

# 吐糸・営繭行動を模倣したロボットに関する研究

橋本稔<sup>1</sup>・三浦幹彦<sup>2</sup>・森川英明<sup>2</sup>・河村隆<sup>3</sup>・劔持潔<sup>3</sup>・中沢賢<sup>3</sup>

信州大学 繊維学部 <sup>1</sup>感性工学科, <sup>2</sup>繊維システム工学科, <sup>3</sup>機能機械学科

蚕の吐糸・営繭行動は、シルクという優れた天然繊維を創り出す過程というだけでなく、繊維による構造物構築という観点からも興味あるプロセスである。特に繊維状の素材を吐糸しながら「一筆書き」によってドームや平面などフレキシブルな構造物を構築する機構は、ロボット工学の面からも興味深い。これまで蚕の営繭行動に関しては、確率統計的な観点から解析を行っており、幾つかの知見を得ている。本研究ではこれらの研究成果をもとに、蚕の吐糸行動のモデル化、行動パターンを模倣したロボットの機構設計、最適な運動計画・制御方法、フレキシブルな構造部材の探索などの検討を進め、蚕の行動を模倣したロボットの開発を進めている。

## 1. 蚕の営繭行動における行動メカニズムの解明

### (1) 蚕ロボットのシミュレーション

蚕が昆虫であることより、蚕は反射的行動により繭を作っていると考えられる。この仮説を確認するために蚕ロボットのシミュレーションを行った。蚕ロボットのシミュレーションでは、3次元で球形の空間を作成するのは難しいので、2次元で円形の空間を作成する。シミュレーションは以下のルールで行った。

- ①閉鎖された空間の中に蚕ロボットを設置する
- ②吐糸口が壁や糸にぶつかった点を直線に結ぶように蚕ロボットが糸を吐く
- ③蚕ロボットは壁や糸に動きを拘束される

### (2) 蚕ロボットのモデル

蚕ロボットは4体節からなり、体節内に直動関節と体節間に回転関節を持つ。また頭の先端に吐糸口を持ち以下の点に接触センサを持つ(Fig. 1)。

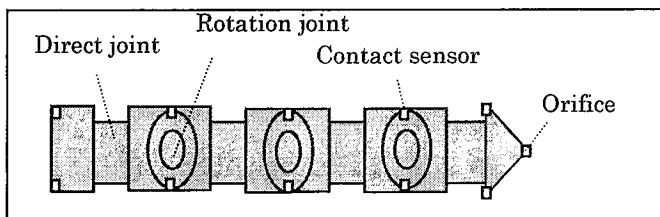


Fig. 1 Model of silkworm robot

### (3) 蚕ロボットの行動モデル

蚕ロボットの反射行動は、簡単な反射のモデル

であるオートマトンで定義し、接触センサの入力により状態変化と出力を行う。オートマトンの状態の数を100とし、入力12種類、および出力83種類とする。またオートマトンの最適化には遺伝的アルゴリズムを用いた。

### (4) 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムでは、状態遷移表の各行を連結した一次元配列を遺伝子とし、ランダムに生成された初期集団(10体)に対し遺伝的操作を行う。遺伝的操作は、選択、交叉、突然変異を用いている。また、オートマトンの得点は、シミュレーションを5000step行ったときの $\Sigma((\text{糸の長さ})^2)$ を用いている。

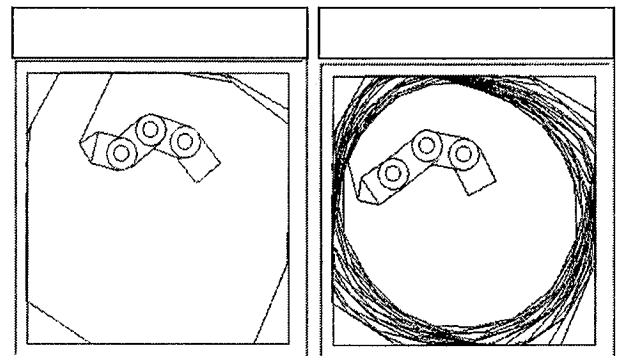


Fig. 2 シミュレーション結果

### (5) 結果

シミュレーションの結果、5000stepで正方形の4つの角を削るものが出現した。このオートマトンで50000stepシミュレーションを実行したところ、蚕ロボットは円形に近い空間を作成した(Fig. 2)。このことより、反射的行動により繭を作成することが可能であると考えられる。

## 2. アーム型ロボットによる吐糸機構の開発

現在ロボット工学の分野では生物の知能や身体、遺伝的なアルゴリズムなどに着目した研究に注目が集まっている。蚕は変化する繭の形状に柔軟に対応し、口部で繭の強度を感知し糸張りを行っており、これは構造物の構築法という観点から見ると、FRPのような「型への押流し方法」

や、構造部材を成形しておいてからモノを組み立てる「組立て方式」による構築法とは違い、新しい構造物の創成法と考えられる。そこで複合材料を用いた構造部材の検討、および力覚センサを用いた壁面追従型の動作制御方法について検討を行った。

### (1) 平面状の構造物創成

蚕の繭作りを模倣して構造物を作るために、構造材料としてコミングルヤン（ガラス繊維を熱可塑性樹脂で覆った複合材料）を選定し、それを押し付けるための成形機を製作した。また蚕体の動きを模倣するためのコンピュータは産業用ロボット【MOTOMAN SV3X】を使用した。これより平面状の構造物を作成することができた (Fig. 3)。

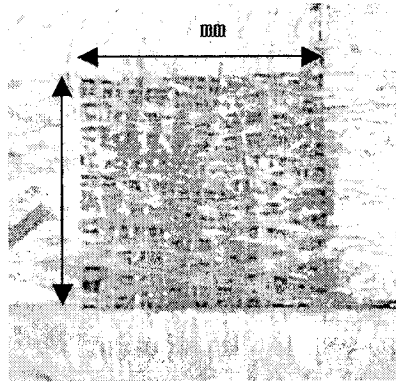


Fig. 3 平面状の構造物

### (2) 壁面追従ロボットの開発

蚕の吐糸口部の機能、つまり先端部で力の大きさと向きを認識する機能を模倣し、壁面に追従できるロボットの開発を行った。ロボットは(1)で使用したものを、先端に取り付けるセンサ部はひずみゲージにより検出できる構造を考え製作した。実験概要はロボットが曲面上に一定速度で移動しながら押付け力  $F_z$  を一定に保持させる実験である。ここで押付け力を保持するために、出力電圧  $E_z$  が目標とする出力電圧  $E_a$  となるようロボットの位置補正制御を行なった。また先端部が曲面に対して垂直に追従するために、ロボットに補正回転を行なわせた。実験の様子を Fig. 4 に  $E_a=0.3(V)$  のときの結果を Fig. 5 に示す。これより曲面追従と押付け力保持のためのロボットの位置補正制御を正確に行なえることが確認できた。

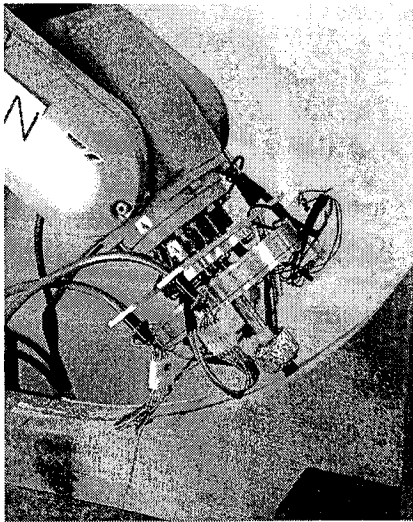


Fig. 4 曲面追従の様子

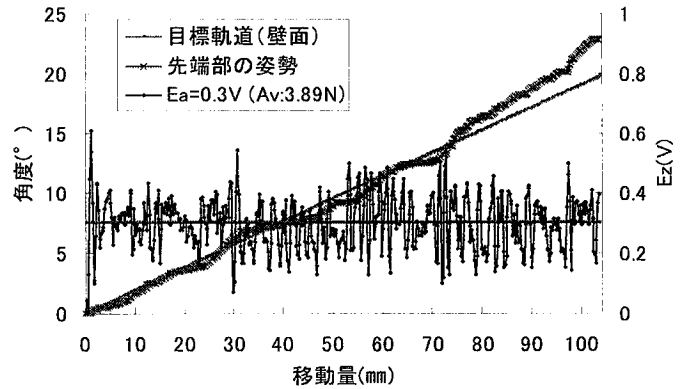


Fig. 5  $E_a=0.3(V)$  のときの  $E_z$ , 先端部の姿勢

### 3. 営繭時における吐糸パターンの解析

蚕体後半部を固定して吐糸する際の「8の字」運動について検討するために、蚕の各体節背面にマーキングした13点のうち、第1~7点目と第13点目の計8点について、0.2秒毎の位置データを採取した。約6時間分のデータから、蚕体後半部を固定して前半部を振りながら吐糸行動を行っている部分計52箇所を抽出し、吐糸パターンについて解析を行った。Fig. 6には振り角の中心となる第7体節を基準に吐糸口の位置をプロットした。この振り角度および振り上げ高さの時系列データから自己相関係数を求めた結果、10~20sec程度の周期的な動きを繰り返していることがわかった。

また高さ方向の軌跡を求めた結果、その動作は大きく3つのパターンに分類できた。最も頻度が高かったのは、山型のきれいな吐糸軌跡を描くパターンであった。この他に吐糸口を空中で何度か旋回させ、繭糸を体内から引き出しているような動作もいくつか観察できた。(Fig. 7)

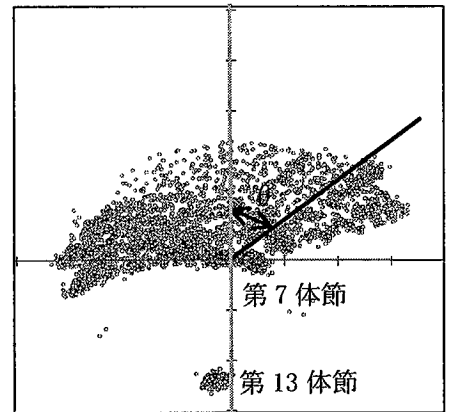


Fig. 6 吐糸口の分布

得られた典型的な吐糸パターンをモデル化し、アームロボットの動作機構への応用を検討している。

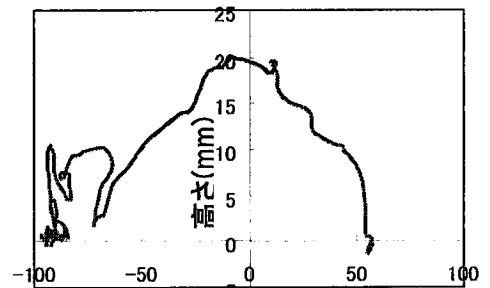


Fig. 7 吐糸軌跡 (高さ方向)