

適応制御法に基づく全方向移動型歩行訓練機の運動制御

The Adaptive Control Strategy for Motion Control of an Omni-directional Walker

○譚 仁鵬 (高知工科大) 王 碩玉 (高知工科大) 姜 銀来 (高知工科大)

石田 健司 (高知大) 藤江 正克 (早大)

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

Key Words: Omni-directional Walker, Path Tracking, Adaptive Control

1. はじめに

社会の高齢・少子化につれて、加齢や事故などによる要歩行訓練者が増え、一方、理学療法士の絶対人数不足問題が非常に深刻である。そこで、効率的で多様な歩行訓練を実施できる歩行訓練機の開発が強く望まれている。

歩行運動は、健康を支え自立生活の基本である。歩行運動は、立位前方方向運動だけではなく、左右方向運動、斜め方向運動、旋回、回転等から多様な動作群である。したがって、歩行障害のリハビリテーションでは、これらの多様な動作群を万遍無く総合的にトレーニングすれば、早期回復が期待できる。

著者らの研究グループの先行研究では、効率的で多様な動作群の訓練を実施できる全方向移動型歩行訓練機を開発し、臨床試験により有用性が認められている⁽¹⁾。しかし、理学療法士の運動処方より精度よく実施するには、経路追従誤差を低減する必要がある。著者らは、経路追従精度に影響を与える各種要因を考察した結果として、異なる体重および肘掛け方による重心の移動は最も重要な原因であることが分かった。そこで、本報告では、重心移動の影響に適応する制御法を開発し、シミュレーションにより、経路追従の精度向上に有効であることを実証する。

2. 開発した全方向移動型歩行訓練機

2-1. 全方向移動型歩行訓練機

開発した全方向移動型歩行訓練機を Fig.1 に示す。特徴としては4つのオムニホイールを本体の底部各頂点に設けることで多様な歩行運動を実現し、早期回復が期待できる。また、訓練中の転倒を防止し安全性を確保する。



(a) Omni-directional walker (b) Omni-wheel
 Fig. 1 The structure of omni-directional walker

2-2. 歩行訓練機の運動学と動力学

適切な制御法を開発するために、まず運動学と動力学方程式を導出することが必要である。そのため、全方向移動型歩行訓練機を2次元モデル化し、中心から重心位置がずれた場合の座標系の設定と構造モデル Fig.2 に示す。

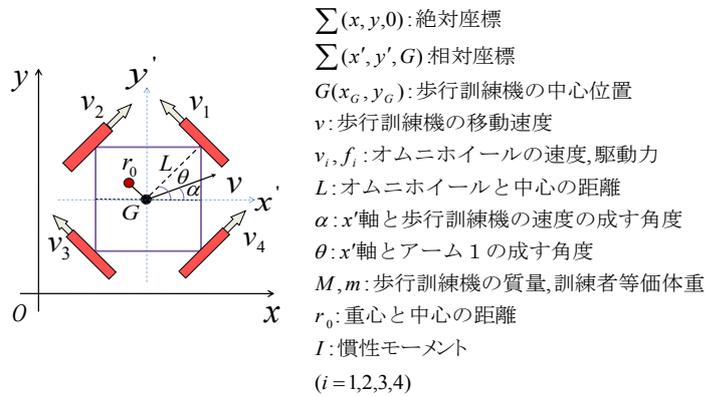


Fig. 2 Model of omni-directional walker

以上の座標系では、運動学方程式は式(1)、動力学方程式は式(2)に示す。

$$\begin{cases} v_1 = -v_x \sin \theta + v_y \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) + L \dot{\theta} \\ v_2 = v_x \cos \theta + v_y \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) - L \dot{\theta} \\ v_3 = -v_x \sin \theta + v_y \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) - L \dot{\theta} \\ v_4 = v_x \cos \theta + v_y \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + L \dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (M+m) \ddot{x}_G = -f_1 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + f_2 \cos \theta - f_3 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + f_4 \cos \theta \\ (M+m) \ddot{y}_G = f_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) + f_2 \sin \theta + f_3 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) + f_4 \sin \theta \\ (I + m r_0^2) \ddot{\theta} = L f_1 - L f_2 - L f_3 + L f_4 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 m は訓練者の歩行訓練機に掛ける等価体重であり、 r_0 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。 m と r_0 は体重や肘掛け方により変わる。

3. 適御制御を用いた制御アルゴリズム

歩行訓練の時、訓練機に訓練者の体重を掛けるので、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、本論文は適応制御法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。まず動力学方程式(2)を式(3)のような行列方程式にまとめる。

$$M_0 \ddot{X} = BF \quad (3)$$

ただし, M_0 , \ddot{X} , B , F は次のように定義する.

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+mr_0^2 \end{bmatrix}, \quad \ddot{X} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & -\sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta & \cos\theta & \sin\theta \\ L & -L & -L & L \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}.$$

体重と肘仕掛け方により, m と r_0 は変わるために, 制御側においてその推定値を用いる. 推定パラメータを代入すると, 式(3)は式(4)になる.

$$\hat{M}_0 \ddot{X} = Y \hat{\alpha} \quad (4)$$

ここで, \hat{M}_0 は M_0 の推定値であり, $\hat{\alpha}$ は M_0 の対角要素の推定値であり, それぞれ次のように表す.

$$Y = \begin{bmatrix} \ddot{x}_G & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{y}_G & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta} \end{bmatrix}, \quad \hat{\alpha} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{M}+\hat{m} \\ \hat{M}+\hat{m} \\ \hat{I}+\hat{m}\hat{r}_0^2 \end{bmatrix}.$$

制御則と推定則を式(5)と式(6)のように与えれば, システムは安定となり, 目標経路追従誤差は零に収束することが証明できる.

$$F = B^T (BB^T)^{-1} [\hat{M}_0 (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + KS] \quad (5)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = \Gamma^{-1} HS \quad (6)$$

ただし,

$$\hat{M}_0 = \begin{bmatrix} \hat{M}+\hat{m} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{M}+\hat{m} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{I}+\hat{m}\hat{r}_0^2 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{Gd} + \lambda_1 \dot{e}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{y}_{Gd} + \lambda_2 \dot{e}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_3 \end{bmatrix},$$

$$X_d = [x_{Gd}, y_{Gd}, \theta_d]^T, \quad X = [x_G, y_G, \theta]^T,$$

$$S = \dot{e} + \lambda e, \quad e = X_d - X, \quad \dot{e} = \dot{X}_d - \dot{X}.$$

λ , K , Γ : 3×3 正定対角行列, 制御パラメータである.

4. シミュレーション

上記の制御アルゴリズムを用いてシミュレーションを行った結果を Fig.3 に示す. 目標経路は正方形である, 歩行機の向き θ は 90 度である. 初期条件は $x_G(0)=1\text{m}$, $y_G(0)=1\text{m}$, $\theta(0)=45$ 度. 開始と終止速度をゼロにする. Fig.3(a)では, 横軸は時間, 破線は x 横軸の目標軌道, 実線と点線は x 横方向における歩行訓練機の位置応答を表す. Fig.3(b)では, 横軸は時間, 破線は y 縦軸の目標軌道, 実線と点線は y 縦方向における歩行訓練機の位置応答を表す. Fig.3(c)では, 横軸は時間, 破線は本体の向き角度の目標軌道, 実線と点線は角度における歩行訓練機の向きの角度応答を表す. Fig.3(d)では, 横軸は x 横軸の位置応答, 縦軸は y 縦軸の位置応答, 破線は目標軌道, 実線と点線は歩行訓練機の位置

応答を表す. 実線は荷重 $m=0\text{kg}$, 重心ずれ $r_0=0.00\text{m}$ の場合, 点線は荷重 $m=50\text{kg}$, 重心ずれ $r_0=0.20\text{m}$ 場合の結果である. 荷重変化と重心ずれの時, 精度よく追従したことが分かる.

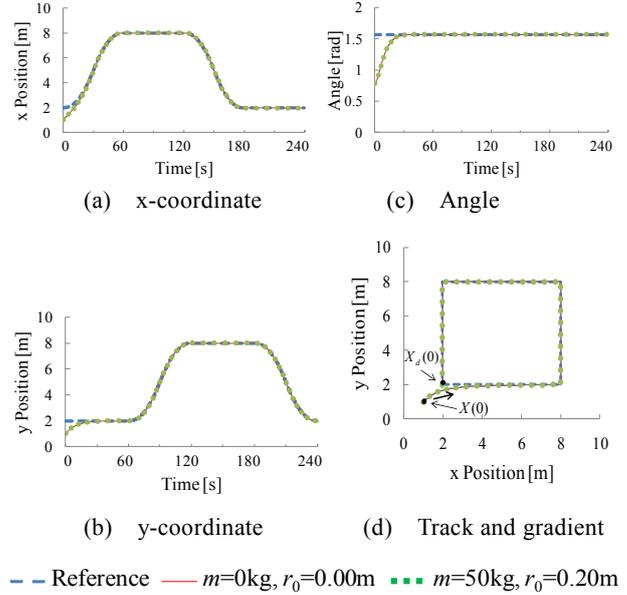


Fig. 3 Simulation results

ここで, 経路追従誤差を目標経路と追従制御した結果との間の面積で割る目標経路の長さで定義する. 異なる制御パラメータを用いて, それぞれ重心移動の無い理想状態の歩行訓練機と, 重心移動のある現実的状态の歩行訓練機を制御した場合の経路追従誤差を表 1 に示す. Fig. 3 のパラメータは $\Gamma=0.1$, $\lambda=0.1$, $K=250$.

Table 1 Path tracking error

	Error(m)	
	$\Gamma=0.1, \lambda=0.1, K=250$	$\Gamma=0.1, \lambda=0.3, K=500$
$m=0\text{ kg}$ $r_0=0.00\text{ m}$	0.044	0.023
$m=50\text{ kg}$ $r_0=0.20\text{ m}$	0.044	0.023

荷重が 0kg から 50kg まで増加しても, 経路追従誤差はほぼ同じである. 制御パラメータ (λ と K) を調整することで, 誤差が軽減されたことが分かる. パラメータ Γ は, 推定則を調整するパラメータであるため, 誤差への影響は殆ど見られない.

Fig.3 より, 異なる荷重変化と重心ずれの時, ほぼ同じ結果が得られたことが分かる. これらの結果により, 提案した適応制御法の有効性が確認された.

5. 結言

本報告では, 全方向移動型歩行訓練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, 本制御法全方向移動型歩行訓練機の適応制御法を提案した. 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訓練機に実装して走行実験による有効性を実証する.

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) 石田健司, 王碩玉, 永野敬典, 岸孝司: 全方向移動型歩行訓練機を用いた運動訓練の有用性, 運動・物理療法, vol.19, no.4, pp. 246-250, 2008.