

デジタル加速度制御法を用いた全方向移動型歩行訓練機の運動制御 ～非線形時変摩擦力による経路追従誤差の抑制～

Motion control of an omni-directional walker using digital acceleration controller
～Inhibition of path tracking error caused by nonlinear time-varying friction～

○小山祐貴, 王碩玉, 姜銀来(高知工科大学), 石田健司(高知大学)

Yuki KOYAMA, Shuoyu WANG, Yinlai JIANG, Kochi University of Technology
Kenji ISHIDA, Kochi University

Abstract: We are developing an omni-directional walker for early recovery of walking ability. Path tracking error, which may affect the effect of training, is currently one of the major problems. The reason for path tracking error is thought to be the nonlinear time-varying friction in the omni wheels. In this report, we propose to inhibit the path tracking error using a digital acceleration controller. A simulation is carried out to test the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Walk rehabilitation, Omni-directional walker, Digital acceleration control, Omni wheel, Friction

1. 緒言

急速に進んでいる超高齢化社会においては歩行リハビリテーションが益々重要となってきた[1]. 加齢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, 現在様々な歩行訓練器具が使用されている. しかし, これら訓練器具は前方歩行の訓練しかできないので, 左右や斜めや回転など多様な歩行訓練を実現できる歩行訓練機が期待されていた. これに対して文献[2]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が開発された. 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歩行訓練ができ, その有効性は臨床試験により示されている[3]. しかし, 全方向移動型歩行訓練機には, 歩行訓練者の症状に応じた訓練メニューに指定される経路から追従誤差が生じる問題があった. 経路追従誤差は繰り返して重ねると, 運動メニューを充実に実現できなくなるうえ, 場合によって訓練スペースから出てきて人や物に当たってしまうことがある. 主な原因の一つとしては, オムニホイールが受ける摩擦が, 歩行訓練機進行方向とオムニホイールの角速度方向とのなす角度に依存する非線形で時变的な摩擦力が生じるためである. 本報告では, 経路追従誤差を低減する目的で, まず非線形かつ時变的な摩擦力の移動方向依存性を数式モデルで表現し, 方向との

定量的関係について解析する. 次に摩擦が経路追従誤差に与える影響を明らかにする. 本報告では, 経路追従誤差を抑制する目的で, まず非線形かつ時变的な摩擦力の移動方向依存性を数式モデルで表現し, 方向との定量的関係について解析する. 次にデジタル加速度制御法を用いて摩擦による経路追従誤差の抑制効果を考察する.

2. 全方向移動型歩行訓練機

2-1 歩行訓練機の概要

Fig.1に開発した全方向移動型歩行訓練機を示す.



Fig.1. Omni-directional walker

特徴として4つのオムニホイールを本体の各頂点に使用することで走行中の車輪軸方向への力を無くすことで全方向移動を可能にしている。オムニホイールを Fig. 2 に示す。



Fig.2. Omni wheel

2-2 歩行訓練機の運動学

歩行訓練機の運動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 Fig3 に示す。

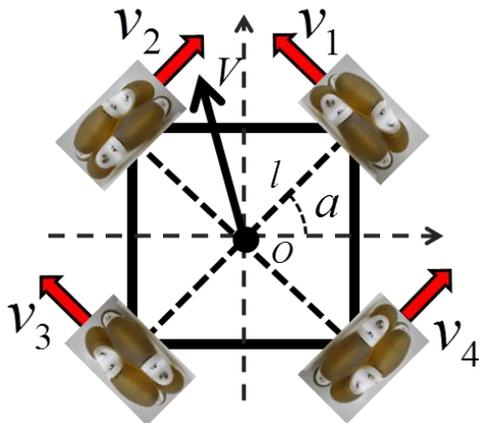


Fig.3. Model of omni-directional walker

V : Velocity of the omni - directional walker

v_i : Velocity of each omni - wheel

l : Distance between omni - wheel and O

θ : Angle between x - axis and arm

モデルより各オムニホイールの速度と歩行訓練機の速度の関係式を求めることができる。また、重心と車輪間の角度を θ と仮定することにより、運動学の一般式は式(1)のように求まる。

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

2-3 歩行訓練機の動力学

歩行訓練機の動力学を式(2)に示す。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\frac{\pi}{2} - \theta) & -\cos \theta & \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) & \cos \theta \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) & -\sin \theta & -\sin(\frac{\pi}{2} - \theta) & \sin \theta \\ L & L & L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. オムニホイールが受ける摩擦

オムニホイールが受ける摩擦について説明する。輪軸方向に取り付けられているフリーローラーによって車輪軸方向の摩擦を無くしている。歩行訓練機のオムニホイール4つを2次元に単純化したモデルとその座標設定を Fig. 4 に示す。

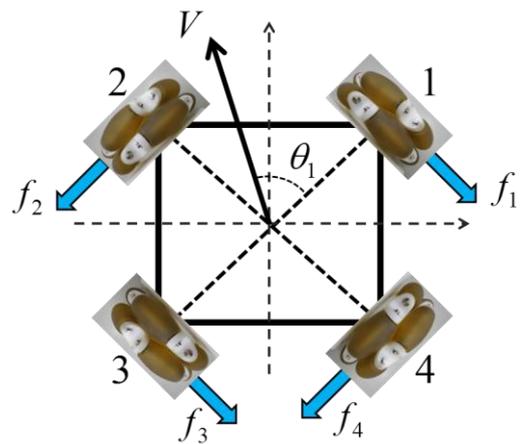


Fig.4. Friction of omni-wheel

f_{μ} : Frictional Force

θ_i : Angle between
direction of movement and arm

モデルにより1つのオムニホイールが進行方向と歩行訓練機の角度によって受ける摩擦力 f_{μ} を式 (3) のように求められる。

$$f_{ui} = \mu Mg \sin \theta_i \quad (3)$$

μ : Coefficient of friction 0.8[N]
 M : Omni-directional walker' mass 58[kg]
 g : Acceleration of gravity 9.8[m/s²]

以上の計算から進行方向の角度を 0° ~ 360° までの各オムニホイールが受ける摩擦力と歩行訓練機が受ける摩擦力の数値計算結果を Fig. 5 に示す。

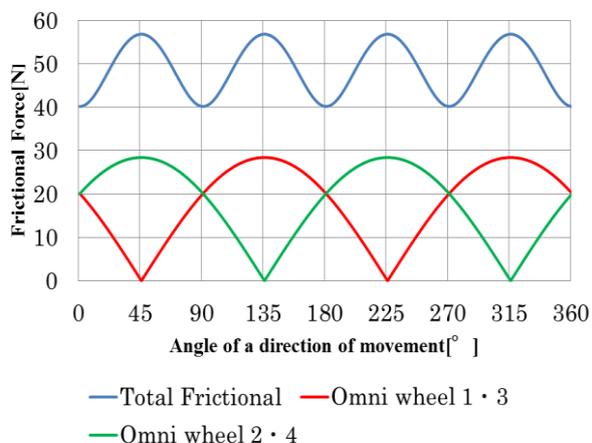


Fig.5. Frictional Force

数値計算結果において縦軸は歩行訓練機、各オムニホイールが受ける摩擦力、横軸は歩行訓練機の進行方向の角度を示している。ここでの進行方向の角度は x 軸方向に進む場合を 0° とする。0° ~ 360° における各オムニホイールが受ける摩擦力の数値計算結果はオムニホイール 1 と 3 がオムニホイール 2 と 4 が同様の摩擦力である事がわかる。歩行訓練機が受ける摩擦力

は進行方向が前後左右方向といった x・y 軸方向の移動時に最も小さく、進行方向が 45°, 135°, 225°, 315° といった、斜め方向の移動時に最も大きいことがわかる。これはオムニホイールがフリーローラによって車輪軸方向の摩擦を無くしているためである。この様に進行方向が変化することによって各オムニホイールと歩行訓練機が受ける摩擦力は異なることがわかる。

4. デジタル加速度制御法による経路追従誤差の抑制

デジタル加速度制御法の有効性を確かめるため x 軸方向へ直進する全方向移動型歩行訓練機の走行シミュレーションを行った。シミュレーション内容は、走行経路が x 軸方向へ直進する経路と円経路の2つの経路で行う。またそれぞれの経路で歩行訓練機の角度を一定に保った状態での走行と歩行訓練機が回転し、進行方向が変化する走行の2通りを行った。x 軸方向へ直進する経路の初期位置は (x=0m, y=0m)、円経路は (x=3m, y=3m)、各経路とも目標速度 0.2[m/s]、目標回転速度 0.1[rad/s]、速度偏差係数位置 Kd=5、偏差係数 Kp=10 とした場合のシミュレーションを行った。シミュレーションの終了条件を開始から 60 秒とし走行した各シミュレーション結果を次に示す。x 軸方法へ直進した場合の歩行訓練機の軌跡結果を Fig. 6 走行速度結果を Fig. 7、円経路の歩行訓練機の軌跡結果を Fig. 8、走行速度結果を Fig. 9 に示す。

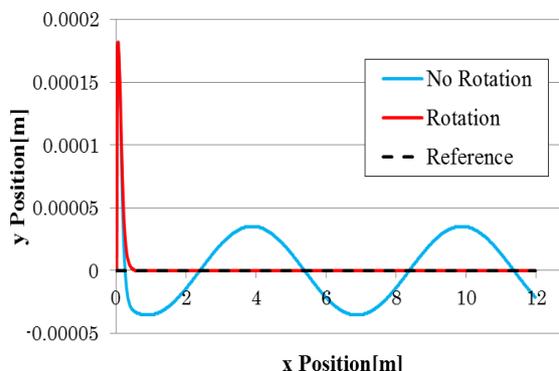


Fig.6. Omni-directional walker's tracking

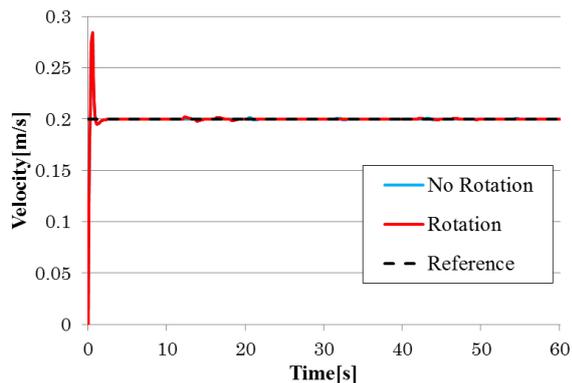


Fig.7. Velocity of the omni-directional walker

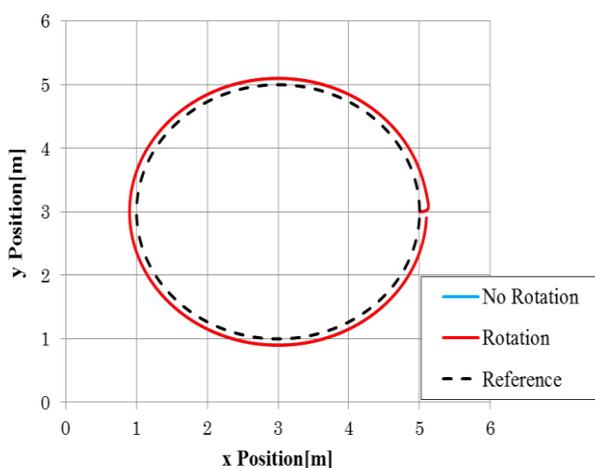


Fig.8. Omni-directional walker's tracking

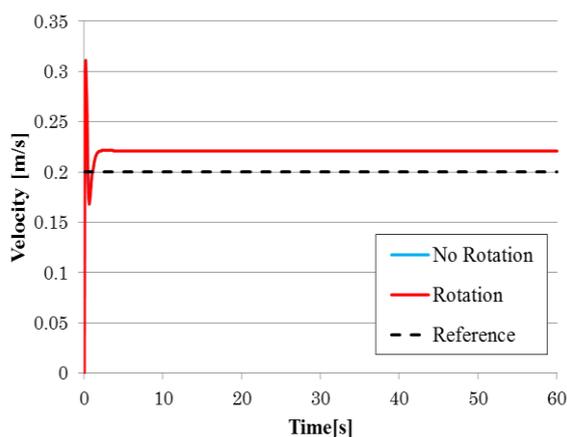


Fig.9. Velocity of the omni-directional walker

まず、目標経路が x 軸方向だった場合のシミュレーション結果は Fig.6 のシミュレーション走行経路結果から進行方向が一定の場合では目標経路に収束

しているが、進行方向が変化する場合では、収束しきれないことがわかった。しかし、経路追従誤差が $0.5[\text{mm}]$ 以下という微小なものだった。また、Fig.7 から速度は目標速度に収束していることがわかる。

次に円経路のシミュレーション結果では Fig.8 から進行方向の変化の有無に関わらず、目標値に収束していないことがわかった。しかし、目標経路との誤差が $0.1[\text{m}]$ 程度であった。

以上の結果から、経路追従誤差がでたものの、微小な誤差なため、デジタル加速度制御法を用いることで、全方向移動型歩行訓練機の経路追従誤差の抑制が可能である。

5. 結言

本報告ではデジタル加速度制御法を用いて全方向移動型歩行訓練機の経路追従誤差の抑制について、シミュレーションにより実験を行った。その結果からデジタル加速度制御法を用いることで、経路追従誤差が生じてしまうが、誤差自体はとても微小なもののため、経路追従誤差の抑制、速度制御をすることが可能であるとわかった。今後は実機実験を行い、実機での経路追従誤差の抑制効果について検証する。

参考文献

- [1]王碩玉, 河田耕一, 井上喜雄, 石田健司, 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]王碩玉, 井上寛之, 河田耕一, 井上喜雄, 永野敬典, 猪野真吾, 石田健司, 木村哲彦: 全方向移動型歩行訓練機の開発と筋力増加の効果検証, 福祉工学シンポジウム 2007 論文集, pp. 176~177 (2007)
- [3]王碩玉: 健康増進・医療・福祉ロボット, 知能と情報, Vol. 19, No. 4, pp. 360-369 (2007)