G-03

外乱オブザーバとすべり制御による全方向移動ロボットの横ずれ補正

Skid correction of Omnidirectional Mobile Robot by Disturbance Observer and Slip Control

○非 西田 幸司 （東電大）　　正 五十嵐 洋 （東電大）

Koji NISHIDA, Tokyo Denki University, Adachi-ku, Tokyo
Hiroshi IGARASHI, Tokyo Denki University

Recently, the robots which work in a hospital and factory have developed. The robot is expected to omni-directional motion to move in limited space. For Mecanum wheels to be used in the wheels of the omni-directional mobile robot has a complex structure. It's depends on the situation of the road surface. Also, the motion control on the assumption of slip control becomes to be difficult with slippery road surface. In this study, the development of the omni-directional mobile robot equipped with Mecanum wheels. And in order to improve the motion of the efficiency, it performs a slip correction and disturbance observer are proposed. Finally the running performance in the actual road surface is verified.

Key Words : Moving Robot, Mecanum wheels, Slip Control

1. はじめに

現在, 工場や病院, 倉庫などで働く各種の移動ロボットの開発がされている. 移動ロボットには車両型と歩行型があるが, 車両型移動ロボットは歩行ロボットに比較して移動が容易で効率が良いという利点を持つ [(1)]. そのため, 平坦地の移動に限れば歩行ロボットに取って変わることがないと考えられる. こうした作業を行うロボットは任意の方向に自由自在に動き回れる全方向移動方式が有効であり [(2)], 全方向移動可能なホイールを搭載した車両型移動ロボットが開発されている.

車輪型の全方向移動ロボットは通常と比較して姿勢を維持したまま移動が可能な利点を持つため, 自由に走行経路が取れない場所での資材の搬送作業に適している [(3)]. そのため今後, 建設現場の新たな分野へ活用が期待される.

しかし全方向移動ロボットは通常の車輪と比較してすべりが発生するため, 横ずれに考慮する必要がある [(4)]. また車輪の構造が複雑なため, 路面の状況によっては安定した移動が困難になる. こうした安定性や横ずれの問題によって使用範囲や移動速度が制約となり, 搬送等における作業効率が低下してしまう. ゆえに, 今後建設現場のような他の路面状況で全方向移動ロボットを活用させるためには, 上記の問題を解決する必要がある.

本研究では全方向移動可能な機構を持つメカナムホイールを搭載した全方向移動ロボットの開発を行う. そして効率の良く移動するために, 外乱オブザーバを用いて, 車輪にかかる外乱を低減する制御とすべり制御を行い, 車両の速度の観点から評価し, 横ずれの低減を目指す.

Table 1　Specifications of Robot

PARTS	RATING
DC motor	12V gear rate 21:1
motor driver	Titech motor driver JW-143-2
motor power supply	NiH_2 battery12V 2200mAh
controller power supply	Li-ion battery 5V 2000mAh
Mecanum wheel	frame:ABS Barrel:gum

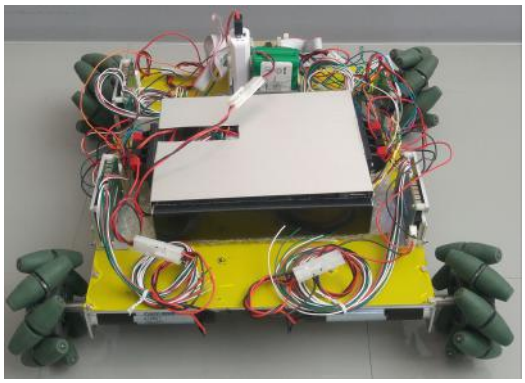


Fig. 1　Omni-directional mobile robot



Fig. 2　Mecanum wheels

2. 全方向移動ロボットの概要

2・1　全方向移動ロボット　製作した全方向移動ロボットを Fig. 1 に示す. また全方向移動ロボットに使用した部品の定格を Table 1 に示す. Table 1 から, RF モジュールを搭載しており, Bluetooth を通じてシリアル通信を行なっている. また DC モータを 4 つ搭載しており, モータドライバからそれぞれ電流制御を行っている. モータドライバに付属する電圧モニタより各モータの速度を取得している. 3 軸加速度センサを搭載しており, 本研究では X 軸と Y 軸の加速度を計測している.

2・2　メカナムホイール　全方向移動ロボットの車輪には Fig. 2 に示すメカナムホイールを用いている. メカナムホイールは Swedish 社によって開発された全方向移動可能な車輪の一つである. Fig. 2 に示すように車輪表面に対して 45° 傾けた自由に回転可能な複数のローラに覆われた構造をしており, 車体に 4 輪搭載して用いる. 前進させるためには, 4 輪すべてを前進方

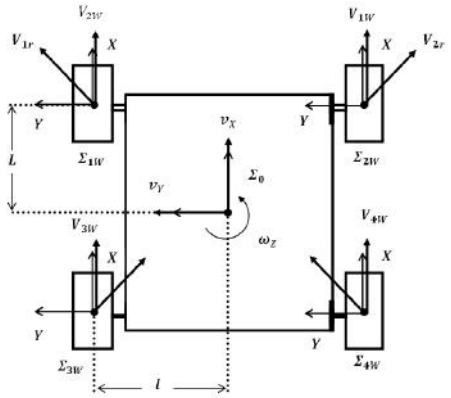


Fig. 3　Disposition of mecanum wheels and frames

向に回転させる．このとき前輪では内側の推力が打ち消され，後輪では外側の推力が打ち消され，前進方向に推力が残るため前進することになる．横移動を行う場合は対角線上の車輪を対として一方を正転，他方を逆転させることで，推力ベクトルは左右になり横移動を行う．すなわち，各ホイールの回転速度と方向を変化させることで全方向移動が可能となる．

同様な全方向移動車輪としてオムニホイールがあるが，メカナムホイールは推進力に優れている利点を持っている．そのため，多少の段差のあるような場所でも走行が可能となっている．

2・3　車両の運動学　Fig. 3 は全方向移動ロボットの接地状態を表す．各 Σ_0 , Σ_{iW} (i=1, 2, 3, 4) $\in R$ はそれぞれボディと車輪の座標系を示している．ここで $V_{iW}=R_W\,\dot{\theta}_i$ (i=1, 2, 3, 4)$\in R$ は各車輪の速度，R_W はホイールの半径，縦方向と横方向の車輪間距離をそれぞれ $2L$ と $2l$ である．$\dot{\theta}_i$ は車輪の回転角速度であり，V_{ir}(i=1, 2, 3, 4)$\in R$ は床に触れるローラの接線速度である．車輪の周速度と角速度の関係から以下の式 (1) が求まる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_W}\begin{bmatrix} 1 & 1 & -(L+l) \\ -1 & 1 & (L+l) \\ 1 & 1 & -(L+l) \\ 1 & -1 & (L+l) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \tag{1}$$

ただし，v_X, v_Y, ω_Z 直交座標系の目標速度と目標角速度であり，$\dot{\theta}_i$ は各車輪の回転速度である．また各車輪に必要な速度を以下の式 (2) のように表すことができる[5]．

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \frac{R_W}{4}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -\frac{1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} & -\frac{1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \tag{2}$$

2・4　すべり制御　モータのトルクは以下の式 (3) のようにモデル化が可能である．

$$\tau = J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} \tag{3}$$

ただし J は質量係数，D は粘性係数，θ はモータの回転角度である．この質量係数や粘性係数はシステム同定を行って求める．システム同定を行った結果を Table 2 に示す．

今回開発した実機には外乱オブザーバ (DOB)[6] を導入している．DOB のブロック線図を Fig. 4 に示す．DOB とは推定した外乱を入力にフィードバックさせることにより，外乱を打消し目標値に追従させる制御である．

Table 2　Results of system identification

	mass coefficient	viscisity coefficient
front right	0.000394	0.00955
front left	0.0000341	0.0101
rear right	0.0000378	0.0104
rear left	0.0000393	0.00549

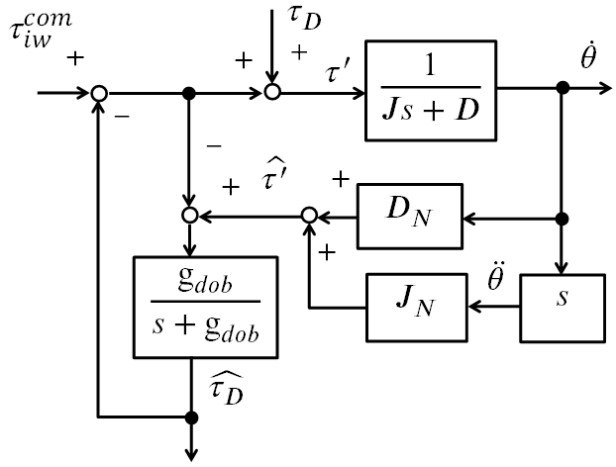


Fig. 4　Block diagrams of Disturbance Observer

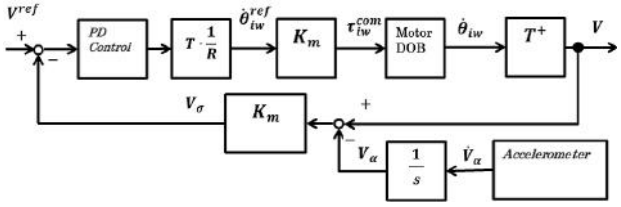


Fig. 5　Block diagrams of Slip control

式 (3) を用いながら，モータドライバから取得した疑似速度により，モータに印加された外乱を推定していく．推定した外乱をフィードバックさせることにより，外乱を打消すことが出来る．本研究では DOB を用いることにより外乱に対して安定した移動制御を行う．

また本研究では車両のすべりを低減する制御を行う．すべり制御のブロック図を Fig. 5 に示す．Fig 3 において加速度センサから積分して得られた X 軸，Y 軸の速度をそれぞれ $V_{\alpha X}$，$V_{\alpha Y}$ とする．式 (2) からモータードライバから得た速度をそれぞれ V_X，V_Y とする．本研究でのすべり σ=[σ_X,σ_Y] をすべり速度として以下の式 (4) として定義する．

$$\begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_X \\ k_Y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_X - V_{\alpha X} \\ V_Y - V_{\alpha Y} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式 (4) において k_X および k_Y は比例ゲインである．すべり速度 σ を目標速度にフィードバックすることで，X 軸，Y 軸成分について移動補正を行う

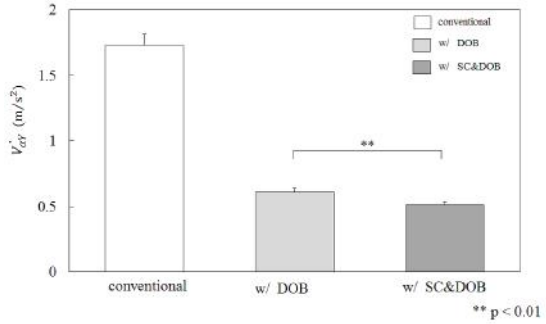


Fig. 6　Mean Square of the mobile robot acceleration

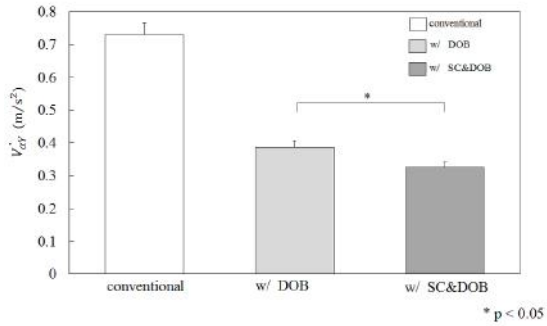


Fig. 7　Mean Square of the mobile robot acceleration

3. 実験概要および結果

まず初めにすべり制御を行う際の事前実験として，すべり制御の有効性を検証する．実験は屋内と屋外で 5 mの距離ををを X 軸方向に前進させたときの，Y 軸成分の加速度について評価を行う．比較として何も移動補正を導入していない場合，外乱オブザーバを導入した場合，外乱オブザーバにすべり制御を導入した場合について行う．

実験結果は屋内の結果を Fig. 6，屋外の結果を Fig. 7 にそれぞれ示し，加速度は定数倍した値を二乗平均している．

式 (2) から，Y 軸成分に関しては加速度においても 0 に近くなるにつれ効率良くすべっていることになる．Fig. 6 から屋内でのすべり制御を用いた場合が 0.511($p < 0.01$) となった．また Fig. 7 から屋外でのすべり制御を用いた場合が 0.325($p < 0.05$) となった．よって，Y 軸成分においてすべり制御を用いた場合の加速度成分が低減されため提案法の有効性を確認することが出来た．

次に Fig. 8 に示すように屋内外で 8 の字に周回させる実験を行なった．この実験では式 (4) のすべり速度 σ_X,σ_Y について評価を行う．比較として同様に何も移動補正を導入していない場合，外乱オブザーバを導入した場合，外乱オブザーバにすべり制御を導入した場合について行う．$V_X{}^{com}$，$V_Y{}^{com}$ それぞれ以下の速度で指令を行う．

$$V_X{}^{com} = -0.8cos\omega t \tag{5}$$

$$V_Y{}^{com} = 0.8sin\omega t \tag{6}$$

屋内の実験結果を Fig. 9，Fig. 10 に屋外の実験結果を Fig. 11，Fig. 12 にそれぞれ示し，実験結果はすべり速度 σ_X と σ_Y の二乗平均した結果を示している．式 (4) においてすべり速度は 0 に近くなるにつれ車体

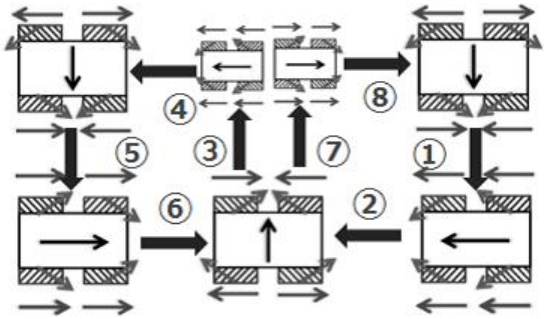


Fig. 8　8 characters Movement

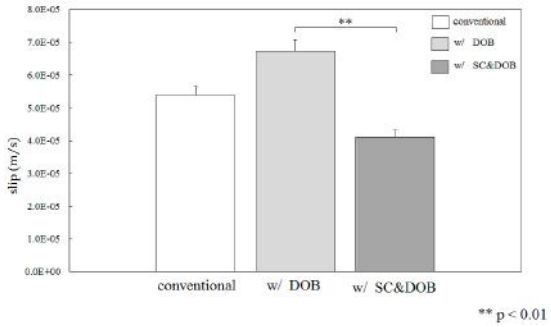


Fig. 9　Slip speed of Longitudinal direction in indoor

がずれずに効率良くすべっていることになる．Fig. 9, Fig. 10 から屋内の実験ではすべり制御を用いた場合が 4.11×10^{-5}($p < 0.01$)，1.35×10^{-4}($p < 0.05$) となり最も低減することが出来た．また Fig. 11，Fig. 12 から屋外の実験ではすべり制御を用いた場合が 5.07×10^{-5} ($p < 0.05$)，1.76×10^{-4} ($p < 0.05$) となり最も低減することが出来た．よって，X，Y 軸成分それぞれにおいてすべり制御を用いた場合の速度成分が低減されため提案法の有効性を確認することが出来た．

屋内屋外共に DOB を用いた場合の縦方向のすべり速度が高くなってしまった．原因としては DOB を導入したことによって路面に対して過剰に働いた補正が累積したと考えられる．こうした過剰分に対してもすべり制御の補正が確認された．また今回の実験結果から提案法は縦方向に移動時の横ずれと比べ，横方向に移動時の横ずれの補正が低かったと推測される．DOB による影響も考えられるが，横移動時のすべり制御のパラメータの調整も必要であると思われる．

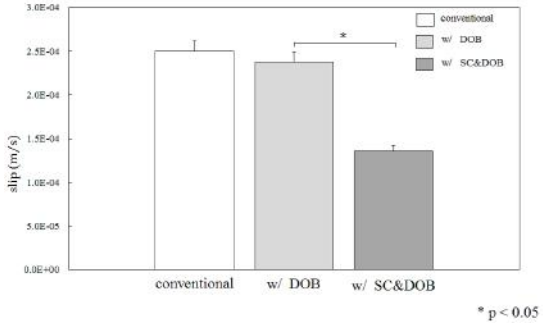


Fig. 10　Slip speed of Lateral direction in indoor

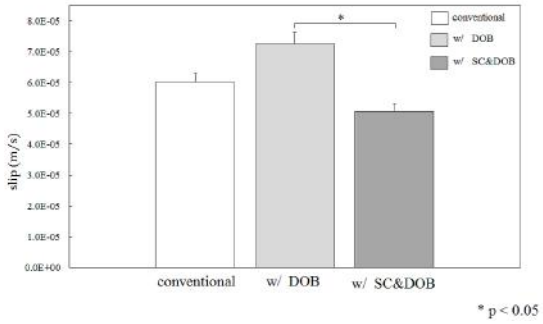


Fig. 11　Slip speed of Longitudinal direction in outdoor

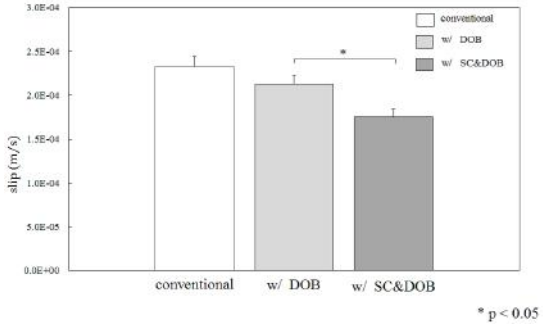


Fig. 12　Slip speed of Lateral direction in outdoor

4. おわりに

本研究では路面のすべりに応じた全方向ロボットの開発を行った．また外乱オブザーバとすべり制御による移動補正を行い，実際の路面での検証を行った．事前実験の結果として屋内と屋外の場所で X 軸方向に前進させてそのときの Y 軸方向加速度成分を評価した．その結果，提案法を用いた場合の Y 軸の加速度成分の低減が確認され，すべり制御の有効性が検証された．また屋内外で８の字に周回させたときの X 軸方向，Y 軸方向それぞれのすべり速度について評価を行った．その結果，提案法を用いた場合の X 軸方向，Y 軸方向のすべり速度の最も低減したことが確認され，すべり制御の有効性が認められた．

今後の課題として他の路面で提案法の検証を行い車両のさらなる横ずれの低減を目指す．

文　献

(1) 細谷正廣, “メカナムホイールを用いた全方向移動車の製作”, Research report of Yamagata College of Industry Technology No. 11, pp. 81-84, 2005.
(2) 米田完, 坪内孝司, 大隅久, “はじめてのロボット創造設計改訂第 2 版” , 講談社, 2013.
(3) 高橋隆行, 横田尚大, 王志東, 森善一, 中野栄二,“車両幅可変型全方向移動ロボットの機構と制御”, 日本ロボット学会誌 Vol 19, No. 5, pp. 638-645, 2001.
(4) Sang Won Yoon, Seong-Bae Park, and Jong Shik Kim,“Kalman Filter Sensor Fusion for Mecanum Wheeled Automated Guided Vehicle Localization”Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors　Volume 2015, Article ID 347379, 7 pages, 2015.
(5) Viboonchaicheep, Pakpoom, Akira Shimada, and Yuhki Kosaka, “Position rectication control for mecanum wheeled omni-directional vehicles” , Industrial Electronics Society, IECON’03, The 29th Annual Confer-ence of the IEEE , Vol. 1, pp. 854-859, 2003.
(6) 大西公平, “特集 アドバンスト・モーションコントロール 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール” , 日本ロボット学会誌 Vol 11, No. 4, pp. 486-493, 1993.