹にジョイント軸穴の作成が求められる。そこで、図3に示す通り、2本の幹から既に発生している若枝を同じ幹の上部の側面に対して自己接ぎ木を行い、輪を形成した。

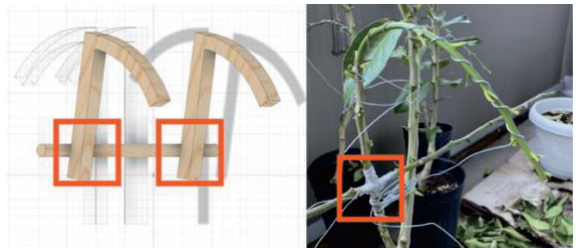


図2 ジョイント中心軸と歩行機後脚との固定のためのレモン幹2本とカラタチ幹との接ぎ木

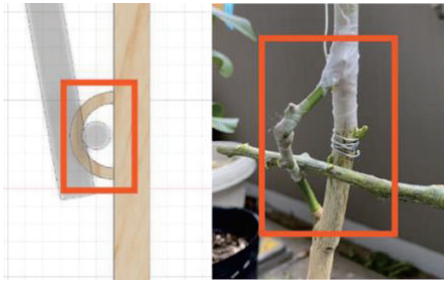


図 3 レモン幹に対する若枝の接ぎ木によるジョイント軸穴

3.3 円弧足のための若枝の針金かけによる形状制御

歩行機が前後の脚部に持つ 4 本の足は円弧状である必要がある。そのため、図 4 に示すようにレモンの苗木からすでに発生している若枝に対してワイヤーを取り付け、円弧状に折り曲げて針金かけを行った。このとき、樹木は負の重力屈性により地面と反対方向に枝が伸びているため、生長過程の間では歩行機の部品が上下逆さになった状態で針金かけをする。その後、接ぎ木の活着を待ち、それぞれの幹から歩行機を切り離してから樹木を乾燥させて針金かけによる円弧形状を保存させた。接ぎ木の活着が見込まれる 1 ヶ月後、レモンとカラタチの幹をそれぞれ切断し、乾燥させて針金かけによる円弧足を形状保存した。

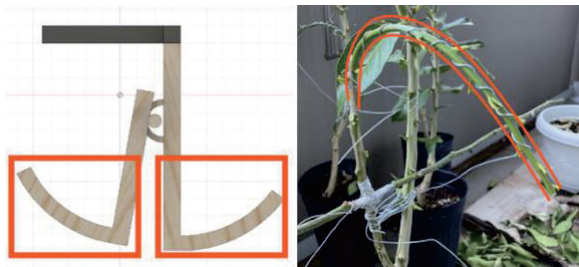


図 4 円弧足作成のためのレモン若枝の針金かけ

4. 動作確認

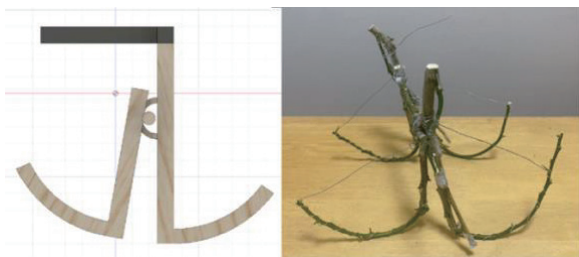


図 5 樹木から切断して組み立てた受動歩行機

接ぎ木と針金かけを行ってから 1 ヶ月後、前脚 2 本に接ぎ木を行って制作したジョイント軸穴に対して後脚と接ぎ木されたジョイント中心軸を組み合わせて、図 5 に示す受動歩行機を完成させ、動作確認を行なった。

4.1 接ぎ木部分の活着の有無

受動歩行機制作のために実施した接ぎ木部分の活着有無の判定を行なった。はじめに、図 6 に示す通り、

腰関節のリンク機構におけるジョイント軸穴のための接ぎ木による輪は活着に成功した。レモンの幹に入れた切り込みに若枝を挟み込むことで十分に互いの形成層どうしが密着したためである。これにより、輪の中に中心軸となる植物を通せばジョイントが作成できることが示された。次に、図 7 の通り、歩行機の後脚のレモンの幹 2 本とジョイント中心軸のカラタチ 1 本による接ぎ木は活着剤の効力で接合はしているものの活着力が弱かった。これはレモンとカラタチそれぞれの形成層を露出させた側面どうしを重ね合わせただけでは強い密着が実現できなかったためと考える。そこで接ぎ木テープを巻いたまま固定し、歩行機として用いることにした。



図 6 ジョイント軸穴としての接ぎ木による輪

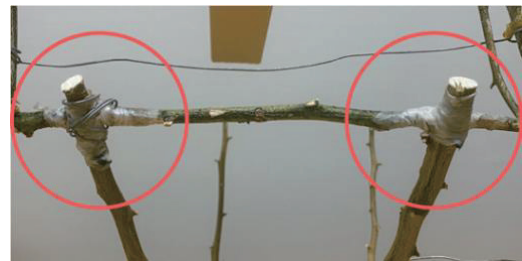


図 7 ジョイント中心軸と後脚との接ぎ木部分

4.2 接ぎ木によるリンク機構の精度評価

受動歩行機の腰関節の役割を果たすリンク機構の回転角度の可動範囲を樹木の切断後に確認した。その結果、接ぎ木によるジョイント軸穴が破損することなく、中心軸は自在に角度を変化させられた。ただし、軸穴は楕円形であり、中心軸となる幹の直径よりも長いいため、回転誤差(ガタ)が生じてしまう問題が発生し、受動歩行を実現させるためにはゴムによる固定でガタを軽減させた。また、植物体特有の凹凸形状がリンクの回転の際に摩擦を引き起こすものの受動歩行機における脚の開閉へは影響しなかった。

4.3 受動歩行機に関する基礎実験および応用実験

4.3.1 基礎実験: 遊脚と歩行機全体の固有角振動数

受動歩行は物体の振動と密接な関わりを持つため、接ぎ木による歩行機の振動特性を理解するための基礎実験を行った。受動歩行は遊脚の振動と歩行機全体の振動が共振した際の実現できるものと仮定し、それぞれの固有角振動数を求めた。

はじめに、遊脚の固有角振動数を求めるため、それぞれの遊脚を自由振動させたところ、空気抵抗など

の影響は受けるものの 5 周期の振動が得られた。一方で、平地に置いた歩行機全体の自由振動を試みたが、植物体特有の反りや凹凸などによりそれぞれの脚の形状が不規則なため 2 周期しか振動が得られなかった。このことから斜面上に配置した際も受動歩行の現象が起きずに静止してしまう可能性が示唆される。

それぞれの周期より固有角振動数を導出した結果、表 1 の通り、後脚の固有角振動数の方が前脚よりも高い結果になった。この結果は、前脚の着地より後脚が引きずられて閉脚するまでの速度が速いことを示しており、受動歩行を阻害するものではない。しかし、前脚と歩行機全体の固有角振動数の差は 5.67 rad/s と 2 倍近くあった。この差が受動歩行を行ううえで無視できる大きさか否か歩行実験を通じて確かめる。

表 1 植物の歩行機遊脚と全体の固有角振動数

	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	固有角振動数 (rad/s)
遊脚(前)	1.10	0.91	5.69
遊脚(後)	0.67	1.49	9.34
歩行機全体	0.55	1.81	11.36

4.3.2 応用実験: 歩行の各種データの計測

図 8 の通り、段ボールを用いて 15 度の傾斜角を持つ斜面を設置し、その上に受動歩行機を配置した。しかし、植物の枝でできた円弧足の表面は滑りやすく、歩行機を斜面上に配置しても脚の開閉を行わないまま滑ってしまう。そこで、受動歩行機全体の振動が安定して行われるように、足底にゴム製の滑り止めを加えた。この状態で歩行機は斜面を下るようになったため、歩行時間と 1 秒あたりの歩数、歩行距離を計測した。なお、傾斜角が 15 度より大きい場合には歩行機は転倒し、小さい場合は歩行せずに静止してしまうため、歩行実験における傾斜角は 15 度で統一した。以下、その結果と実験値より導出した歩行周期と歩行角振動数の平均値を表 2 に示す。

表 2 の通り、植物による受動歩行機は 15 度の傾斜を 0.5m 前進することができた。しかし、段ボールと歩行機足底の滑り止めによる摩擦などによって 0.5m 地点で静止した。加えて、歩行角振動数値は 57.12 rad/s と極めて高かった。樹木の不規則な形状によって歩行機の各 부품の重さが一様でないことから重心位置が異なる点が挙げられる。

表 2 植物の受動歩行機の歩行実験データ

歩行時間 (s)	距離 (m)	1秒あたりの 歩数 (歩/s)	歩行周期 (s)	歩行角振動数 (rad/s)
23.96	0.50	9	0.11	57.12



図 8 植物の受動歩行機の歩行実験の様子

5. 結論

本研究では持続可能な開発の一種として、自然のファブリケーション技術を用いて、自然物を素材とした電力を必要としない動的機構を生成することを目指し、園芸手法である接ぎ木を接合技術として解釈し、針金かけによる樹木の生長過程での形状制御を通じて動的機構の生成を試みた。特に、機構学において最も基本的かつ汎用性のあるリンク機構を植物の接ぎ木によって実現することができれば、自然物を素材としたからくりの成形加工技術としての可能性を見出せると考え、1 つのリンク機構で成り立つ受動歩行機の制作に取り組んだ。

具体的には、リンク機構のジョイントを作成するために、レモンの接ぎ木で形成した輪に軸穴の役割を持たせ、その間に中心軸としてカラタチの幹を通した。その結果、すべての植物体を切断した後に節の回転角度は自在に制御できることを確認し、前後の脚の開閉が可能であることを示した。次に、受動歩行機の円弧足は、レモンの若枝をワイヤーで針金かけをすることで乾燥後に円弧の形状を保つことができた。以上の工程を通じて生成した受動歩行機を用いて歩行実験を実施し、その結果、15 度の斜面を下ったものの樹木の不規則な形状により推進に必要な重心位置の決定には課題が残った。

今後の展望として、リンク機構の精度を高めるために接ぎ木と針金かけを行ううえで回転誤差を軽減させる工夫が求められる。また、受動歩行機以外のからくりを実現させるために、リンク機構のみならずギアやカムなど他の機械要素を接ぎ木と針金かけでの成形を目指す。

参考文献

1. Full Grown: The Gatti Chair, <https://fullgrown.co.uk>, 参照: 2020-07-30.
2. VisionDivision: The Patient Garden, <https://www.dezeen.com/2011/10/25/the-patient-gardener-by-visiondivision/>, 参照: 2020-07-30.
3. SUS America: Karakuri Automation, <https://www.susamericainc.com/featured/video/>
4. Theo Jansen: Strandbeest, <https://www.strandbeest.com/explains>, 参照: 2020-07-30.
5. 衣笠哲也, 大須賀公一, 土師貴史: 受動歩行ロボットのすすめ -重力だけで2足歩行するロボットのつくりかた-, コロナ社, 2016.