

全方向移動型歩行訓練機の運動制御法の改善

Improvement for Adaptive Control Method of Omni-directional Walker

○譚仁鵬 王碩玉 姜銀来 (高知工科大) 石田健司 (高知大) 藤江正克 (早稲田大)

Renpeng TAN, Kochi University of Technology
 Shuoyu WANG, Kochi University of Technology
 Yinlai JIANG, Kochi University of Technology
 Kenji ISHIDA, Kochi University
 Masakatsu FUJIE, Waseda University

Abstract: In ageing society, more and more people suffer from walking disability caused by illness or accident. In this paper, an omni-directional walker was introduced, which can support people to do walking training. The walker can realize omni-directional movement which includes not only forward and backward motions, but also right and left motions, oblique motions, and rotations. Training courses are stored in the walker so that rehabilitation can be carried out without the presence of physical therapists. In order to precisely follow the training path defined in the training course, an adaptive control method was developed to deal with center-of-gravity shift and load change caused by user. Simulation and experiment results showed that this scheme can deal with this problem and the path tracking accuracy is improved.

Key Words: Walker, Omni-directional Walker, Adaptive control

1. はじめに

加齢による運動機能の低下や事故などにより歩行機能が低下した人のリハビリテーションを目的として、現在さまざまな歩行訓練器具が存在する。しかし、現在用いられている簡易的な歩行訓練器具では前後移動だけなどの限定された動作しかできず、十分な歩行訓練を行なうことができない。そこで我々の研究グループでは、より効果的な歩行訓練を行うために全方向に移動可能な歩行訓練機を開発する⁽¹⁾。本歩行訓練機は前後・左右・斜め・方向転換などの動作を複合的に組み合わせた訓練を行なうことができる。Fig. 1 に「歩行王 (アルキング)」と呼ばれている全方向移動型歩行訓練機を示す。

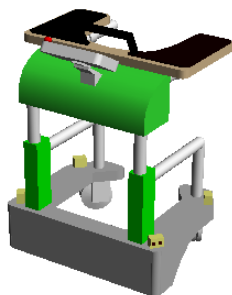


Fig. 1 Omni-directional walker.

理学療法士の運動メニューを歩行訓練に入力すると、運動処方箋にしたがって訓練も可能である。しかし、要訓練者の異なる体重および肘掛け方による重心の移動によって、経路および軌道の追従誤差が出ている。運動処方を充実に実現するために、経路追従誤差を低減する必要があった。本研究の目的は、制御工学の立場から、すなわち、経路追従誤差を低減するために、適切な制御法を開発することである。先行研究では、重心に目着した適御制御法を開発した⁽²⁾。しかし、訓練者が何時も訓練機を中心位置にいる。そこで中心に目着する制御法を開発することが望まれている。本論文では、中心座標を用いた歩行訓練機の動力学モデルに基づく適応制御法を開発し、実験により、経路追従精度を向上させるに有効であることを示す。

2. 全方向移動型歩行訓練機の動力学

歩行訓練機の動力学について説明する。歩行訓練機を2次元に単純化したモデルとその座標設定をFig.2に示す。

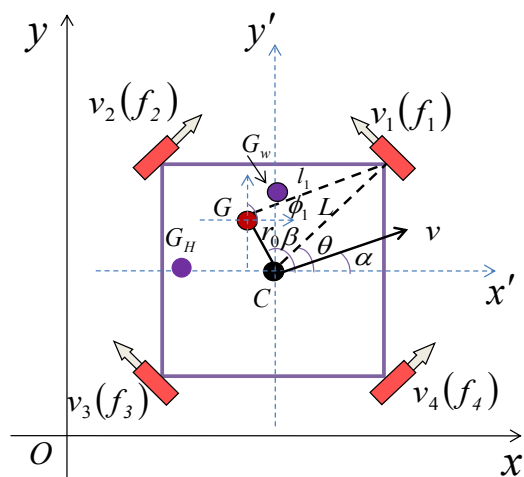


Fig. 2 Structural model of the omni-directional walker.

赤はオムニホイール、 v_i はホイールの回転速度、 f_i はホイールを駆動する力を表す； C は、歩行機を中心位置であり、 G_w は歩行機の重心位置であり、 G_H は患者の等価負荷重心であり、 G は歩行機の重心である； G_w と G_H により、 G の位置を計算できる。 r_0 は二つの重心の距離、すなわち重心ずれの距離を表す； θ は歩行機の向き、 α は歩行機の移動速度方向である； L は、オムニホイールと中心の距離； l_i は、重心 G とオムニホイールの距離； θ_i は x' 軸とオムニホイール i の成す角度； ϕ_i は x' 軸とオムニホイールの成す角度； β は x' 軸と重心ずれ r_0 の成す角度。

このように、座標を設定しておけば、次のような動力学モデルを得られる。中心に着目した動力学方程式は式(1)と表すことができる。

$$M_0 \cdot K' \cdot \ddot{X} + M_0 \cdot \dot{K}' \cdot \dot{X} = K_G^T \cdot F \quad (1)$$

ただし、

$$\dot{X} = [\dot{x}_c \quad \dot{y}_c \quad \dot{\theta}]^T$$

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

$$K' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2}[\sin\theta \cdot (\lambda_1 - \lambda_3) + \cos\theta \cdot (\lambda_2 - \lambda_4)] \\ 0 & 1 & \frac{1}{2}[\sin\theta \cdot (\lambda_2 - \lambda_4) - \cos\theta \cdot (\lambda_1 - \lambda_3)] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_G = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & l_1 \cos(\theta_1 - \phi_1) \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & -l_2 \cos(\theta_2 - \phi_2) \\ \sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & -l_3 \cos(\theta_3 - \phi_3) \\ -\sin\theta_4 & \cos\theta_4 & l_4 \cos(\theta_4 - \phi_4) \end{bmatrix}$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+mr_0^2 \end{bmatrix}$$

3. 制御アルゴリズム

歩行訓練の時、訓練者は歩行機に体重を掛けるので、重心ずれと荷重変化に対応する必要がある。適御制御は環境などの要因により制御対象の特性が変化した場合、制御対象の変化に合わせて制御パラメータを変化させていく制御法である。したがって、本論文は適応制御に基づいて全方向移動型歩行訓練機の運動制御法を開発する。

適応制御法の制御則と推定則を式 (2) と式 (3) のように与える。

$$F = K_G (K_G^T K_G)^{-1} [\hat{M}_0 K' (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + \hat{M}_0 \dot{K}' \dot{X} + \hat{A} \dot{S} + KS] \quad (2)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = \Gamma^{-1} HS \quad (3)$$

下記に収束性の証明を示す。

推定誤差 $\Delta\alpha = \hat{\alpha} - \alpha$

正定関数：

$$V(t) = (1/2)[S^T (M_0 K' + A)S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \alpha]$$

この関数の時間微分を求めると、

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T (M_0 \dot{K}' + A) \dot{S} + (1/2) S^T \dot{M}_0 K' S \\ &\quad + (1/2) S^T M_0 \dot{K}' S + (1/2) S^T \dot{A} S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \dot{\alpha} \\ &= -S^T KS \leq 0 \end{aligned}$$

これより $V(t)$ はリアプのフ関数である。したがって、 $t \rightarrow \infty$ につれ $S \rightarrow 0$ となることが分かる。このことは $S = \dot{e} + \lambda e$ から $t \rightarrow \infty$ につれ $e \rightarrow 0$, $\dot{e} \rightarrow 0$ となることを意味することになる。

ただし、

$$A = M_0 - M_0 K', \quad \dot{M}_0 = 0.$$

$$e = X_d - X, \quad \dot{e} = \dot{X}_d - \dot{X}, \quad e = [e_x, e_y, e_\theta]^T$$

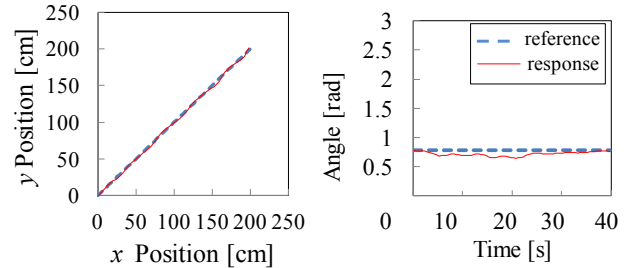
$$H = \begin{bmatrix} c\dot{\theta} + \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{e}_x + c(\ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_\theta) & 0 & 0 \\ 0 & d\dot{\theta} + \ddot{y}_d + \lambda_2 \dot{e}_y + d(\ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_\theta \\ \ddot{e}_\theta + \lambda_3 \dot{e}_\theta & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{e}_\theta + \lambda_3 \dot{e}_\theta & 0 \end{bmatrix}$$

X_d は目標軌道である。 M_0 の推定値を \hat{M}_0 と表す。

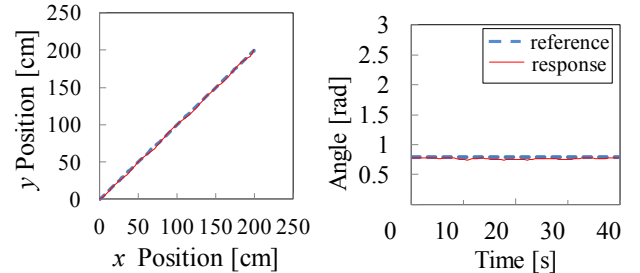
λ , K , Γ は正定対角行列、制御パラメータである。この制御システムは安定であり、目標軌道追従誤差は零に収束することが証明されている。

4. 実験

上記の制御アルゴリズムを用いて実験を行った結果を Fig.3 と Fig.4 に示す。目標経路は直線である、歩行機の向き θ は 45 度である。初期条件は $x_G(0)=0\text{m}$, $y_G(0)=0\text{m}$, $\theta(0)=45$ 度。開始と終了速度をゼロにする。Fig.3 では、荷重 $m=0\text{kg}$, 重心ずれ $r_0=0.16\text{m}$, 重心ずれ角度 $\beta=90$ 度の場合の実験結果である。Fig.4 では、荷重 $m=8.8\text{kg}$, 重心ずれ $r_0=0.15\text{m}$, 重心ずれ角度 $\beta=68$ 度の場合の実験結果である。Fig.3(a) では、横軸は x 横軸の位置応答、縦軸は y 縦軸の位置応答、点線は目標軌道、実線は歩行機の位置応答を表す。Fig.3(b) では、横軸は時間、点線は本体の向き角度の目標軌道、実線は角度における歩行機の向きの角度応答を表す。



(a) Track and gradient (b) Angle
Fig. 3: Experiment results without load.



(a) Track and gradient (b) Angle
Fig. 4: Experiment results with load.

Fig.3(a) と Fig.4(a) 実験結果の位置応答を比べて、ほぼ同じ経路追従結果であることがわかります。Fig.3(b) と Fig.4(b) 向き角度応答を比較すると、荷重なしより、荷重ありの時は、経路追従誤差が大きいです。原因としては、実際の歩行訓練機の重心 ($r_0=0.16\text{m}$, $\beta=90$ 度) は前寄りですので、後ろに荷重をかける場合は、返って制御しやすくなったことが、現時点では考えられる。これにより、提案した適応制御法は、異なる体重と重心ずれに対処することができる、ということが確認されました。

5. まとめ

本報告は、全方向移動型歩行機の荷重変化と重心ずれによる経路追従誤差を低減するために、全方向移動型歩行機の適応制御法を提案した。実験により有効性を示した。今後では、重心位置情報を必要としない新制御法を開発する。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省の科研費(20240058)と科研費(21300212)の助成を受けて行われた。

参考文献

- (1) 王碩玉, 河田耕一, 石田健司, 山本博司, 木村哲彦, 全方向移動型歩行訓練機, 第17回ライフサポート学会学術講演会論文集, pp.48, 2001.
- (2) 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 全方向移動型歩行訓練機の適応制御法. 第28回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010AC2P1-5, 2010.