動力学の干渉を利用した移動マニピュレータの波状路走行

Mobile Manipulator travel waved road using dynamical interference

○ 非 玉村 篤士 (福井大), 正 見浪 護 (福井大)
正 朝倉 俊行 (福井大)

Atsushi TAMAMURA, Fukui University, Bunkyo 3-9-1, Japan
Mamoru MINAMI, Fukui University, Bunkyo 3-9-1, Japan
Toshiyuki ASAKURA, Fukui University, Bunkyo 3-9-1, Japan

Key Words: Mobile Manipulator, Motion Intelligence, Fourier Series, Genetic Algorithm, Waved Road

1 緒言

現在各種作業現場で稼働しているロボットのほとんどは、移動型と固定型に分ける事が出来る。そして移動型においてその移動は、移動する事を目的とした駆動部（車輪、キャタピラ等）のみを利用する事が前提となっている。又、作業部より生ずる各部分への動力学の干渉を、作業を行う上での正確さを妨げるものとして排除するよう努められている。しかし、人間は両腕の振りを走ったり、跳んだりする時に有効に利用する事ができる。このような動力学の干渉を利用する事は、ロボットの総合的な運動能力を向上する事が出来る可能性があると考えられる。そこで、我々はこれまでに移動用動力装置を持たない移動マニピュレータモデルを対象とし、水平路面において車載リンクの運動による動力学の干渉を利用した移動マニピュレータの走行を実現してきた¹⁾²⁾。そしてこの時走行を実現する車載リンクの運動パターンを機械自身に探索させる事で、運動知能を獲得する方法とした。本報では、移動用動力装置を持たない移動マニピュレータモデルを対象とし、これまでに提案した運動知能を獲得する方法を利用して、波状路面において移動を可能とする車載リンクの運動パターンの獲得を目的とする。

2 運動知能の定義

本報では、機械に運動知能を与える手法を提案している。ここで、提案している運動知能の定義とその獲得に関する仮定を行う。人は走るときに腕の振りを利用してより速く走ることができる。これは腕の動きによる動力学の干渉を、速く走ることを利用して考えると考えられる。本来、速く走るといふ目的は、両足を動かすことで実現される。しかし直接には作用しない両腕の振りを速く走るといふ目的に対して利用できることを人間は知っている。このときの腕の振り方は誰かに直接指導されたわけではなく自分自身の成長過程において意識・無意識に関わらず学習していく。この学習には次の3つの条件が考えられる。1. 運動目的、2. 身体的特徴、3. 環境、である。運動目的とは運動を行う目的であり、例えば速く走ること、長距離を走ること等である。速く走ると要求されれば速く走ろうとし、長距離を走ると要求されれば疲れにくい走り方を学んでいく。この時体は成長に伴い足の長さや腕の長さ、筋力や体重などが変化する。ケガなどをしていればその部分を庇うこともある。人間はこの変化する体を用いて目的を達成する動き方を学習する。このとき腕の長さや足の長さなどの個人固有の内部条件を身体的特徴とする。そして、走っているときの路面状況や天候、障害物等が運動を行う外部の環境とする。これらの“運動目的”、“身体的特徴”、“環境”を用い本報では運動知能を次のように考える。およそ全ての動物や人間は、その生れ落ちた環境と自分の身体的特徴のもとで、運動目的に沿った合理的な運動パターンを学習し、獲得していく能力を備えている。このような運動パターンの学習システムを生物の運動知能と考える。

3 モデリング

Fig.1に、シミュレーションのためにモデル化する波状路面を走行する1リンク移動マニピュレータの実機を示す。この1リンク移動マニピュレータは、移動用に駆動部を持たず、また停止用のブレーキも持たない。1リンク移動マニピュレータの移動は、車載リンクの振幅運動による干渉にのみ誘発される。シミュレーションを行うために、Fig.1に示す実機の各パラメータをFig.2のように規定する。そして、波状路面を走行する1リンク移動マニピュレータの運動方程式を式(1)に示す³⁾⁴⁾。

Fig. 1: Mobile Manipulator

Fig. 2: Model

$$M\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} + \mathbf{D} \\ = \tau_M + \mathbf{U}_t \mathbf{f}_t + \mathbf{U}_n \mathbf{R}^{-1} \left[-\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{p}} \right) \dot{\mathbf{p}} \right. \\ \left. + \frac{\partial C}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{M}^{-1} \{ \mathbf{h} + \mathbf{g} + \mathbf{D} - \tau_M - \mathbf{U}_t \mathbf{f}_t \} \right] \quad (1)$$

ここで、波状路面を走行する1リンク移動マニピュレータの一般化座標ベクトルを $\mathbf{p} = [x, z, \alpha, \theta_1]^T$ とする。 x, z は台車部の重心座標、 α は台車部の傾き、 θ_1 は車載リンクの傾きを表す。式(1)において、入力トルクは $\tau_M = [0, 0, 0, \tau_1]^T$ で表され、 $\mathbf{M}(\mathbf{p})$ は慣性力、 $\mathbf{h}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ は遠心力・コリオリ力、 $\mathbf{g}(\mathbf{p})$ は重力をそれぞれ表す。摩擦力を表す $\mathbf{D}(\dot{\mathbf{p}}) = [d_x, d_z, 0, d_1]^T$ の各要素は式(2)、式(4)、式(5)より近似的に表している⁵⁾。又、式(2)、式(5)における μ_v, μ_1 は粘性摩擦係数を表し、式(2)における m は1リンク移動マニピュレータの質量を表す。

$$d_v = \mu_v v + \mu_{sc} N \text{sign}(v) \quad (2)$$

$$N = mg \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$\mu_{sc} = \begin{cases} \mu_c + \mu_s \exp(-a |v - b|) & |v| \geq b \\ \mu_c + \mu_s & |v| < b \end{cases} \quad (4)$$

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}, d_x = d_v \cos(\alpha), d_z = d_v \sin(\alpha), d_1 = \mu_1 \dot{\theta} \quad (5)$$

4 目標軌道の探索方法

車載リンクの目標軌道である $\theta_{1d}(t)$ は、式 (6) に示すようにフーリエ級数を利用して作成される。つまり、車載リンクの目標軌道は周期関数となる。ここで、式 (6) において T は周期、 $a_0/2$ は関数の平均値を表し、 $a_n, b_n (n = 1 \sim \infty)$ はフーリエ係数を表す。

$$\theta_{1d}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right\} \quad (6)$$

フーリエ級数のパラメータである $T, a_0, a_1, b_1, \dots, a_m, b_m$ を固体の遺伝子情報とし、GAによって組み合わせと最適値を探索させる。第 j 世代の第 i 固体の遺伝子を式 (7) に示す。

$$g_j^i = [T_j^i, a_{0j}^i, a_{1j}^i, b_{1j}^i, \dots, a_{mj}^i, b_{mj}^i] \quad (7)$$

遺伝子を持つ固体を GA により進化させるには各個体を評価する基準が必要である。今回の運動目的は、1リンク移動マニピュレータが、波状路面上の凹部から運動を開始し、決められた方向に、1つ以上の凸部を乗り越えていく事である。各個体の評価値は、固体の遺伝子情報より作成された目標軌道から、式 (8) に示す PD 制御により車載リンクへの入力トルクを計算し、ある一定時間1リンク移動マニピュレータを運動させた結果より計算する。この評価値を計算する評価関数を式 (9) に示す。

$$\tau_1 = d_p(\theta_{1d} - \theta_d) + d_d(\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_d) \quad (8)$$

ここで、式 (9) において、 H は評価値を計算する運動シミュレーションを行う時間を示し、 $x_j^i(t)$ は式 (1) での計算結果である。運動の開始位置は常に波状路面の凹部となっているため、式 (9) の f_j^i がより大きな値をとる事は、1リンク移動マニピュレータが運動開始位置からより離れた場所により長時間いる事を意味する。

$$f_j^i = \int_0^H x_j^i(t) dt \quad (9)$$

5 シミュレーション

5.1 探索シミュレーション

1リンク移動マニピュレータを運動させる波状路面として、 $z = 0.1(1.0 - \cos(4x))$ を用意し、GAにより波状路面上の凸部を乗り越えて移動していく事を実現させる車載リンクの目標軌道を探索させた。GAの各個体において、1リンク移動マニピュレータの運動開始位置は $[x, z] = [0.0, 0.0]$ とする。つまり、波状路面上の凹部から運動が開始される事を意味する。GAのパラメータは、個体数： $p = 10$ 、2点交差率： $c(\%) = 50$ 、淘汰率： $s(\%) = 60$ 、突然変異率： $m(\%) = 30$ と設定した。又、今回使用するフーリエ係数は第1項までとし、各パラメータを6bitsで表現した。この事を式 (10) に示す。

$$g_j^i = \underbrace{\overbrace{101011}^{T_j^i}}_{6\text{bits}} \underbrace{\overbrace{010010}^{a_{0j}^i}}_{6\text{bits}} \underbrace{\overbrace{101110}^{a_{1j}^i}}_{6\text{bits}} \underbrace{\overbrace{010101}^{b_{1j}^i}}_{6\text{bits}} \quad (10)$$

探索シミュレーションの終了条件を、"1リンク移動マニピュレータが、運動開始位置から10以上の凸部を乗り越えた位置に、運動終了時到達していれば終了"と設定し探索させた。

5.2 運動シミュレーション

探索シミュレーションより得られた結果、つまりフーリエ級数のパラメータを利用した1リンク移動マニピュレータの運動を Fig.3 - Fig.6 に示す。探索シミュレーションより得られたフーリエ級数のパラメータは、 $T = 1.695$, $a_0 = -0.533$, $a_1 = -0.00667$, $b_1 = 2.84$ である。Fig.3 は時間経過と台車重心置の x 座標値の関係を、Fig.4 は時間経過と台車重心置の z 座標値の関係を示している。Fig.5 は車載リンクの運動を示し、Fig.6 は1リンク移動マニピュレータの移動軌跡を示している。今回の波状路面関数は $z = 0.1(1.0 - \cos(4x))$ であるから、台車重心の z 座標値が0.2をとれば1リンク移動マニピュレータが凸部頂上に到達したことを意味する。

Fig. 3: x position

Fig. 4: z position

Fig. 5: link angle

Fig. 6: MM trajectory

6 結言

本報では、1リンク移動マニピュレータが、波状路面上の凸部を乗り越えつつ走行する車載リンクの目標軌道を、自ら探索できることを確認できた。いままでは路面が水平だったため運動の評価に平均速度を利用したが、今回は路面が波状であるから水平路面のときと同じ評価関数は利用できなかった。言い換えれば、評価関数をどう作成するかが重要であるという事である。

参考文献

- [1] 見浪, 朝倉, 千田, 朝倉: "駆動力を持たない移動マニピュレータの動力学的干渉を用いた走行", 第12回アドバンティ・シンポジウム講演論文集, pp.91-94(1999)
- [2] 見浪, 朝倉, 玉村, 朝倉: "動力学的干渉と非線形摩擦を利用するリンク搭載型走行台車の機械学習の一方法", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.7, pp.97-104(2001)
- [3] 見浪, 羽多野, 朝倉: "凹凸路面を走行する移動マニピュレータの研究 (第1報, 拘束運動モデルの導出とシミュレーション)", 機論C編, vol.63, no.615, pp.265-272(1997)
- [4] 小林, 斉藤, 野波: "宇宙ロボットの姿勢制御 (第1報, スラスタによる制御)", 機論C編, vol.59, no.561, pp.1459-1464(1993)
- [5] 清水, 猪岡: "カルマンフィルタによる個体摩擦の推定 (第1報, 摩擦のモデルを指定した場合のシミュレーション実験)", 機論C編, vol.53, no.496, pp.2608-2612(1987)