

卒業論文要旨

デジタル加速度制御法による無方向性四輪車の経路追従制御

知能ロボティクス研究室 1170161 森 陽介

1. 緒言

近年、災害地等の極限状況下での活動を想定したロボットの開発が行われている。そのような状況下では、地面の起伏によりロボットが転倒し易い。解決策の一つとして、先行研究では転倒しない無方向性ロボットを提案している⁽¹⁾。本研究では無方向性四輪車というロボットを開発している⁽²⁾。無方向性四輪車には障害物を正確に回避するために、高精度な経路追従性能が必要である。

先行研究では、無方向性四輪車の走行精度を向上させるために、PID制御法に基づいて経路追従制御を開発した⁽³⁾。しかし、実機実験にて、非線形摩擦により大きな経路追従誤差が見られた。

そこで本研究では、無方向性四輪車の経路追従誤差を軽減するために、非線形摩擦に対応できるデジタル加速度制御法に基づいて、無方向性四輪車の走行制御法を開発し、シミュレーションで有効性を検討する。

2. 制御法

2.1 動力学モデル

無方向性四輪車の動力学方程式を導出するために、重心のずれを考慮しない場合の構造モデルを図1に示す。

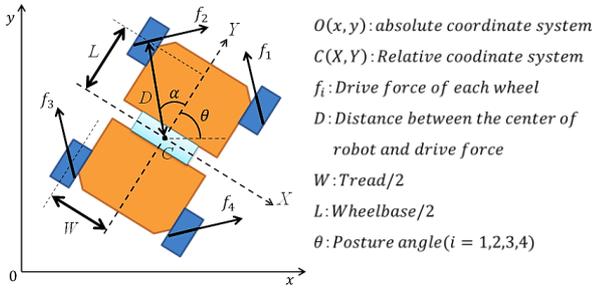


Fig.1 Model of non-directional four-wheeled mobile robot

図1より、駆動力が中心位置に直接作用して、摩擦を考慮したときの動力学方程式は式(1)となる。

$$M_G \ddot{X}_C = K_G^T(\theta)(F - f_f) \quad (1)$$

ただし、

$$M_G = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix}, \ddot{X}_C = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$K_G^T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \frac{\pi}{4}) & \cos(\theta - \frac{\pi}{4}) & -\sin(\theta - \frac{\pi}{4}) & \cos(\theta - \frac{\pi}{4}) \\ \cos(\theta - \frac{\pi}{4}) & \sin(\theta - \frac{\pi}{4}) & \cos(\theta - \frac{\pi}{4}) & \sin(\theta - \frac{\pi}{4}) \\ D & -D & -D & D \end{bmatrix}$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T, f_f = [f_{f1} \quad f_{f2} \quad f_{f3} \quad f_{f4}]^T$$

$$D = \cos(\gamma - \frac{\pi}{4})\sqrt{L^2 + W^2}, \gamma = \tan^{-1}(W/L)$$

ただし、 x はロボットの x 軸方向の位置、 y はロボットの y 軸方向の位置、 M はロボット本体の質量、 I_G はロボットの重心位置での慣性モーメントとする f_i ($i=1, 2, 3, 4$)は各ホイールの駆動力、 f_{fi} は各ホイールが受ける摩擦力を示す。また、 $K_G^T(\theta)$ によりロボットのモデルは非線形となる。

2.2 デジタル加速度制御法

本研究では、ロボットの経路追従誤差を発生する摩擦に対応できるようにデジタル加速度を開発する。運動の過程においては、外力を加え加速度が生じる瞬間では位置と速度は変化しない。本研究のデジタル加速度制御法は、この運動の基本に着目して開発された。開発した制御則を式(2)に示す。

$$F(kT^+) = F((k-1)T^+) + K_G(\theta)[K_G^T(\theta) \cdot K_G(\theta)]^{-1} M \{ \ddot{X}_C^*(kT^+) - \ddot{X}((k-1)T^+) + K_D[\dot{X}_C^*(kT^+) - \dot{X}(kT^+)] + K_P[X_C^*(kT^+) - X(kT^+)] \}$$

ただし、 X_C^* は目標経路、 kT^+ は現在の時刻、 $(k-1)T^+$ は現在の時刻の一つ前のサンプリング周期 T 、

$K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ はロボットの非線形に対応するために導入した $K_G^T(\theta)$ の一般化逆行列である。 K_P は比例ゲイン、 K_D は微分ゲインを示す。式(2)より各ホイールの駆動力が算出される。

3. シミュレーション

提案したデジタル加速度制御法の有効性を検証するために、PID制御法と比較し、2通りのシミュレーションを行った。シミュレーションの際に考慮する摩擦力 f_{fi} は式(3)を用いた。

$$f_{fi} = cv_i + \left[\frac{1}{4} \mu Mg + (1 - \frac{1}{4} \mu Mg) e^{-|v_i|^2} \right] \text{sgn}(v_i) \quad (3)$$

ただし、 c は粘性摩擦係数、 μ はクーロン摩擦係数である。また、シミュレーションに使用したデジタル加速度制御法のパラメータを表1に、PID制御法のパラメータを表2に示す。

Table1 Parameters of digital acceleration control method

パラメータ	値と単位
K_P	$\text{diag}(400, 200, 200)\text{s}^{-2}$
K_D	$\text{diag}(40, 50, 35)\text{s}^{-1}$

Table2 Parameters of PID control method

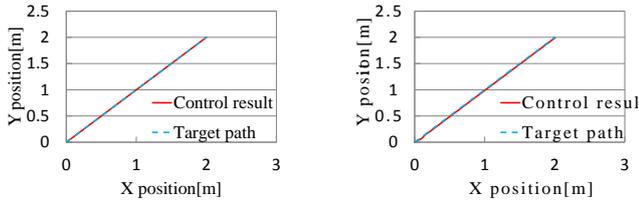
パラメータ	値と単位
K_P	$\text{diag}(800, 800, 400)\text{s}^{-2}$
K_D	$\text{diag}(80, 100, 70)\text{s}^{-1}$
K_I	$\text{diag}(0.105, 0.105, 0.05)\text{s}^{-3}$

3.1 摩擦係数一定の場合

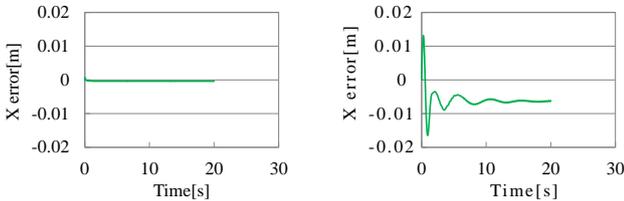
1つ目のシミュレーションでは、式(4)のような摩擦係数がある一定状況下、ロボットが位置(0,0)から位置(2,2)の地点まで直進走行させた。目標経路を式(5)に示す。デジタル加速度制御法(DAC)とPID制御法のシミュレーション結果、 x 方向での二種制御法の走行誤差、 y 方向での二種制御法の走行誤差を図2に示す。

$$c = 0.2, \mu = 0.8 \quad (4)$$

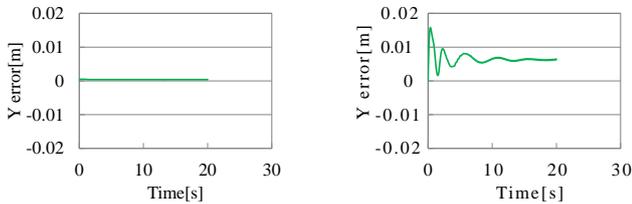
$$x^*(t) = 0.1t, y^*(t) = 0.1t, \theta(t) = \pi/2, t = 0 \sim 20[s] \quad (5)$$



(a) Path Tracking Result of DAC (b) Path Tracking Result of PID



(c) x axis Error of DAC (d) x axis Error of PID



(e) y axis Error of DAC (f) y axis Error of PID

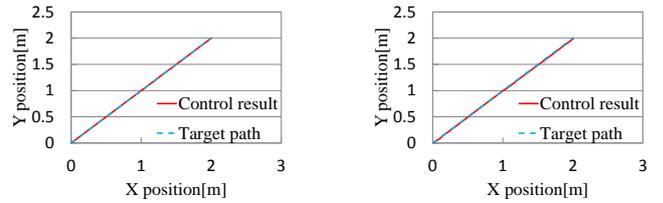
Fig. 2 Path Tracking results of simulation

シミュレーション結果より、摩擦係数が一定の場合では各制御法共に目標値と誤差無く走行できていることが分かる。また、各方向での走行誤差より、PID制御法では時間経過とともに誤差を収束していつていることが分かる。

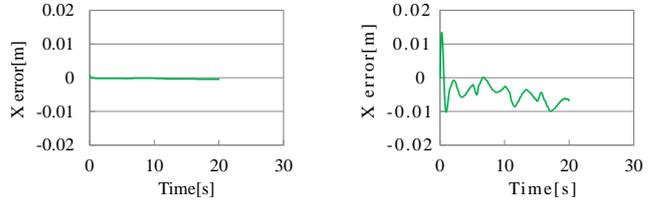
3.2 摩擦係数が変化した場合

2つ目のシミュレーションでは、経路とパラメータを変えずに式(6)のように摩擦係数を変動させた状況下の地面を走行させた。この時のデジタル加速度制御、PID制御法のシミュレーション結果、 x 方向での二種各制御法の走行誤差、 y 方向での二種各制御法の走行誤差を図3に示す。

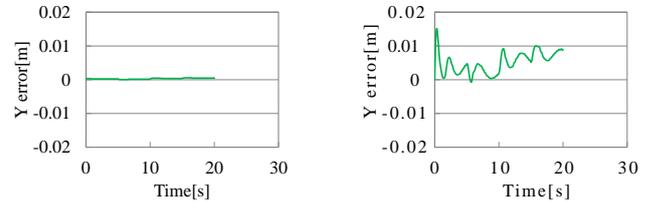
$$\begin{aligned} 0 \leq t \leq 5[s], c = 0.4, \mu = 0.3 \\ 5 < t \leq 10[s], c = 0.2, \mu = 0.1 \\ 10 < t \leq 15[s], c = 0.5, \mu = 0.7 \\ 15 < t \leq 20[s], c = 0.8, \mu = 1.0 \end{aligned} \quad (6)$$



(a) Path Tracking Result of DAC (b) Path Tracking Result of PID



(c) x axis Error of DAC (d) x axis Error of PID



(e) y axis Error of DAC (f) y axis Error of PID

Fig. 3 Path Tracking results of simulation

シミュレーション結果より、各制御法ともに目標値と誤差無く走行できている事が分かるが、各方向での走行誤差を見てみると、デジタル加速度制御法では加速度によって誤差無く走行できているのに対して、PID制御法では摩擦変動に対する誤差修正が間に合わないために走行誤差が目標経路に収束出来ない事から、誤差が摩擦力の変化に伴って変動していることが分かる。

4. 結言

今回はデジタル加速度制御法が摩擦に対する優位性をPID制御法と比較して、シミュレーションによって検討した。結果より、デジタル加速度制御法は摩擦が変化した場合でも適応できることが分かった。よってデジタル加速度制御法には有効性があると考えられる。今後は、シミュレーションの結果を基に、実機実験による有効性の検証を行っていきたいと考える。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15H03951 とキャノン財団の助成を受けたことを記し、感謝を申し上げる。

参考文献

- (1) 田中秀明, 王碩玉, 河田耕一, “非方向指向性ロボット”, 第20回日本ロボット学会論文集 CD-ROM, 3J24, 2002.
- (2) 西元裕人, “超音波センサを用いた全方向移動車の制御”, 高知工科大学システム工学群, 卒業論文, pp. 1-8, 2013.
- (3) 安田敦史, 王碩玉, 王義娜, “無方向性四輪車の経路追従制御”, 高知工科大学システム工学群, 卒業論文, pp. 15-22, 2014.