

重心位置の変化を考慮した座位歩行訓練機の運動制御

Motion control of a seated walking training machine considering the shift of the center-of-gravity

○ 渡辺悠人 (高知工科大) 王碩玉 (高知工科大) 譚仁鵬 (高知工科大)

姜銀来 (高知工科大) 石田健司 (高知大) 藤江正克 (早稲田大)

Yuto WATANABE, Kochi University of Technology

Shuoyu WANG, Kochi University of Technology

Renpeng TAN, Kochi University of Technology

Yinlai JIANG, Kochi University of Technology

Kenji ISHIDA, Kochi University

Masakatsu FUJIE, Waseda University

Abstract: Walking is a necessary basic function in daily life, and physical rehabilitation is vital for recovery from various injuries and illnesses. A seated walking training machine is being developed for the patients who cannot stand up to perform walking rehabilitation. However, during training or other movement using this training machine, a path tracking error occurs due to center-of-gravity shift caused by the user. In this paper, an adaptive control method is proposed and simulated. First, the kinematics and the kinetics of the seated walking training machine motion are described. Second, the adaptive control strategy is presented. Finally, path tracking simulations are carried out using the proposed method. Comparison with proportional-integral-derivative (PID) control in simulation experiments demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed adaptive control method.

Key Words: Center-of-gravity shift, Path tracking, Seated walking training machine, Omni-direction

1. 緒言

日本のような少子高齢化社会では、加齢によって事故や病気になり歩行障害を患う人が増加している。彼らに対してリハビリテーションを行うことにより、歩行障害からの回復や改善を行うことができる。現在のリハビリテーションでは、診療報酬は治療期間の目安となる標準的算定日数が疾患別に90日から180日間設けられ、1日6単位（1単位は20分）までを算定できる。医師の判断により標準的算定日数後も同様に算定できるが、リハビリテーションを行う期間、時間が決められている。そのため、早期回復が行えるよう手術直後からの早期リハビリテーションやより効果的なリハビリテーションが望まれている。そこで、効果的なリハビリテーションを行え、かつ介護者の肉体的・精神的負担を軽減できる様々な訓練器具や訓練機が研究開発、販売されている。

現在の歩行リハビリテーションにおいては、寝たきり状態から自立歩行可能となるまでに段階的に様々な訓練が行われている。寝たきりの患者に対して座位が維持できるように行うベッド上訓練、座位から起立が可能となるための起立訓練、そして自立歩行が行えるようになるための歩行訓練などである。各訓練において、ベッド上訓練以外の他の訓練は、起立や歩行の違いはあるもの下肢筋力を鍛えることが重要である。それらの訓練で用いられている現在の歩行訓練器具や訓練機の多くは立位を維持できることを前提としたものである。そこで、本研究室では立位姿勢が維持できない患者でも座位にて下肢筋力を鍛えることが可能な座位歩行訓練機を開発している (1)。座位歩行訓練機による訓練を行う事でより早期から下肢筋力を鍛え、結果としてリハビリテーション全体の早期回復が可能となることを期待している。

しかしながら、開発している座位歩行訓練機には重心位置の変化が原因として考えられる経路追従誤差が生じている。訓練者の重心は姿勢や座り方などで変化するため、座

位歩行訓練機と訓練者による全体の重心もそれに伴い変化し、経路追従誤差が生じていると考えられる。経路追従誤差は理学療法士による訓練への影響や訓練者自身が操作する際の操作性に関わる問題である。本報告では重心位置の変化による経路追従誤差を軽減するため適応制御を用いた制御法を提案する (2)。そして、シミュレーションによりPID制御法と比較することで提案する制御法の有効性を検証する。

2. 座位歩行訓練機

Fig. 1に座位歩行訓練機を示す。座位歩行訓練機は3輪のオムニホイールにより駆動し、全方向移動が可能である。また、ジョイスティックを用いることで訓練者による操作が可能である。

訓練方法としては座位歩行訓練機に座り、訓練者が座位歩行訓練機を操作してその方向へ足を動かすことや、訓練者自身の足により座位歩行訓練機を動かすことで下肢筋力を鍛える。また、移動する方向により異なる下肢の筋肉を鍛えることが可能である。

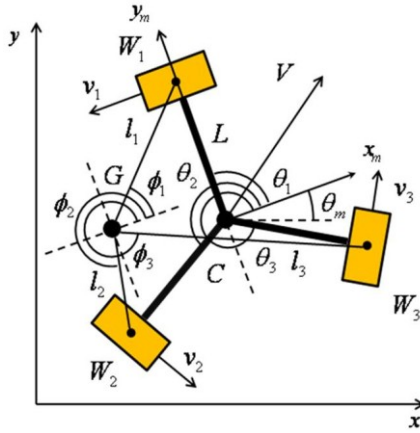


Fig. 1 Seated walking training machine

3. 運動学・動力学

3-1 運動学

Fig. 2 に座位歩行訓練機のモデルを示す. 重心位置は座位歩行訓練機と訓練者との全体の重心位置とする.



$C(x_C, y_C)$: Center of the seated walking training machine

$G(x_G, y_G)$: Center-of-gravity of the training machine

W_i : Position of each omni-wheel

V : Velocity of the training machine

v_i : Velocity of each omni-wheel

θ_m : Orientation angle

θ_i : Angle between the x_m -axis and CW_i

ϕ_i : Angle between the x_m -axis and GW_i

L : Distance between C and W_i

l_i : Distance between G and W_i

($i = 1, 2, 3$)

Fig. 2 Model of the seated walking training machine

このとき, 座位歩行訓練機の重心位置と各オムニホイールの逆運動学式は式 (1) と表せる.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = K_G \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし,

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

また, 座位歩行訓練機の中心位置における各オムニホイールの逆運動学式は式 (2) と表せる.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = K_C \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし,

$$K_C = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1 + \theta_m) & \cos(\theta_1 + \theta_m) & L \\ -\sin(\theta_2 + \theta_m) & \cos(\theta_2 + \theta_m) & L \\ -\sin(\theta_3 + \theta_m) & \cos(\theta_3 + \theta_m) & L \end{bmatrix}$$

そして, 式 (1), (2) より重心位置と中心位置の関係式は式 (3) と表せる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = K_G^{-1} K_C \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

3-2 動力学

訓練者の質量を M , 座位歩行訓練機の質量を m , 重心位置における慣性モーメントを I_G とおくと, 座位歩行訓練機の運動エネルギーは式 (4) と表せる.

$$T = \frac{1}{2} (M + m) (\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2) + \frac{1}{2} I_G \dot{\theta}_m^2 \quad (4)$$

また, ラグランジュの運動方程式を式 (5) に示す.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (5)$$

式 (3), 式 (4), 式 (5) より中心位置での座位歩行訓練機の運動方程式は各オムニホイールに加わる力をそれぞれ

F_1, F_2, F_3 とおくと式 (6) と表せる.

$$A^T M_G A \ddot{X}_C + A^T M_G A \ddot{X}_C = K_C^T F \quad (6)$$

ただし,

$$X_C = [x_C \quad y_C \quad \theta_m]^T$$

$$M_G = \begin{bmatrix} M + m & 0 & 0 \\ 0 & M + m & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix}$$

$$F = [F_1 \quad F_2 \quad F_3]^T$$

この際, 式 (6) における左辺第一項は向心力を表す. 座位歩行訓練機を剛体と見なし, 向心力を考慮する必要がないと仮定すると, 式 (6) は式 (7) と表せる.

$$A^T M_G A \ddot{X}_C = K_C^T F \quad (7)$$

4. 適応制御

4-1 制御則

前章にて述べた座位歩行訓練機の運動学式である式 (7) に対し, 制御アルゴリズムを式 (8), 適応制御則を式 (9) として制御を行った. ここで, X_d は X_C の目標値であり, E は単位行列とする.

$$F = K_G^{-1} \left\{ \hat{M} (\ddot{X}_d + R \ddot{X}_C + \lambda \dot{e}) + K S \right\} \quad (8)$$

$$\dot{\alpha} = \Gamma H S \quad (9)$$

ただし,

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} \hat{M} + \hat{m} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{M} + \hat{m} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{I}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T$$

$$X_d = [x_d, y_d, \theta_d]^T$$

$$R = A - E$$

$$e = X_d - X$$

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} \alpha \ddot{\theta}_c + \ddot{x}_d + \lambda \dot{e}_x & 0 & 0 \\ 0 & \beta \ddot{\theta}_c + \ddot{y}_d + \lambda \dot{e}_y & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}_\theta \end{bmatrix}$$

λ , K , Γ は3次の正定行列を満たす制御パラメータであり、 α はオンラインで質量及び慣性モーメントを推定するパラメータである。

4-2 安定性

リアプノフの安定定理により本制御法の安定性を証明する。リアプノフ関数は式 (10) とした。

$$V = \frac{1}{2} S^T M_G S + \frac{1}{2} \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \Delta \alpha \quad (10)$$

ただし、

$$\Delta \alpha = [\hat{M} + \hat{m} - \alpha_1 \quad \hat{M} + \hat{m} - \alpha_2 \quad \hat{I}_G - \alpha_3]^T$$

このとき、リアプノフ関数の時間微分は式 (7) から式 (9) により式 (11) となる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T M_G \dot{S} + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= S^T M_G (\ddot{X}_d - \ddot{X}_c + \lambda \dot{e}) + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T \{M_G \ddot{X}_c - M_G (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e})\} + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T \{M_G A \ddot{X}_c - M_G R \ddot{X}_c - M_G (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e})\} + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T \left\{ \hat{M} R \ddot{X}_c + \hat{M} (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + K S \right\} + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T \left\{ -M_G R \ddot{X}_c - M_G (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) \right\} + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T K S - S^T (\hat{M} - M_G) (R \ddot{X}_c + (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e})) + \Delta \alpha^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \alpha} \\ &= -S^T K S \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) より時間 $t \rightarrow \infty$ のとき $S \rightarrow 0$ 、すなわち、

$e \rightarrow 0, \dot{e} \rightarrow 0$ となる。すなわち、式 (7) で示す適応制御

アルゴリズムを用いて座位歩行訓練機を制御することで、経路追従誤差を零に収束することが可能である。適応制御のブロック線図を Fig. 3 に示す。

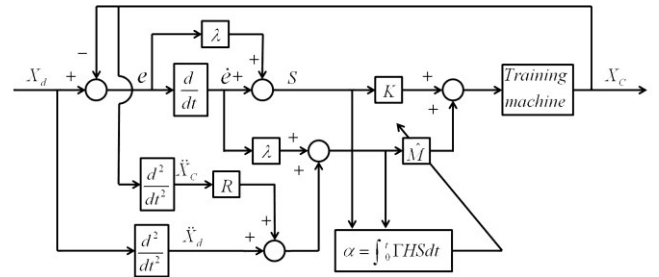


Fig. 3 Block diagram of adaptive control system

5. シミュレーション

式 (8) で示した適応制御アルゴリズムの有効性を検証するためにシミュレーションを行った。その際のパラメータを Table 1 に示す。なお、制御パラメータについては λ , K , Γ のそれぞれにおいて全て同じ値を設定し、質量及び慣性モーメントを推定する α の初期値は 0 とした。

Table. 1 Parameter

Mass of the training machine	38(kg)
Mass of the user	60(kg)
inertia of mass	10(kg m^2)
L	0.38(m)

比較のために同じパラメータ、初期状態、目標軌道にて PID 制御を用いたシミュレーションを行った。PID 制御のブロック線図を Fig. 4 に示す。

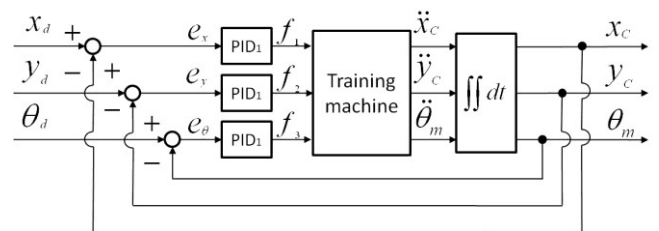


Fig. 4 Block diagram of PID control system

また、座位歩行訓練機の初期位置を式 (12) に示す

$$\begin{cases} (x_c, y_c) = (0.2, 0.2) \\ \theta_m = \frac{\pi}{8} \\ (x_G, y_G) = (0.4, 0.2) \end{cases} \quad (12)$$

時間 t における目標軌道を式 (13) に示す.

$$\begin{cases} x_c = 2 \cos\left(0.1\pi - \frac{\pi}{2}\right) \\ y_c = 2 \sin\left(0.1\pi - \frac{\pi}{2}\right) - 2 \\ \theta_m = 0 \end{cases} \quad (13)$$

このときの x 方向, y 方向, 姿勢角度の目標軌道との誤差の結果を Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す.

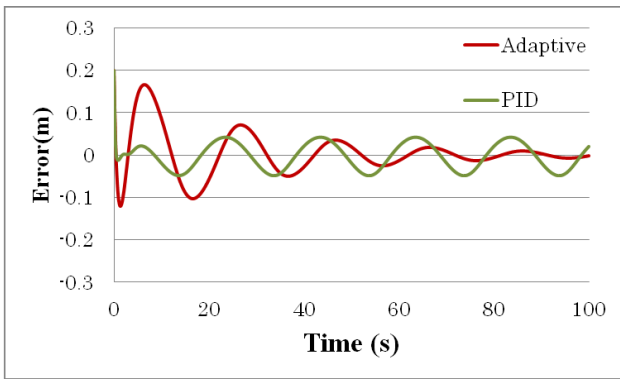


Fig. 5 x distance error

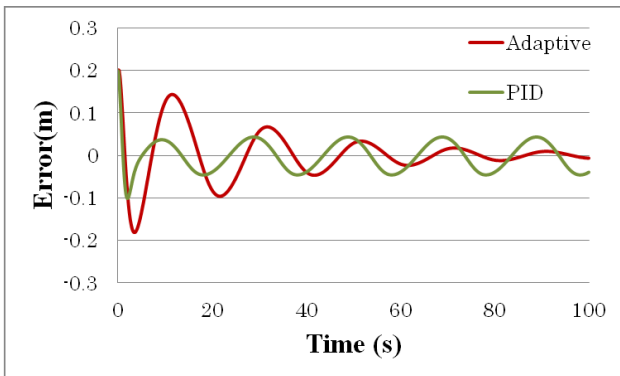


Fig. 6 y distance error

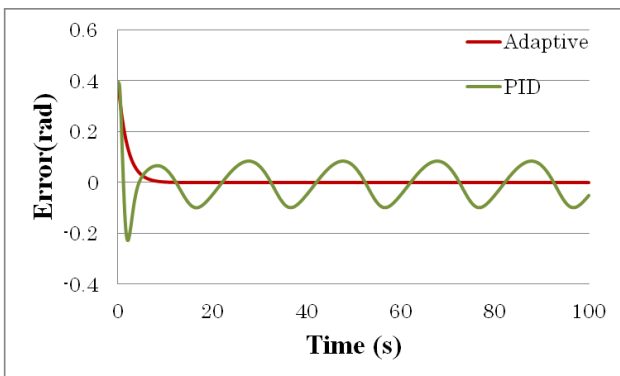


Fig. 7 orientation angle error

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 より PID 制御では誤差が円軌道に応じて一定の振幅で生じていることが分かる. しかし, 適応制御ではシミュレーション開始直後は x 軸方向, y 軸方向の誤差が PID 制御より大きくなったが, 姿勢角度については誤差が速やかに収束しており, また, x 軸方向, y 軸方向の誤差は PID 制御とは異なり誤差が生じているもののその振幅は小さくなっている. 今回のシミュレーションでは初期の推定質量を 0 (kg), 推定慣性モーメントを 0 (kgm²) としたが, 制御パラメータの調節も含め適切な値を選ぶ事でより速やかに誤差が小さくなり収束する事が可能であると考えられる. 従って, 本手法が重心位置の変化に対して効果的であると考えられる. また, 本手法では制御則を用いて質量, 慣性モーメントを同定するため, 訓練者毎による体重の違いによる経路追従誤差についても効果的であることが別の研究で明らかにされている⁽³⁾. しかしながら, 本手法では重心位置と中心位置の関係式を利用した制御であるため, 実機にて実証を行うには別に重心位置を測定する必要である.

6. 結言

座位歩行訓練機は, 座位の維持が可能となった早期から歩行に必要な下肢筋力を鍛えることが可能である. 本報告では, 座位歩行訓練機の重心位置の変化による経路追従誤差を軽減させるために適応制御を用いた制御法を提案した. シミュレーションにより本手法は PID 制御法と比較し重心位置の変化が生じている場合においても経路追従誤差を速やかに収束させることが可能である事を示した. 今後は本手法を用いて実機での実証を行う.

参考文献

- (1) 王 碩玉, 石田 健司, 藤江 正克, "室内移動補助も可能な新型歩行訓練機", 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, pp.283-284, 2009.
- (2) 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 榎勇人, 藤江正克, 永野敬典, 新型歩行訓練器の運動制御, 第28回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2010AC1J1-8, 2010.
- (3) R. Tan, S. Y. Wang, Y. Jiang, K. Ishida and M. Nagano, "Adaptive Controller for Motion Control of an Omni-directional Walker," Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 156-161, Xi'an, China, 2010.