

3次元曲線状のシングルロッドを辿る自走式ロボットによるin-Situ軽量構造の形態提案

Design of in-Situ Lightweight Structure with Autonomous Robot Traveling on 3-Dimensional Curved Rod

学籍番号

47-166811

氏名

白石 恵美(Shiraishi,Emi)

指導教員

岡部明子教授

1. 研究の背景と目的

現在多くの建築は職人の手によって作られており、職人の伝統技術によって精度の高い建築が出来上がる一方、施工現場では職人不足によるコストの上昇や高所作業による事故が問題視されている。そこでロボットによる施工が1つの解決策として考えられる。現状、人の行為を置き換える単一作業の施工ロボットが主流であり、ロボットが施工する形態から建築デザイン、構造解析を提案することは少ない。そこでロボットにより施工可能な形態の構法、デザインから最終施工段階を包括した構法プロセスの提案がロボット施工でしか実現できない新しい建築表現が期待でき、プロセスを一元的に管理できるため余分な労力を削減できる有効な手法であると考えられる。そこで本研究はロボット施工による構法プロセス提案を基礎研究として形態の生成方法、シミュレーション手法の構築とロボットの開発と実施設計への応用を行う。

2. 軽量構造の形態

本論ではロボットの足場と構造体が一体となっている構法を扱う。ロボットの足場は施工性の簡易さよりそれ自体は軽微なものである。引張材を持ったロボットが足場の上を走りながら引張材を張っていき、その引張材が補強材となり一体化した構造体を完成させる構法を提案する(fig. 1)。ロボットが角度を持つ2部材間を曲がって走行することと部材交差す

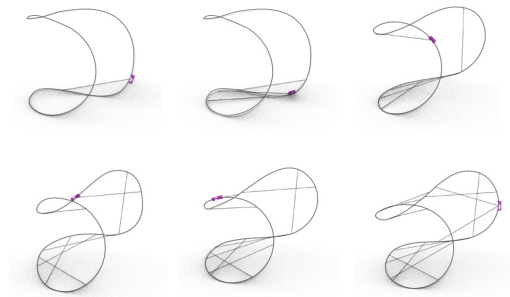
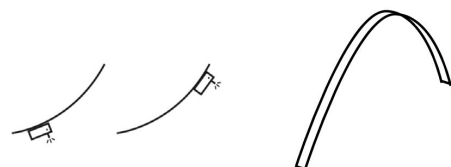


fig. 1: ロボットがワイヤーを張るたび変形するロッドの形状

る部分を横断することが難しいという問題があった。ロボットの走行を単純化するため開発をより現実的なものに近づけるため足場の形状を3次元曲線状のシングルロッドに限定する(fig. 2)。以上よりロボットの足場となるロッド部分の形状はBending-activeからデザイン展開を行う。Bending-activeは一般的にはもともと直線あるいは平面形状をした素材を弾性範囲で曲げることで曲線あるいは曲面を生成する手法を指すが本論ではあらかじめ曲線状に成型した素材をさらにしならせていく場

Locomotion of Robot

Shape of Rod



Curve

Bending active

fig. 2: ロボットの動きとロボットの足場となるロッドの形状

合も含める。ロッドの復元力とワイヤーの張力がバランスすることでロボットがワイヤーを張っていくたびにロッドは形状を変化しながら最終形状へと安定していく。そのためワイヤーを張る位置と張力を変化させることで初期形状のロ

ッドから多様な形態が生成可能となる。

素材 ロッド部分はBending-activeを利用するため弾性率および強度/弾性率の比が大きいFRP引抜成形ロッドを用いる。ワイヤー部分は引張強度の高いカーボンファイバーを用いる。カーボンファイバーは軽量の素材であり、ロボットに負担が少なく構造の軽量化にも利点があると言える。

構造的優位点 提案する形態はBending-Activeと引張材のプレテンションを用いた構造である。この構造の利点として2つの点が挙げられる(i)張力が働いている点への荷重による変位が少ない(ii)曲げ部材の座屈を防ぐ。荷重が張力を超えるまではロッドの復元力がワイヤーの張力と荷重の合力と釣り合いの状態を保つので変形にほぼ影響せず、張力以上の荷重を作用するとワイヤーが緩み変形が生じる。

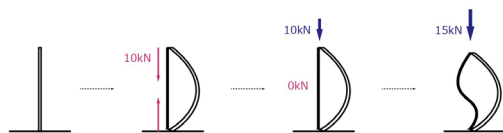


fig. 3: 圧縮力に対するプレテンションの効果

3. 形態シュミレーションシステムの構築

形態を生成する上で2つのアプローチを提案する。いずれも物理シミュレーションソフトウェアのKangarooと構造解析ソフトウェアのK2 Engineeringを用いる。

- FFFT(Form Finding and Final Tension)システム

- (i)Bending-Activeの性質を持つロッドとワイヤーの結びつく位置と張力の違いによって様々な形態を提案する。

- (ii)ワイヤーの最終張力を確認する。

- TCSO(Tension Calibration and Structural Optimization)システム

遺伝的アルゴリズムを用いた最適化ツールの

Wallaceiを併用して荷重に対する構造最適化ツールを構築する。

- (i)ワイヤーの初期張力を試算する。

- (ii)指定した荷重に対して変形の小さい形状を最適とし提案する。

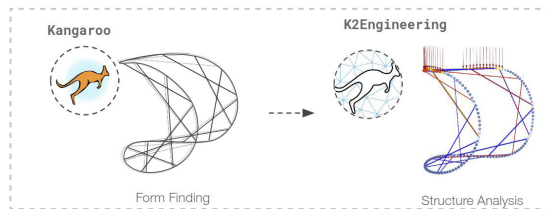


fig. 4: FormFinding and Final Tension(FFFT)

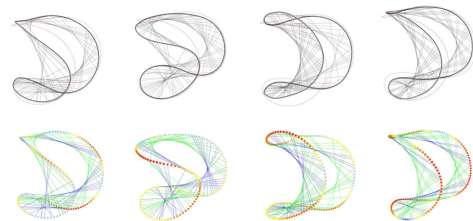


fig. 5: 密度や規則性によって異なる張力材の張り方と解析結果

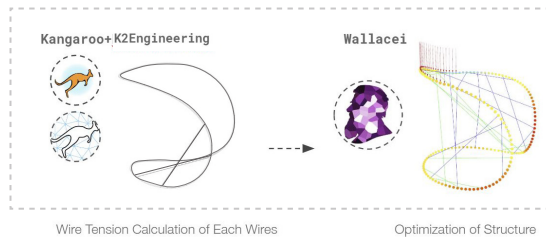


fig. 6: Tension Calibration and Structural Optimization(TCSO)

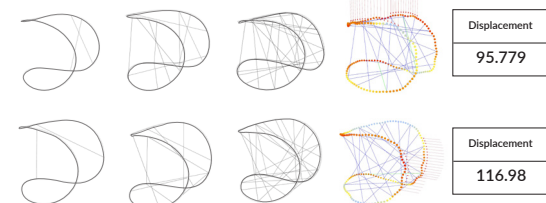


fig. 7: 荷重によって異なる最適化形状(上図:上からの荷重、下図:横からの荷重)

形態モデルスタディ モデル模型を作成しシュミレーション結果との比較を行う。

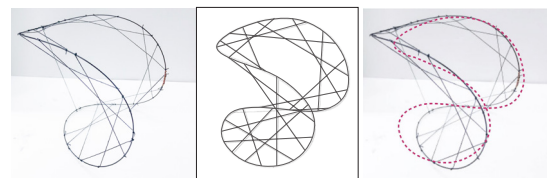


fig. 8: シュミレーション結果とモデル模型の比較

おおよその変形はシュミレーションと同じ挙動をしたが引張力のバランスによって上下の反り具合の誤差が見られた。

4. 自走式ロボット

ロボットの可動部は、ロッド上を走行する走行部分とワイヤーを張っていくワインディング部分の2種類ある(fig. 9)。シミュレーション結果より指定された点間を走行しワインディングを行う必要があるため、回転方向、回転数が制御可能であり、摩擦力やワイヤーの引張力などの外力に抵抗できるトルク数を持つギアードモーターを使用する。

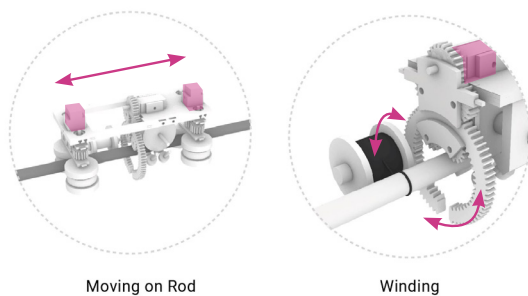


fig. 9: ロボットの可動部

走行部分 タイヤとモーターを接続し、ロボットを前後進させる。2つのタイヤにつき1つのモーターを使用し、タイヤで10mmのロッド上を横から挟み込むように設置する。タイヤの形状は円形のロッドにフィットさせるため真ん中が凹んだ形状をしている。

ワインディング部分 ワインディング部分は引張材を取り付けたボビンを足場となるロッド部分に巻き付け、その後もう1つのモーター

で張力を調整する機構である。円形のギアの回転に連動してボビンも回転しワイヤーを張り、次の点に移動する。これを繰り返し、張力材を張っていく。

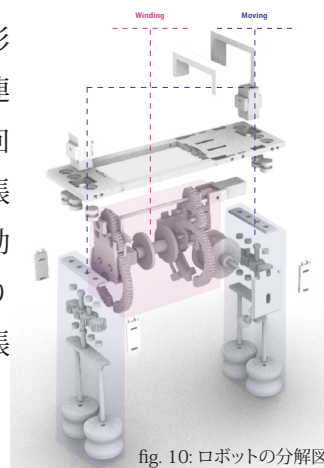


fig. 10: ロボットの分解図

ロボットコントロール 3章で形成したモデルを用いて張力材の張り方からロボットの動きを計算する。ロボットをコントロールする機器としてマイクロコントローラであるarduinoを使用する。これによりデジタルの情報とロボットを紐付けることが出来る。張力材の張り方を(i)ロボットが動く方向と距離(ii)ワインディングの際に作用させる張力に分解し(fig. 12)、数値としてgrasshopper 上のコンポーネントである firefly を介しロボットへ動作の信号を送信する。

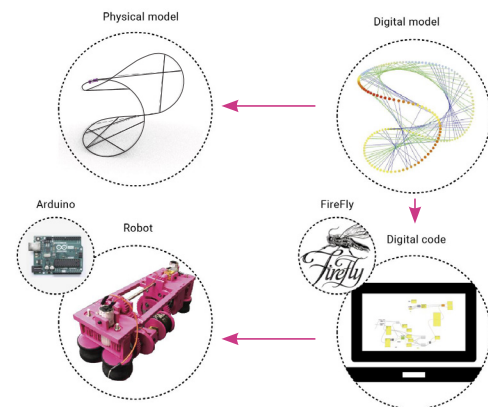


fig. 11: ロボットコントロールシステムの概念図



fig. 12: モーターの挙動

5. in-Situシステム

通常構造物を建設する際、詳細な設計図が必要である。本研究では設計から施工までの一貫したプロセスをよりスムーズにするため、設計図無しで現場で施工が可能な仕組み(以下in-Situシステムと呼ぶ)を構築する。本システムは目標形状をウェブカメラを用いて現場に映し出しその映像に沿ってロッドを曲げていく**Guidance System(GS)**とその誤差を吸収する

Error Absorption System(EAS)と2つに分けられる。この2つのシステムを組み合わせることで現場での施工をより容易に行うことが可能なin-Situシステムを構築する。

Guiding System(GS)について 現場でロッドの形状をできるだけ忠実に施工するため施工補助機能としてARを用いたGSを構築する。施工者は現場でARを見ることが出来るARグラスやウェブカメラなどのデバイスを用いて現場に映し出された目標形状を参照にしながら形を調整していく。

Error Absorption System(EAS)について 人間が施工を行うと理想形状との間には誤差が発生する。その誤差を吸収するためにEASを提案する。スキャニング機器を用いて施工後のロッドの形状をgrasshopperに取り込む。そこで3章で構築した**TCSOシステム**を用い最適なケーブルの位置を再度計算し、誤差のあるロッドの形状に対して構造全体として同じ荷重に対する変位を持ったケーブルの張り方へと変更し、その結果を最新の目標形状に設定し直す。

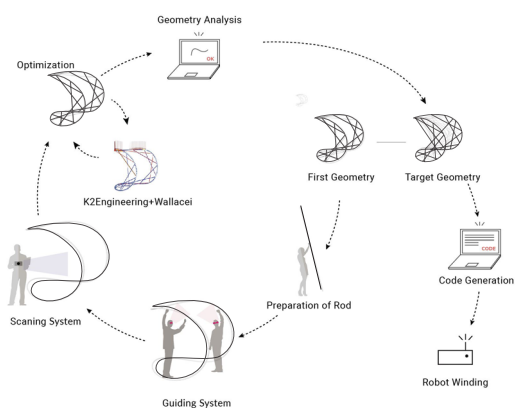


fig. 13: in-Situシステムの概念図

6. 形態デザインの可能性

シンプルな曲線状の形態を用い本システムの提案を行ったが、将来的には複雑な曲線状のデザインの発展を行う。

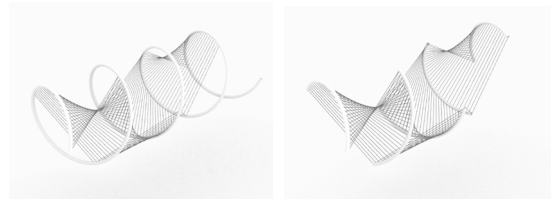


fig. 14: シングルロッドをワインディング後に一部切り取った不連続な

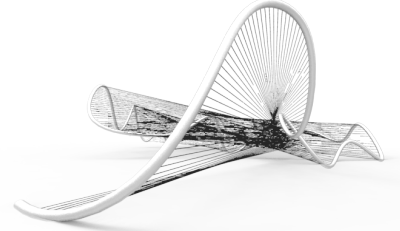


fig. 15: 違った曲率を持つシングルロッドの連続体

7. 総括

本研究ではロボットを用いたデザインから施工までの一貫したプロセスを提案し、ロボットの開発を含むシステムを実装した。Bending-Activeとプレテンションを用いた構造の優位性を生かした形態提案を行い、形態シミュレーションシステムの開発ではその形態を指定した荷重に対して変形が最小となるよう最適化システムを構築した。ロボット開発では施工現場ではほぼ自動的にロボットが自走するよう開発を行った。そのためデザインの情報をロボットへ数値として入力し施工を行うシステムの構築を提案した。in-Situ システムの構築ではロッドの形状誤差を再計算し、指定した荷重における変位が同等である形態を再提案することで余分な労力を削減した。現段階では適用が小型に限られており、より大規模な建築への適用をなされるためにはロボットのさらなる安定性出力の向上により、張力材に導入可能な張力を向上させる必要がある。

主要参考文献

- [1] Thomas Bock and Thomas Linner, Construction Robots Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots, 2016
- [2] Julian Lienhard, Bending-Active Structures-Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein, 2014