

オムニホイール移動ロボットの斜面における追従性能向上手法の提案

Proposal of improvement method of tracking performance of omni-directional mobile robot on slope

北海道大学 ○山田涼裕, 小林幸徳 江丸貴紀 ラワンカルアンキット

*Ryosuke Yamada, Yukinori Kobayashi, Takanori Emaru, Ankit Ravankar
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract Currently, with the aging of society and the extension of life expectancy, the number of elderly people whose physical functions have declined is increasing. Walking training is effective in preventing such decline, and a walking training machine incorporating robot technology has been proposed. In particular, omni-directional walker using omni wheels that can move in all directions have been studied, but when omni wheels are run on slopes, running stability deteriorates, for example, the straightness is impaired. Therefore, in this paper, we compare the behavior of omni-wheel mobile robots on planes and slopes by applying two control methods, PID control and adaptive control.

Key Words: Omni-directional walker, omni wheel, adaptive control

1 はじめに

現在、社会では産業、サービスといった様々な分野に合わせてロボットやマニピュレータの開発が行われている。その中でも、高齢化を背景に要歩行訓練者が増加していることから、ロボット技術を導入した歩行訓練機によるリハビリテーションの必要性が高まっている。

歩行訓練機は、事故や病気などの後遺症により歩行が困難である患者や加齢によって運動能力が低下した高齢者が安全に歩くための訓練を行う目的で使用される。従来の歩行訓練機はキャスターによって方向転換ができるようになっているが、キャスターの特性上、移動できる軌道に限界があり、方向転換にある程度の力が必要となるため要歩行訓練者にとっては扱いづらい。そこで、オムニホイールを用いた歩行訓練機が提案されている^{[1][4]}。オムニホイールの高い自由度により、前後の動きの訓練だけでなく、左右・回転などを組み合わせた多彩な動作が可能となり、高い歩行訓練効果が期待できる。

歩行訓練機は自力での歩行が困難な状況にある人が利用することから、精密な制御が必要である。要歩行訓練者の中には、立位姿勢をとったときに後方にバランスを崩してしまう人もいる。そのように後方へバランスを崩す症状を持つ患者の障害を改善するために、あえて後方へのふらつきが顕著に出やすい施設内にあるスロープなどの坂道を利用して歩行訓練を行うことで、前方への重心移動を意識づけさせるといったリハビリがなされている^[2]。

ただ、上記のような場面でオムニホイールを斜面で

走行させる場合、直進性が損なわれるなど走行安定性が悪化する。オムニホイール移動ロボットを制御する方法として適応制御法が提案されており、その有効性が主張されているが^{[1][3][5]}、これらの研究では斜面での制御に言及されておらず、精密な制御をするためには斜面での影響がどの程度あるか知る必要がある。そこで本研究では、適応制御を適用し、オムニホイール移動ロボットの平面・斜面における挙動をPID制御および適応制御の2種類の制御法を適用し比較し、平面と斜面でどのような違いがあるか考察する。

2 オムニホイール移動ロボット

2.1 オムニホイール

オムニホイールは本体ホイールの円周上に本体ホイールの軸と直交する樽状のホイールが複数付いている。この樽が回転することで、本体ホイールの回転方向に直交する方向にもフリーで動くことができる。Fig. 1に本研究で使用するオムニホイール(株式会社土佐電子製ウレタンオムニ TYPE2581)を示す。以降では、本体ホイールの回転によって移動する方向を回転移動方向、樽の回転によって移動する方向を滑り移動方向とする。



Fig. 1: オムニホイール。

2.2 実機

本研究では、三菱電機特機システム株式会社製小型全方位ロボット MDT-RO-02 を使用する。Fig. 2 に使用したロボットを示す。モータは「タミヤギヤードモーター 380K75」を使用し、各ホイールにはインクリメンタル型エンコーダ（コパル電子製 RE12D-300-201-1）が取り付けられている。またモータの制御に用いるマイコンは NUCLEO-F446RE を 1 台使用し、4 つのモータを制御する。実験装置の諸元を Table 1 に示す。



Fig. 2: オムニホイール移動ロボット。

Table 1: 実験装置諸元

重量 $M[\text{kg}]$	6.0
中心からオムニホイールまでの距離 $L_w[\text{m}]$	0.15
オムニホイール半径 $r_w [\text{m}]$	0.04
エンコーダ分解能 [rev]	300

2.3 運動方程式

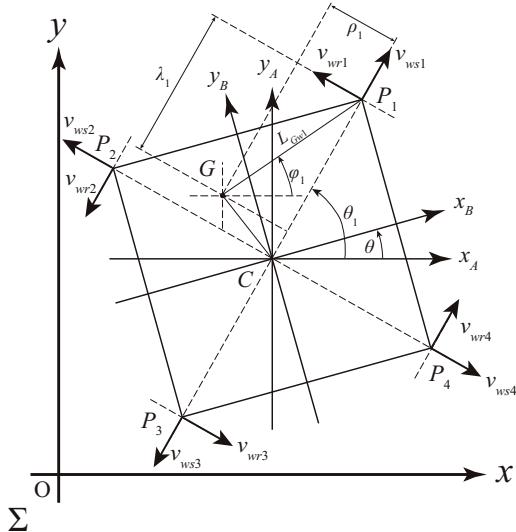


Fig. 3: 移動ロボットのモデル図

本研究で用いる移動ロボットのモデルを Fig. 3 に示

す。図 3 の Σ はグローバル座標系、 Σ_A は移動ロボットの中心を原点とする Σ を平行移動した座標系、 Σ_B は Σ_A をロボットの回転角に合わせて回転移動させた座標系である。 $\mathbf{X}_C = [x_c \ y_c \ \theta]^T$ は Σ におけるロボットの中心位置、 $\mathbf{X}_G = [x_g \ y_g \ \theta]^T$ は Σ におけるロボットの重心位置、 $\mathbf{X}_{BG} = [x_{BG} \ y_{BG}]^T$ は Σ_B における重心位置である。 $\mathbf{v}_{wr} = [v_{wr1} \ v_{wr2} \ v_{wr3} \ v_{wr4}]^T$ はオムニホイールの回転移動方向速度、 $\mathbf{v}_{ws} = [v_{ws1} \ v_{ws2} \ v_{ws3} \ v_{ws4}]^T$ は滑り移動方向速度である。 θ_i は x_A 軸と \overline{CP}_i のなす角、 φ_i は x_A 軸と \overline{GP}_i のなす角である ($i = 1 \sim 4$)。 L_{Gwi} は重心から各ホイールまでの距離、 λ_i は L_{Gwi} の \overline{CP}_i への正射影、 ρ_i は L_{Gwi} の \overline{CP}_i と垂直な方向への正射影である。中心速度 $\dot{\mathbf{X}}_C$ 、重心速度 $\dot{\mathbf{X}}_G$ 、 \mathbf{v}_{wr} 、 \mathbf{v}_{ws} の関係を

$$\mathbf{v}_{wr} = \mathbf{K}_{Cr} \dot{\mathbf{X}}_C \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_{ws} = \mathbf{K}_{Cs} \dot{\mathbf{X}}_G \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_{wr} = \mathbf{K}_{Gr} \dot{\mathbf{X}}_G \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_{ws} = \mathbf{K}_{Gs} \dot{\mathbf{X}}_G \quad (4)$$

とすると、変換行列 \mathbf{K}_{Cr} 、 \mathbf{K}_{Cs} 、 \mathbf{K}_{Gr} 、 \mathbf{K}_{Gs} は幾何学的な関係より次式で表される。

$$\mathbf{K}_{Cr} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & L_{w1} \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & L_{w2} \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & L_{w3} \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & L_{w4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{Cs} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{Gr} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & \lambda_1 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & \lambda_2 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & \lambda_3 \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & \lambda_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{Gs} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & \rho_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & \rho_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & \rho_3 \\ \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & \rho_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

また、重心位置 \mathbf{X}_{BG} が変化する際のロボットの中心速度 $\dot{\mathbf{X}}_C$ と重心速度 $\dot{\mathbf{X}}_G$ の関係式は次のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{K}_{XG} \dot{\mathbf{X}} + \begin{bmatrix} \dot{x}_{BG} \cos \theta - \dot{y}_{BG} \sin \theta \\ \dot{x}_{BG} \sin \theta + \dot{y}_{BG} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{K}}_{XG} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_{BG} \sin \theta - y_{BG} \cos \theta \\ 0 & 1 & x_{BG} \cos \theta - y_{BG} \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & p \\ 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

次に, x_G , y_G , θ について, それぞれ運動方程式を立てる. F_{wri} , $F_{ws i}$ はそれぞれ P_i に加わる回転移動方向 (v_{wri} 方向), 滑り移動方向 ($v_{ws i}$ 方向)の力であり, M は質量, I_G は慣性モーメントである.

$$M\ddot{x}_G = \sum_{i=1}^4 (-F_{wri} \sin \theta_i) + \sum_{i=1}^4 (F_{ws i} \cos \theta_i) \quad (11)$$

$$M\ddot{y}_G = \sum_{i=1}^4 (F_{wri} \cos \theta_i) + \sum_{i=1}^4 (F_{ws i} \sin \theta_i) \quad (12)$$

$$I_G \ddot{\theta} = \sum_{i=1}^4 (\lambda_i F_{wri}) + \sum_{i=1}^4 (\rho_i F_{ws i}) \quad (13)$$

上式をまとめて行列表記すると次式となる.

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{K}_{Gr}^T \mathbf{F}_{wr} + \mathbf{K}_{Gs}^T \mathbf{F}_{ws} \quad (14)$$

これを移動ロボット中心についての式に変形して, 次の運動方程式を得る.

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}}_C + \mathbf{M}_2 \dot{\mathbf{X}}_C + \mathbf{M}_3 = \mathbf{K}_{Cr}^T \mathbf{F}_{wr} + \mathbf{K}_{Cs}^T \mathbf{F}_{ws} \quad (15)$$

なお, $\mathbf{M}_0 \sim \mathbf{M}_3$ は以下のようなになる.

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} M & 0 & pM \\ 0 & M & qM \\ pM & qM & I_G + M(x_{BG}^2 + y_{BG}^2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{p}M \\ 0 & 0 & \dot{q}M \\ 0 & 0 & M(x_{BG}\dot{x}_{BG} + y_{BG}\dot{y}_{BG}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \dot{x}_{BG} \cos \theta - \dot{y}_{BG} \sin \theta - \dot{x}_{BG} \dot{\theta} \sin \theta - \dot{y}_{BG} \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{x}_{BG} \sin \theta + \dot{y}_{BG} \cos \theta + \dot{x}_{BG} \dot{\theta} \cos \theta - \dot{y}_{BG} \dot{\theta} \sin \theta \\ x_{BG}\ddot{y}_{BG} - y_{BG}\ddot{x}_{BG} + x_{BG}\dot{y}_{BG}\dot{\theta} + y_{BG}\dot{y}_{BG}\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 制御

3.1 PID 制御

中心速度の目標値 $\dot{\mathbf{X}}_{Cd}$ を与え, 式(1)を用いて各ホイールの速度目標値 v_{wrd} を得る. そして各ホイールでPID制御を行う. PIDコントローラは次式で表される.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

$$e(t) = r(t) - v_w(t) \quad (21)$$

ここで $u(t)$: 制御入力, $e(t)$: 偏差, $r(t)$: 目標値, $v_w(t)$: 出力, K_P : 比例ゲイン, K_I : 積分ゲイン, K_D : 微分ゲインである. 以下のTable 2に本研究で用いた制御ゲインの値を示す.

Table 2: PID 制御ゲイン

K_P	1.2
K_I	10.0
K_D	0.0

3.2 適応制御

3.2.1 摩擦特性

適応制御で扱うオムニホイールの摩擦特性について述べる. 回転移動方向の摩擦特性については, 荷重に比例するクーロン摩擦と速度に比例する粘性摩擦の和とする. また, ここでは滑り移動方向の摩擦は考慮しないことにする. 従って, 各オムニホイールにかかる荷重を m_i , 回転移動方向のクーロン摩擦係数を μ_{rci} , 粘性摩擦係数を $\mu_{rv i}$ としたとき, 回転移動方向の摩擦力 \mathbf{F}_{wrf} は次のようになる^[3]. ここで, $\text{sign}()$ は符号関数である.

$$\mathbf{F}_{wrf} = \begin{bmatrix} -m_1 g \mu_{rc1} \text{sign}(v_{wr1}) - \mu_{rv1} v_{wr1} \\ -m_2 g \mu_{rc2} \text{sign}(v_{wr2}) - \mu_{rv2} v_{wr2} \\ -m_3 g \mu_{rc3} \text{sign}(v_{wr3}) - \mu_{rv3} v_{wr3} \\ -m_4 g \mu_{rc4} \text{sign}(v_{wr4}) - \mu_{rv4} v_{wr4} \end{bmatrix} \quad (22)$$

3.2.2 適応制御コントローラ

式(15)より, 移動ロボットの推定値である $\hat{\mathbf{M}}_1$, $\hat{\mathbf{M}}_2$, $\hat{\mathbf{M}}_3$, および摩擦力 $\hat{\mathbf{F}}_{wrf}$ を次のように置く.

$$\hat{\mathbf{M}}_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \alpha_2 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_3 \\ \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{M}}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha_5 \\ 0 & 0 & \alpha_6 \\ 0 & 0 & \alpha_7 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{M}}_3 = \begin{bmatrix} \alpha_8 \\ \alpha_9 \\ \alpha_{10} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{wrf} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} \text{sign}(v_{wrd1}) + \alpha_{15} v_{wrd1} \\ \alpha_{12} \text{sign}(v_{wrd2}) + \alpha_{16} v_{wrd2} \\ \alpha_{13} \text{sign}(v_{wrd3}) + \alpha_{17} v_{wrd3} \\ \alpha_{14} \text{sign}(v_{wrd4}) + \alpha_{18} v_{wrd4} \end{bmatrix} \quad (26)$$

α_j ($j = 1, \dots, 18$) は推定パラメータであり, α_j は 2 つのベクトルによって定義される.

$$\boldsymbol{\alpha}_1 = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{10}]^T \quad (27)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_2 = [\alpha_{11} \ \alpha_{12} \ \dots \ \alpha_{18}]^T \quad (28)$$

制御入力 \mathbf{u}_{ADP} と推定パラメータ $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2$ の更新式は次のように表される.

$$\mathbf{u}_{ADP1} = (\mathbf{K}_{Cr}^T)^+ (\hat{\mathbf{M}}_1 \ddot{\mathbf{X}}_d + \hat{\mathbf{M}}_2 \dot{\mathbf{X}}_d + \hat{\mathbf{M}}_3 + \mathbf{K}\dot{\mathbf{e}}) \quad (29)$$

$$\mathbf{u}_{ADP2} = \hat{\mathbf{F}}_{wrf} \quad (30)$$

$$\mathbf{u}_{ADP} = \mathbf{u}_{ADP1} + \mathbf{u}_{ADP2} = (\mathbf{K}_{Cr}^T)^+ \boldsymbol{\tau} \quad (31)$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 = \boldsymbol{\Gamma}_1 \mathbf{H}_1 \dot{\mathbf{e}} \quad (32)$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_2 = \boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{H}_2 \dot{\mathbf{e}}_w \quad (33)$$

ここで,

$$(\mathbf{K}_{Cr}^T)^+ = \mathbf{K}_{Cr} (\mathbf{K}_{Cr}^T \mathbf{K}_{Cr})^{-1} \quad (34)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}_C \quad (35)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_w = \mathbf{v}_{wrd} - \mathbf{v}_{wr} \quad (36)$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{cd} & \ddot{y}_{cd} & 0 \\ \ddot{\theta}_{cd} & 0 & \ddot{x}_{cd} \\ 0 & \ddot{\theta}_{cd} & \ddot{y}_{cd} \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_{cd} \\ \dot{\theta}_{cd} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\theta}_{cd} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\theta}_{cd} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$\mathbf{H}_2 =$

$$\begin{bmatrix} \text{sign}(v_{wrd1}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sign}(v_{wrd2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{sign}(v_{wrd3}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{sign}(v_{wrd4}) \\ v_{wrd1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{wrd2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_{wrd3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_{wrd4} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$\mathbf{X}_d = [x_{Cd}, y_{Cd}, \theta_d]^T$ はロボットの目標位置であり, $\mathbf{v}_{wrd} = [v_{wrd1}, v_{wrd2}, v_{wrd3}, v_{wrd4}]$ は各車輪の目標速度

である. そして,

$$\mathbf{K} = \text{diag}(K_1, K_2, K_3) \quad (39)$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_1 = \text{diag}(\Gamma_1, \dots, \Gamma_{10}) \quad (40)$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_2 = \text{diag}(\Gamma_{11}, \dots, \Gamma_{18}) \quad (41)$$

はそれぞれ対角行列で表される適応制御のゲインである. 以下の Table 3 に本研究で用いた制御ゲインの値を示す.

Table 3: 適応制御ゲイン					
K_{s1}	0.1	Γ_5	0.01	Γ_{11}	0.1
K_{s2}	0.1	Γ_6	0.01	Γ_{12}	0.1
K_{s3}	0.1	Γ_7	0.01	Γ_{13}	0.1
				Γ_{14}	0.1
				Γ_1	0.1
				Γ_8	0.01
				Γ_{15}	1.0
				Γ_2	0.01
				Γ_9	0.01
				Γ_{16}	1.0
				Γ_3	0.01
				Γ_{10}	0.01
				Γ_{17}	1.0
				Γ_4	0.01
					Γ_{18}
					1.0

4 実験

オムニホイール移動ロボットの斜面での経路追従性能を測るために, 上記の PID 制御と適応制御の 2 種類の制御法を用い, 平面および斜面で走行実験を行い比較した. また, 制御性能を比較するため直進移動と長方形移動といった 2 つの条件でも比較した. 実験環境と座標の定義を Fig. 4 に示す. 斜面での実験時は斜面方向に y 軸をとる. 直進移動については, y 方向に速度 0.1[m/s] で 8 秒間直進するように (目標座標が (0, 0.8)) 目標値を設定した. 長方形移動については, 縦 0.8[m], 横 0.5[m] の長方形上を速度 0.1[m/s] で走行するように (目標座標が (0, 0)) 目標値を設定した. なお, 実験で用いた斜面の勾配は 10° である.

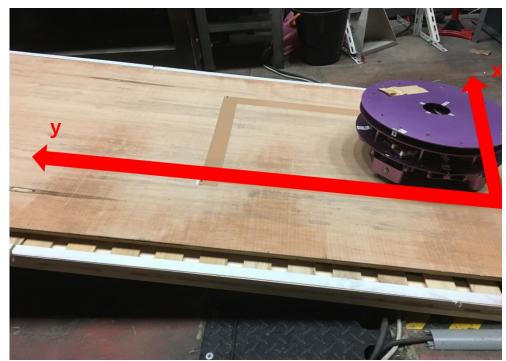


Fig. 4: definition of xy coordinates.

PID 制御での結果を Fig. 5~8 に示し、適応制御での結果を Fig. 9~12 に示す。平面で直進させた場合、Fig. 5 と Fig. 9 より両者ともほとんど誤差なく目標位置に達しており、エンコーダにより推定したロボットの経路については適応制御の方が目標経路を追従できている。また平面で長方形移動させた場合、Fig. 6 と Fig. 10 より最終位置と推定経路ともに適応制御の方が精度が高い。次に斜面での実験結果を比較する。直進させた場合、Fig. 7 と Fig. 11 より PID 制御については平面の場合と比較して目標位置と最終位置との差が大きくなっている。適応制御については平面の場合と比較して最終位置と推定経路ともにほとんど変わっていない。長方形移動させた場合は、Fig. 8 と Fig. 12 より、PID 制御と適応制御ともに y 方向の誤差が 0.1[m] であり平面の場合より大きくなっている。

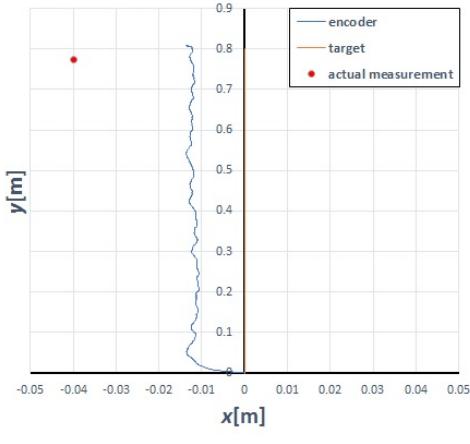


Fig. 5: PID-plane-straight.

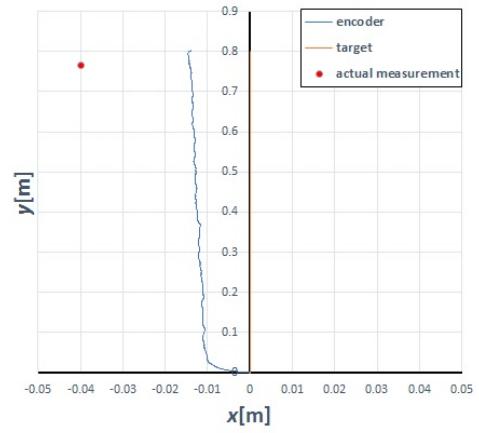


Fig. 7: PID-slope-straight.

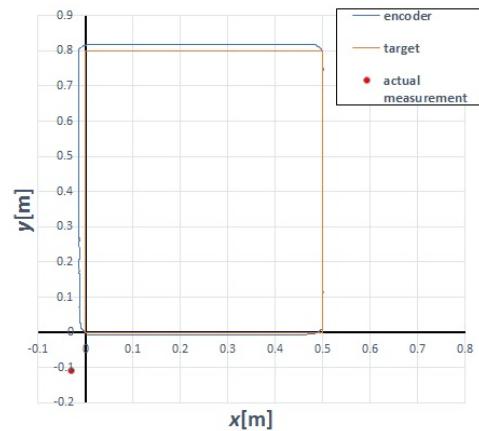


Fig. 8: PID-slope-square.

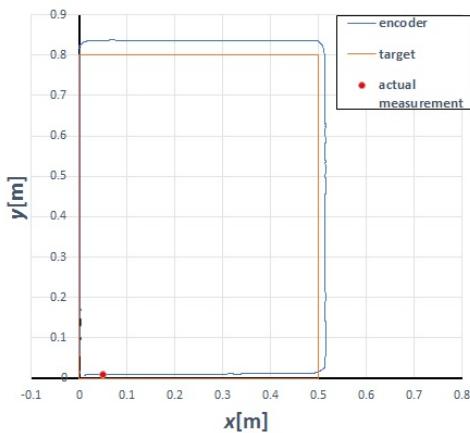


Fig. 6: PID-plane-square.

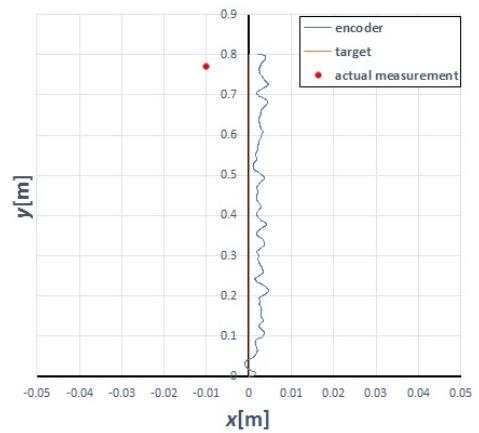


Fig. 9: ADP-plane-straight.

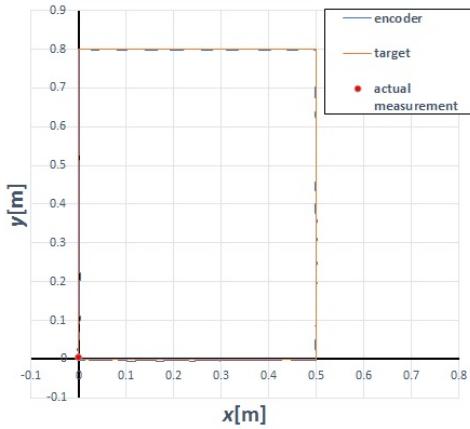


Fig. 10: ADP-plane-square.

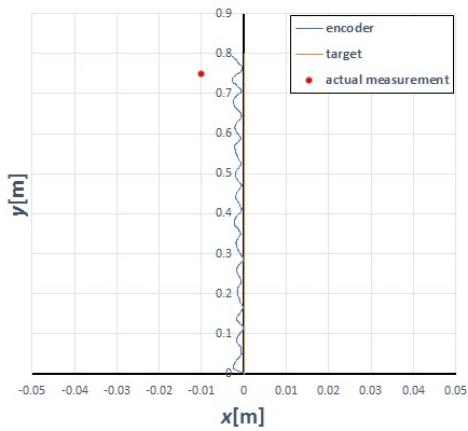


Fig. 11: ADP-slope-straight.

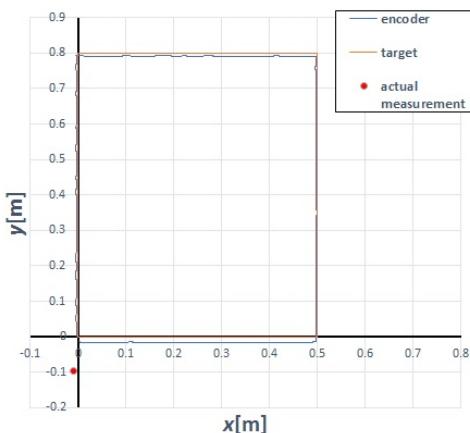


Fig. 12: ADP-slope-square.

5 結論

本研究では、オムニホイール移動ロボットの平面・斜面における追従性能とエンコーダによる推定経路をPID制御および適応制御の2種類の制御法を適用し比較した。平面では、適応制御を適用した場合の方が追従性能と推定経路ともにPID制御よりも精度が良く、目標との誤差も小さいことが確認できた。斜面では、適応制御の方が目標経路と推定経路の誤差が小さかったが、平面の場合と比べてPID制御と適応制御ともに目標位置との誤差が大きくなることがわかった。

参考文献

- [1] Tan Renpeng, Wang Shuoyu, Jiang Yinlai, "Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Improvement of Dynamic Model", Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.325-330, (2011)
- [2] ケアプラス デイサービスセンター、ケアプラス 北宇和島 リハビリ便り 歩行訓練, <http://www.carep.jp/?p=2794>
- [3] 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀來, 石田健司, 藤江正克, "中心座標系における歩行訓練機の適応制御法", 第54回自動制御連合講演会, (2011)
- [4] 根本翔太, 江丸貴紀, 小林幸徳, "オムニホイール移動ロボットの機構解析による特性モデルの提案", 第32回日本ロボット学会学術講演会, (2014)
- [5] Kota Kawamura, Takanori Emaru, Yukinori Kobayashi, Ankit A. Ravankar, "Adaptive Control for Omnidirectional Wheeled Robot", SICE International Symposium on System Integration (SII), (2016)