

歩行支援機の運動制御

デジタル加速度制御法による経路追従精度の向上

Motion control of a walking support machine

Improvement of path tracking accuracy based on digital acceleration control

○王 義娜, 王 碩玉, 譚 仁鵬, 姜 銀来 (高知工科大)

石田 健司 (高知大), 藤江 正克 (早稲田大)

Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang(Kochi university of technology)
Kenji Ishida (Kochi university) and Masakatsu G. Fujie (Waseda university)

Abstract: An intelligent walking support machine which can assist the independent life of the elderly and the disabled with walking impairment is being developed. The machine can realize walking support by moving to the direction the user is intending to go according to the user's manipulation. However, the motion accuracy of the machine is affected by the nonlinear friction, center-of-gravity shift and load changes caused by the users. To address these issues, a digital acceleration controller is designed in this paper to improve the motion accuracy of the machine. Simulations are executed and the results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed digital acceleration control method.

Key Words: Nonlinear Friction, Load Changes, Walking Support Machine, Motion Control, Digital Acceleration Control

1. はじめに

高齢化進展に伴い要介護者が増加する一方で少子化が進み介護力が減少していることから、高齢化や障害者等の自立生活に寄与するような、福祉機器の開発実用化が期待されている。本研究では運動機能が低下した高齢者、あるいは歩行機能に軽度の障害を持つ人を対象とし、より被支援者の負担を軽減できる、新しい歩行支援機を開発を始めている。

新規で開発している歩行支援機は、自宅など狭い場所でも歩行支援を行うために、全方向移動機能を備えている。また、利用者の腕荷重から利用者の方向意図を理解し、利用者をサポートすることができる。歩行支援において、利用者の方向意図に精確に追従して歩行機を制御する必要がある。しかし、非線形摩擦力と、使用者の身体状況による重心移動と荷重変化があるため、高精度経路追従を得ることが困難である。本論文は、デジタル加速度制御法を用いて、非線形摩擦と、利用者による重心移動と荷重変化の影響を抑制する⁽¹⁾。シミュレーションにより本手法の有効性を示す。

2. 全方向移動型歩行支援機

Fig. 1 に開発した全方向移動型歩行支援機を示す。特徴としては、4つのメカナム式駆動輪を本体の底部各頂点に設けることで任意の姿勢で任意の方向への移動ができる。

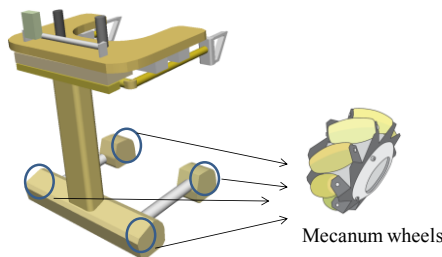


Fig. 1 Walking support machine and mecanum wheels

運動制御法を開発するために、まず動力学方程式を導出する。歩行支援機を2次元でモデル化し、中心から重心位置が移動した場合の座標系の設定と構造モデルを Fig. 2 に

示す。ただし、 $\Sigma(x, y, O)$: 絶対座標; $\Sigma(x', y', C)$: 相対座標; $G(x_g, y_g)$: 歩行支援機の重心の座標; $C(x_c, y_c)$: 歩行支援機の幾何中心の座標; d : 重心と中心の距離; v_i : 駆動輪の速度; f_i : 駆動輪の駆動力; $2L$: 歩行支援機の長さ; $2W$: 歩行支援機の幅; θ : 歩行支援機の姿勢角; α : x' 軸と CG 成す角度; D : f_i と中心の距離。

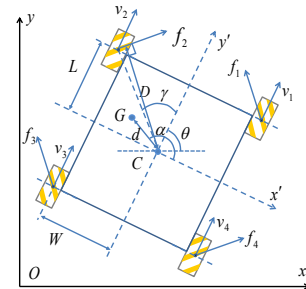


Fig. 2 Structural model of walking support machine

以上の座標系では、重心移動を考慮した場合の動力学式は式(1)に示す。

$$M_0 \ddot{X} + C\dot{X} = B(F - f_f) \tag{1}$$

ただし

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & (M+m)d \sin \alpha \\ 0 & M+m & -(M+m)d \cos \alpha \\ 0 & 0 & I + (M+m)d^2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (M+m)d \cos \alpha \\ 0 & 0 & (M+m)d \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = [x_c \quad y_c \quad \theta]^T$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T$$

$$f_f = [f_{f1} \quad f_{f2} \quad f_{f3} \quad f_{f4}]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -\sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & \sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) & \sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \\ D - d \cos\delta & -D - d \sin\delta & -D - d \cos\delta & D + d \sin\delta \end{bmatrix}$$

ただし, $\delta = \alpha - \gamma$, $D = \sin\left(\frac{\pi}{4} + \gamma\right) \sqrt{L^2 + W^2}$, $\gamma = \arctan\left(\frac{W}{L}\right)$.

M は歩行支援機の質量, m は訓練者の歩行支援機に掛ける等価体重, I は歩行支援機の慣性モーメント, d は中心から訓練者の歩行訓練機に掛ける体重の重心までの距離, F は4つのメカナム式駆動輪の駆動力, f_f は4つのメカナム式駆動輪の摩擦力.

3. デジタル制御則の設計

デジタル加速度制御法に基づいて, 歩行支援機の運動制御法を開発する⁽¹⁾. まず, 一つのサンプリング周期 T 内での入力値を一定とする. したがって, 駆動力 $F(\cdot)$ を Fig. 3 のような階段状のものとして, ただし, kT^+ は時刻 kT 後の極めてわずかに経過した時刻を意味し, T はサンプリング時間である. 時刻 kT^+ で入力突然に変化した瞬間, ロボットが新たな加速度を獲得することができるが, 位置と速度および位置, 速度に依存する非線形摩擦力は瞬時には変化しない.

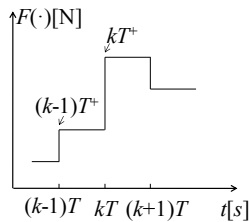


Fig. 3 Stepwise change of control force

制御則を式(2)に示す.

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + B^T (BB^T)^{-1} M_0 \{ [\ddot{X}_d(kT^+) - \ddot{X}(kT)] + K_D [\dot{X}_d(kT^+) - \dot{X}(kT)] + K_P [X_d(kT^+) - X(kT)] \} \quad (2)$$

ここで, $K_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$: 速度偏差係数, $K_P = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3})$: 位置偏差係数. K_D と K_P を選ぶことで, 制御システムの安定性が保証され, すなわち, 目標起動追従目的が達成できる.

4. シミュレーション

非線形摩擦力, 重心移動と荷重変化を考慮しない場合と考慮した場合について, 本制御法の有効性を理論面で確かめるために, 正方形経路について支援機のシミュレーションを行った. 歩行支援機のパラメータは Table 1 に示す.

Table 1 Physic parameters of the machine

Parameter	value	unit
Height H	840-1240	mm
Width $2W$	600	mm
Length $2L$	450	mm
Mass M	80	kg
Maximum load m	80	kg
Inertia of mass I	1.3	kg·m ²

正方形の目標軌道の中心座標は(5m,5m)である, 辺の長さは4mである. 支援機の向き θ は $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ である. 支援機の初期角度は $\theta(0) = \pi/2$, 初期位置は $x_c(0) = y_c(0) = 1\text{m}$. 非線形摩擦力: $f_f = 0.2v_i$; 重心移動: $d = 0.2\text{kg}$, $\alpha = 2\pi/3$; 荷重

変化: $m = 80\text{kg}$. また, 速度偏差係数は共に $K_D = \text{diag}(3, 3, 3) 1/s$, 位置偏差係数は共に $K_P = \text{diag}(1.6, 1.6, 1.6) 1/s^2$.

Fig. 4 (1a-1d) は非線形摩擦力, 重心移動と荷重変化を考慮しない場合の支援機の位置, 角度と経路追従を示している. Fig. 4 (2a-2d) は非線形摩擦力, 重心移動と荷重変化を考慮する場合の支援機の位置, 角度と経路追従を示している. Fig. 4 より, 非線形摩擦力, 重心移動と荷重変化を考慮しない場合と考慮する場合の位置, 角度と経路追従はほぼ同じであることが示された. これらの結果により, 提案した制御法の有効性が確認された.

提案制御法を使用して, 前のサンプリング周期の制御力は, 非線形摩擦, 重心移動と荷重変化の影響が含まれてから, 前回のサンプリング期間の制御力に基づく現在の制御力は非線形摩擦, 重心移動と荷重変化を補償する可能性がある. したがって, シミュレーションにより, 提案したデジタル加速度コントローラは, 非線形摩擦, 重心移動と荷重変化を補償できることが示された.

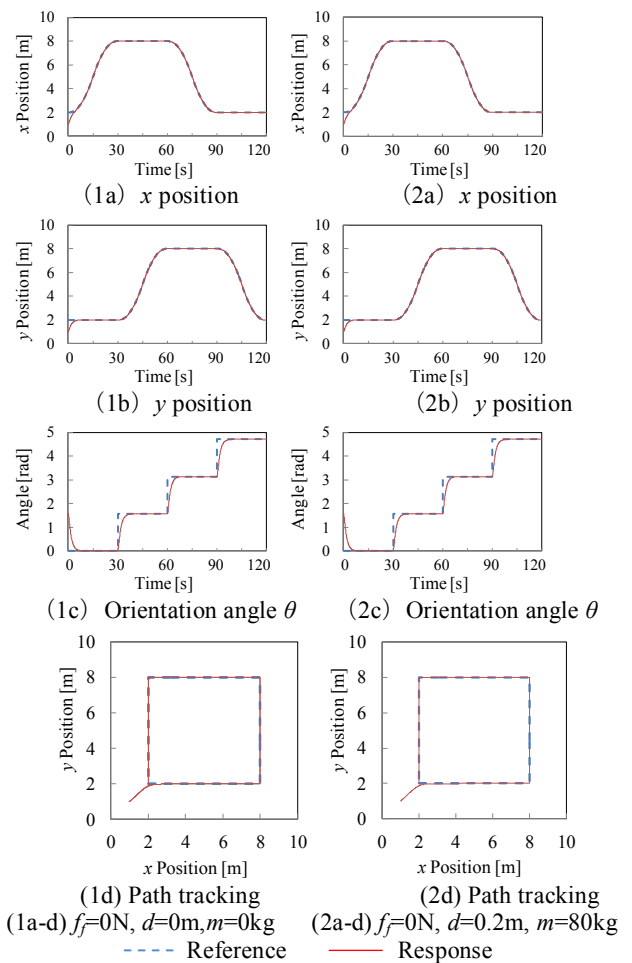


Fig. 4 Simulation results

5. まとめ

本報告では, 歩行支援機の非線形摩擦, 重心移動と荷重変化による経路追従誤差を低減するために, デジタル加速度制御法を提案した. シミュレーションにより有効性を示した. 今後, 本制御アルゴリズムを歩行支援機に実装し走行実験による有効性を検証する.

参考文献

- (1) 王・土谷・橋本, ロボットマニピュレータの加速度制御法, 日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集, (1991-7)