

全方向移動型歩行訓練機の運動制御

～PI 制御法を用いた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

～inhibition of path tracking error caused by nonlinear time-varying friction using PI controller～

○小山祐貴(高知工科大学), 王碩玉(高知工科大学), 三浦直樹 (高知工科大学)

姜銀来(高知工科大学), 木村彰吾 (高知工科大学), 石田健司(高知大学)

Yuki KOYAMA, Shuoyu WANG, Naoki MIURA, Yinlai JIANG, Syougo KIMURA, Kochi University of Technology.

Kenji ISHIDA, Kochi University.

Key Word: Omni-directional Walker, Running Control, 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, 場合によっては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変的な摩擦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, まず非線形かつ時変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. 最後にPI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. 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.

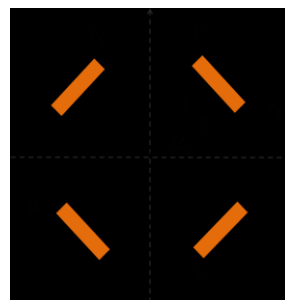


Fig.1 Omni-directional walker and its omni wheel

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.

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 Fig. 2 に示す.



$V$ : 歩行訓練機の移動速度  
 $v_i$ : オムニホイールの速度  
 $l$ : オムニホイールの中心からの距離  
 $\theta$ : 進行方向と歩行訓練機の角度  
 $\alpha_i$ :  $x$ 軸とアームの成す角度  
 $(i = 1, 2, 3, 4)$

Fig. 2 Model of omni-directional walker

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  $\alpha_i$  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.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 & -\cos \alpha_1 & l \\ \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 & l \\ \sin \alpha_3 & -\cos \alpha_3 & l \\ \sin \alpha_4 & -\cos \alpha_4 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2-3 歩行訓練機の動力学

歩行訓練機の前進運動と回転運動のエネルギーをラグランジュの運動方程式に代入して求める. 重心位置を中心とした場合の動力学を式(2)に示す.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = r^2 \begin{bmatrix} \frac{M}{2} + \frac{I}{l^2} & -\frac{M}{2} & \frac{I}{l^2} \\ -\frac{M}{2} & M & -\frac{M}{2} \\ \frac{I}{l^2} & -\frac{M}{2} & \frac{M}{2} + \frac{I}{l^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

求めた式(2)のオムニホイールの半径で割ることにより, オムニホイールの力と加速度の関係式を求めることができる.

### 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. オムニホイールは車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1つを2次元に単純化したモデルとその座標設定を Fig. 3 に示す.

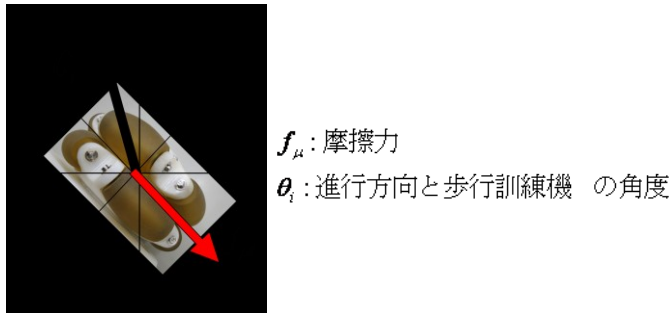


Fig. 3 Friction of omni-wheel

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  $f_{\mu}$  を式 (3) のように求められる.

$$f_{\mu i} = \mu M G \cos \theta_i \quad (3)$$

$\mu$ : 摩擦係数	0.8
$M$ : 歩行訓練機の質量	58 [kg]
$G$ : 重力加速度	9.8 [m / s <sup>2</sup> ]

以上の計算から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合計結果を Fig. 4 に示す.

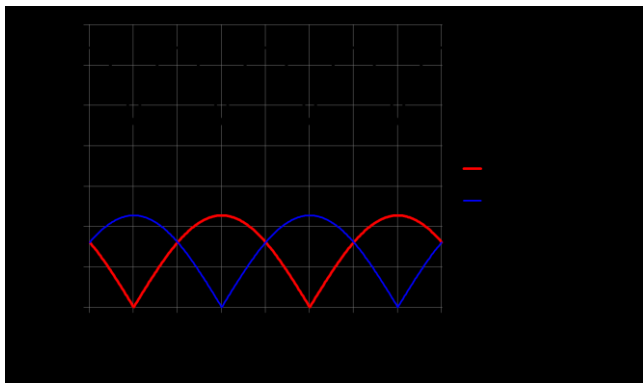


Fig. 4 Frictional Force

オムニホイールが受ける摩擦力は角度によって異なることと歩行訓練機の進行方向によって変化することがわかる.

### 3. PI 制御法による経路追従誤差の抑制効果

様々な移動方向による影響を調べるために, 原点(0m, 0m)から(3m, 0m)までの直線の経路を歩行訓練機が回転している場合としていない場合と原点(0m, 0m)から(0m, 6m)まで半円の経路を描くシミュレーションを PI 制御法を用いて各オムニホイールの速度制御を行った. 設定値は目標速度を 0.2[m/s], 角速度を 0.1[rad/s], 比例ゲインを 20[NS/m], 積分ゲインを 5[N/m]とし, Fig. 5 に直線の経路, Fig. 6 に半円の経路のシミュレーション結果を示す.

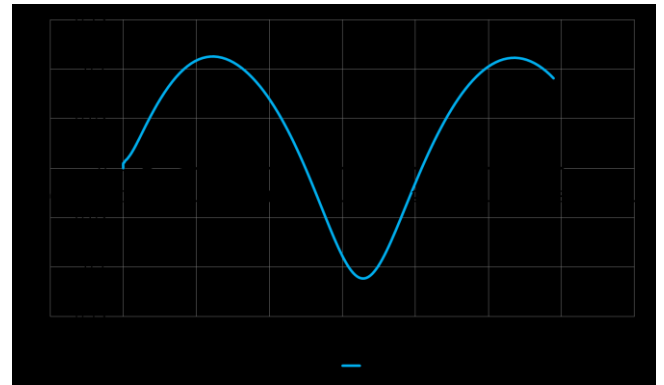


Fig. 5 Path Tracking Result

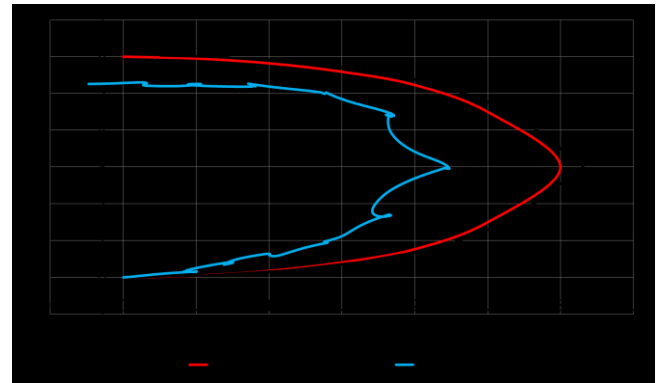


Fig. 6 Path Tracking Result

シミュレーションにおいて縦軸は y 軸方向の移動距離, 横軸は x 軸方向の移動距離である. 両方のシミュレーション共に回転しない場合では若干の誤差に抑制することができているが, 回転している場合では大きな誤差が生じていることがわかる. これは歩行訓練機が回転することにより摩擦力が変化し, 適切な比例ゲインと積分ゲインの値になっていないためだと考えられる. つまり回転している場合では各オムニホイールが受ける摩擦力が常に変化するため, 各オムニホイールに適した比例ゲインと積分ゲインの値を常に変化させる必要があると考えられる.

### 4. 結言

本報告では PI 制御法を用いて直線の経路と半円の経路を歩行訓練機が回転する場合としない場合のシミュレーションを行った. その結果から歩行訓練機が回転していない場合では PI 制御法が有効であるが, 回転した場合は大きな誤差が生じることがわかった. これでは様々な経路を PI 制御法だけで誤差の抑制をすることが不十分であるとわかった. 今後の課題として, 方向依存性のある非線形でかつ時変な摩擦の影響を抑制できる適切な制御法を開発する.

### 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, P. 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, P. 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)