神経振動子の外生刺激を利用した三叉ヘビロボットの移動方向制御

Direction control of the trident snake robot using external stimulation to neural oscillators

○学 興津 信秀 (大阪大) 正 石川 将人 (大阪大)
正 杉本 靖博 (大阪大) 正 大須賀 公一 (大阪大)

Nobuhide OKITSU, Osaka University, okitsu@dsc.mech.eng.osaka-u.ac.jp
Masato ISHIKAWA, Osaka University
Yasuhiro SUGIMOTO, Osaka University
Koichi OSUKA, Osaka University

This paper is concerned with feedback control of the trident snake robot, which is an example of wheeled mobile robot described as a nonholonomic kinematic equation with three control inputs and six state variables. Based on the authors' previous work on controlling nonholonomic system by using neural oscillators with strong entrainment property, we propose to apply artificial disturbance (stimulation) to the neural oscillators to generate translational locomotion in the pre-specified desired direction. We also design a feedback control scheme by assigning the disturbance as a function of current direction error to the desired one.

Key Words: mobile robot, trident snake, nonlinear control, neural oscillator

1 緒言

三叉ヘビロボットとは、著者らが非ホロノミックシステムの制御理論をもとに提案した移動ロボットであり、平面上のベースリンクの周囲に従来のヘビ型ロボットを三叉上に連結することで構成されている。このロボットのモデルは対称アフィンシステムと呼ばれる非ホロノミック系の一種であり、その中でもいわゆるChained形式で表現できない、複数のジェネレータを有する比較的制御の難しいクラスの問題として知られている。著者らは先行研究において、非ホロノミック系の可制御性構造特性を反映させた神経振動子ネットワークを構成し制御系に組み込むことで非ホロノミック系を制御するアプローチを提案し、車両系や球体転がりモデルなどを用いて基礎的な検討を行ってきた [2]。三叉ヘビロボットの運動生成についてもこの手法の適用を試みた [3] が、ネットワークの結合係数と基本運動パターンの関係を見出すに留まっていた。そこで本稿では、これまで陽には利用していなかった神経振動子の外乱入力ポートに着目し、与えられた目標移動方向から外乱入力を求める方法と、これを用いて現在の進行方向との偏差を補正する状態フィードバック制御を行うことを提案する。

2 準備

2.1 三叉ヘビロボットの基本モデル

本章では、三叉ヘビロボットのモデルを考え、運動学モデルを簡単にまとめる。ロボットは Fig. 1 に示すようにベースリンクの各頂点に駆動関節を介して足リンクが 1 本ずつ取り付けられ、足リンクにはそれぞれ受動車輪が取り付けられている。ベースリンク中心から各頂点までの距離を 1、各関節から車輪までの距離を 1 とする。頂点の一つ選んでベースの正面とし、対応する足をリンク 2 とし、そこから反時計回りにリンク 3、時計回りにリンク 1 と設定する。次にロボットの状態を表す変数を定義する。ベースの中心位置を (x, y) , x 軸に対するベースの姿勢角を θ とし、まとめたものを配置ベクトル $\mathbf{w} = [x, y, \theta]^T$ とする。また、リンク i のベースリンクに対する相対角度を ϕ_i とし、まとめたものを形状ベクトル $\phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3]^T$ とする。これらの設定による運動学モデルから状態方程式を導出する。状態変数を $\xi = [\phi, \omega]^T$, 入力を $\mathbf{u} = \dot{\phi}$ とおくと、ロボットの運動学モデルの状態方程式は、

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 \\ R_\theta A(\phi)^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (1)$$

Fig.1 Model of the trident snake [1]

と表される。(詳細は文献 [1] 参照)。この式 (1) は非線形制御において可制御であることが先行研究において知られている。

2.2 神経振動子

本節では神経振動子ネットワークについて説明する。神経振動子は神経素子と呼ばれる、一定の入力を加え続けると振動子の状態量が減衰していく性質を持つ素子を相互に抑制するように対に結合することによって構成されている。

本研究では、神経振動子として広く用いられている松岡モデル [4] を用いる。松岡の神経振動子モデルは以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= -z_i - \sum_{j \neq i}^N a_{ji} y_j - \beta_i f_i + v_i \\ \dot{f}_i &= -f_i + y_i \\ y_i &= \max(\alpha_i, z_i) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $i \in \mathcal{N}$, $\mathcal{N} := \{1, \dots, N\}$ はそれぞれの神経素子の番号を表す指数であり、 z_i, f_i はその状態量を表す変数である。 β_i は疲労係数、 f_i は状態 z_i の内部状態を表す変数、 v_i は外部入力、 a_{ji} は z_j から z_i への抑制性結合の重みを表す変数、 α_i は閾値である。

3 外生刺激を利用した移動方向制御

3.1 外乱入力への応答設計

本節では神経振動子の入力を外部からの刺激とみなし、それに反応して運動を行わせる制御について考える。本研究で考える

条件について Fig. 2 に示す。本稿では、三叉ヘビロボットの各関節に神経素子が搭載されており、それらが相互に結合されているものとする。さらに、三叉ヘビロボットのベースリンクの中央にはセンサが取り付けられているとする。本研究で考えるモデルは、知覚した外乱入力から逃げるように推進する というものである。ここで先ほどの式 (2) における v_i をセンサからのフィードバック入力として考える。今回はシミュレーションで再現するので、外乱入力として入力を直接与える。ここで、各種パラメータは $\beta_i = 70$, $\alpha_i = -0.1$, $a_{ji} = 2$ とする。

外乱入力の与え方を以下に示す。各神経素子はボディの中心からどの方向を向いているかというベクトルの情報を認識しているとする。そこに外乱としてあるベクトルがボディの中心に与えられ、そのベクトルを各素子が知覚し、自身の持っているベクトルとの内積を取る。すなわち式で表すと次式のようになる。

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos(-\frac{2}{3}\pi) & \sin(-\frac{2}{3}\pi) \\ \cos 0 & \sin 0 \\ \cos \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{2}{3}\pi \end{bmatrix} \mathbf{r} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{r}$ は外乱入力を表す 2 次元のベクトルであり、

$$(r_1, r_2) = (\cos \chi, \sin \chi)$$

である。このような入力を与えることにより、外乱から逃げる方向に進む制御ができるのではないかと考え、シミュレーションを行った。

Fig.2 Problem setting

先ほどの外乱ベクトル $\mathbf{r}$ における角度 χ を $-\pi$ から π まで $\frac{\pi}{12}$ ずつずらして与えた。シミュレーション条件としては 40 秒間動かし際の方向を見るものとする。

Fig.3 Desired direction vs actual direction w/o feedback

シミュレーションの結果を Fig. 3 に示す。横軸が外乱として与えたベクトルの角度であり、縦軸が実際に向かった方向ベクトルの角度である。Fig. 3 から、外乱から逃げる方向へ進む時もあるものの、その方向から外れてしまう場合も見られ、最大で約 $0.34[\text{rad}]$ ほどずれる角度も存在した。その主たる原因として挙げられるのが、回転運動である。初めの数秒間は目標の方向に近い方向に進んでいるように見えるものの、時間が経つにつれて運動の回転成分が顕著に見られるようになり、目標方向からどんどん逸れていく旋回運動になっていくことが確認された。これを防止するために、次節で状態フィードバック制御について考える。

3.2 状態フィードバック制御

本節では神経振動子を搭載した三叉ヘビロボットに状態フィードバック制御を施すことを考える。フィードバックの際の計算方

法は以下のとおりである。ロボットの挙動から速度を観測し、それからホロノミーの原理によって実質的に動いている方向を算出する。その単位方向ベクトルと目標の単位方向ベクトル $\mathbf{r}$ の差をとることにより、新たに動いて欲しい単位方向ベクトル $\mathbf{r}'$ を算出する。そのベクトル $\mathbf{r}'$ を神経振動子の入力にフィードバックすることによって回転運動成分を抑止でき、直進できるのではないかと考える。フィードバックをかけた状態で前節と同様に角度 χ を $-\pi$ から π まで $\frac{\pi}{12}$ ずつずらして与えたときのシミュレーションの結果を Fig. 4 に示す。先ほどに比べほとんどの角度において進行方向が目標方向に近くなっていることが確認できる。Fig. 5 に $\chi = -\frac{5}{12}\pi$ のときの進行角度の時間変化を示す。進行角度の算出は時刻 $10[\text{s}]$ から開始しており、Fig. 5 よりフィードバックをかけた場合より $-\frac{5}{12}\pi$ に近い値へ収束していることがわかる。これらの結果から、神経振動子を用いた状態フィードバック制御が有用であることが確認できた。

Fig.4 Desired direction vs actual direction with feedback

Fig.5 time change of direction

4 結言

本研究では三叉ヘビロボットの入力生成に神経振動子を用いた分散型制御を提案し、外部刺激として方向ベクトルを与えるとその方向へ進行する制御手法による状態フィードバック制御を実現した。今後の予定としては、フィードバック制御の改良や実験を検討している。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム (FIRST 合原最先端数理モデルプロジェクト) により、日本学術振興会を通して助成された。

References

- [1] 石川将人, “三叉ヘビ型ロボットの推進原理と周期入力による制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 5, pp. 520–528, 2006
- [2] K. Kishimoto, M. Ishikawa, Y. Sugimoto, K. Osuka, “Feedback control for nonholonomic systems using neural oscillator network”, Nonlinear Theory and Applications, Vol. 4, No. 4, pp. 365–374, 2013.
- [3] 興津信秀, 石川将人, 大須賀公一, “三叉ヘビロボットの分散型制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿, 2013
- [4] K. Matsuoka, “Sustained oscillations generated by mutually inhibiting with adaptation”, Biological Cybernetics, Vol. 52, pp. 367–376, 1985