日本ロボット学会誌　Vol. 28　No. 10, pp.1223〜1231, 2010

学術・技術論文

加速度制限付き最速誘導制御実験

向　野　政　紀*　見　浪　　護*

Experiments of Fastest Guidance Control with Acceleration Restriction

Masanori Mukono* *and* Mamoru Minami*

This paper discusses experimentally how to control velocity of mobile robot as fast as possible with a condition of not letting carrying objects slip on it, while guiding the mobile robot onto a desired traveling course designated arbitrarily as preconditions. The requirements of above control objectives seem to be standing against each other. We have confirmed that our approach to this knotted problem could control the traveling speed within a velocity extent of making the carrying objects kept stationary on the mobile robot. The proposed fastest guidance control method has been examined intensively through sinusoidal course traveling and rectangular course traveling experiments.

Key Words: Mobile Robot, Carrying Object, Slipping, Guidance Control

1. 緒　　　言

本研究では移動ロボットの搬送作業に着目する．工場内における搬送作業や病院などでの配膳作業では，短い距離を走行し積み下ろしを繰り返している．この場合，搬送の対象（積載物）を毎回固定していたのでは作業効率の低下を招く．このような積載物を固定しない搬送作業において問題となるのは，積載物が移動ロボット上を転倒または滑ることである．ここで転倒が最も発生しにくい安定した面を選んで積載することは自然であり，転倒より先に滑りが発生することを仮定する．積載物の滑りは，移動ロボットのふらつきや積載物の落下，破損などを発生させる危険性がある．また，積載物の滑りの発生は，移動ロボットの慣性負荷の減少を意味するため移動ロボットを加速させる．そのため複数の積載物を搬送する場合には，一つの積載物が滑り始めることで移動ロボットの加速度が増加し，積載物の滑りが連鎖的に発生し荷崩れを引き起こす危険性がある．以上の点から積載物の滑りは危険であり，これを抑制することが必要である．

搬送作業を行うロボットの研究では，食事搬送ロボットシステムの開発を目指した研究 [1] やオフィスビル内における移動ロボットによるゴミの搬送システムについての研究 [2] [3] がある．最近では移動ロボットによる押し搬送に関する研究 [4] や要介護者を移乗する介護支援ロボットの研究 [5] が行われている．また，人を搬送する救急車の荷台部分のモデルを作成し，人に対する振動を抑制する研究 [6] があるが，これは荷台部分の振動を抑えるための制御に関する研究であり搬送されるものと車との関係は取り扱っていない．また，移動ロボットのダイナミクスを取り扱った研究として，未知のパラメータを持つ非ホロノミックな移動ロボットを考え，その力学モデルに適応した軌道制御方法を提案した研究 [7] [8] がある．さらに移動ロボットの誘導走行方法としては，移動ロボットの走行のみに関してニューラルネットワークを用いて軌道追従を行うものなど，誘導走行時のダイナミクスを無視した手法 [9]〜[12] が多い．

本報告は積載物の滑りの発生を防ぎつつ最速で目的地に移動する誘導制御に関する研究であり，過去の研究には筆者の知る限り同じ目的の研究は見当たらない．筆者らはすでに，複数の積載物の中で滑り移動をしていない積載物と滑り始めた積載物が混在している状況の移動ロボットの運動モデルを提案し [13]，これに基づいた最速誘導制御を提案した [14]．ここで本報では「正の加速度指令値が与えられていることを前提に常に速度を増加させ続けて誘導走行を行いつつ，その加速が積載物の滑りを誘起することが予測される場合に限り減速する」という意味において提案手法を「最速誘導制御」と呼ぶこととする．提案した手法は移動ロボットの運動と積載物の位置関係によって発生する積載物位置での加速度をモデルに基づいて制御する方法であるので，加速度センサなどの外界センサが不要であるという利点を持つ．

しかし上記の研究の検証 [14] はシミュレーションによる確認であり，最速誘導制御と加速度制限による積載物の滑り防止機能を実機で確認したものではなかった．本報では，積載物の滑りが発生しやすい走行経路としてカーブがある走行経路を与え，実機走行データによる有効性の確認とともに積載物の滑りを含

原稿受付　2009 年 8 月 6 日
*福井大学大学院工学研究科
*Graduate School of Engineering, University of Fukui
■ 本論文は有用性で評価されました．

む移動ロボットモデルの妥当性も検討する．さらに閉ループコースの連続走行実験により，最速走行と滑り防止機能が定常な加速／減速の速度パターンに収束していくことも確認する．

2. モ デ リ ン グ

2.1 座標系

Fig. 1 に示す二軸左右独立駆動型（Power Wheeled Steering: PWS 型）の移動ロボット上に積載物がある状態を考える．モデリングの準備として移動ロボットをリンク 0 と呼ぶことにする．走行路面は水平であり，車輪が滑らないことを仮定する．またここではリンク 0 上の積載面は水平を保つことを仮定する．

$\boldsymbol{\Sigma}_W$ は基準座標系を表し，$\boldsymbol{\Sigma}_0$ は左右の駆動輪を結ぶ軸の中間に原点を固定し，駆動輪の車軸方向に ${}^0\boldsymbol{y}$ 軸を，また車軸に垂直でリンク 0 の進行方向に ${}^0\boldsymbol{x}$ 軸をとる．$\boldsymbol{\Sigma}_S$ は積載物 S の重心に固定された座標系を表す．$\boldsymbol{\Sigma}_0$ の x, y 軸回りの回転は，駆動輪と前後のキャスター輪により拘束されているので $\boldsymbol{\Sigma}_0$ で表された移動ロボットの角速度 ${}^0\boldsymbol{\omega}_0$ は ${}^0\boldsymbol{\omega}_0 = [0\ 0\ \omega_0]^T$，$\omega_0 = {}^W\dot{\theta}_0$ と表される．$\boldsymbol{\Sigma}_0$ の z 軸 ${}^0z$ は $\boldsymbol{\Sigma}_W$ の z 軸方向と一致しているので ${}^0\boldsymbol{\omega}_0$ は ${}^W\boldsymbol{\omega}_0$ と等しい．次に $\boldsymbol{\Sigma}_0$ の y 方向の並進は車輪の摩擦力により拘束されており，z 方向の並進も重力によって拘束されているから，$\boldsymbol{\Sigma}_0$ で表されたリンク 0 の並進速度 ${}^0\boldsymbol{V}_0$ は常に ${}^0x$ 軸方向の成分以外は零であり ${}^0\boldsymbol{V}_0 = [V_0, 0, 0]^T$ となる．また $\boldsymbol{\Sigma}_W$ で表された $\boldsymbol{\Sigma}_0$ の姿勢変換行列を ${}^W\boldsymbol{R}_0$ で表す．

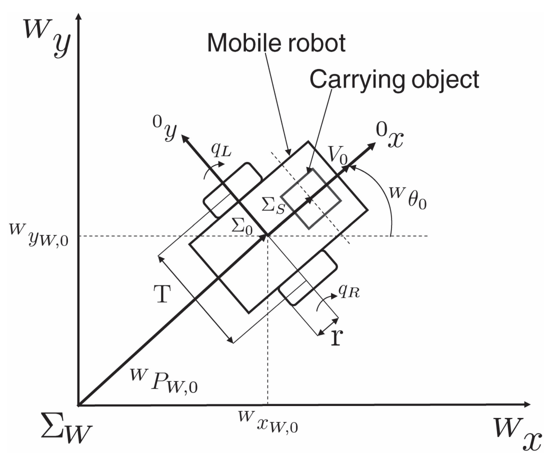


Fig. 1 Mobile robot on the standard of coordnates

2.2 積載物の運動方程式

リンク 0 上に m 個の積載物があり，そのうち p 個が滑り移動をしていて，残り $q(= m-p)$ 個が静止している場合について考える．まず，滑り移動をする p 個の積載物の運動方程式を求める．滑り移動している p 個の積載物に番号をつけ，$j(= 1, \cdots, p)$ 番目にあたる積載物 S_j は ${}^Wx_s$, ${}^Wy_s$ 方向の並進運動と，${}^Wz_s$ 回りの回転運動という三つの自由度を持つリンクと考えることができるから，その加速度 ${}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sj}$，角加速度 ${}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj}$ は

$$
\begin{aligned}
{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sj} = {}&{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,0} + {}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\ddot{\boldsymbol{P}}_{0,Sj} + 2\,{}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\dot{\boldsymbol{P}}_{0,Sj}) \\
&+ {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\boldsymbol{P}_{0,Sj}) \\
&+ {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times \{{}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\boldsymbol{P}_{0,Sj})\} \qquad (1)
\end{aligned}
$$

$$
{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} = {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0\,{}^0\boldsymbol{\omega}_{Sj}) \qquad (2)
$$

と表される．ここで $\boldsymbol{\Sigma}_{Sj}$ を積載物の重心に取り付けているので，${}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sj} = {}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,GSj}$ となる．S_j に作用する並進の動摩擦力を ${}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj}$，トルクを ${}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj}$ と表すと，S_j が滑り移動するときの運動方程式は，

$$
m_{Sj}\,{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sj} - {}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} = \boldsymbol{0} \qquad (3)
$$

$$
{}^W\boldsymbol{I}_{Sj}\,{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} + {}^W\boldsymbol{\omega}_{Sj} \times ({}^W\boldsymbol{I}_{Sj}\,{}^W\boldsymbol{\omega}_{Sj}) - {}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj} = \boldsymbol{0} \qquad (4)
$$

となる．m_{Sj} は積載物の質量であり，${}^W\boldsymbol{I}_{Sj}$ は積載物の慣性テンソルである．

次に，滑り移動していない q 個の積載物について示す．滑り移動している積載物と同様に番号をつけ，滑り移動していない $k(= 1, \cdots, q)$ 番目の積載物 S_k について考える．ここで，S_k とリンク 0 との間には静止摩擦力 ${}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk}$ と静止摩擦トルク ${}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk}$ が作用しているので，滑り移動していない積載物については次のように表せる．

$$
m_{Sk}\,{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sk} - {}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk} = \boldsymbol{0} \qquad (5)
$$

$$
{}^W\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sk} + {}^W\boldsymbol{\omega}_{Sk} \times ({}^W\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^W\boldsymbol{\omega}_{Sk}) - {}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk} = \boldsymbol{0} \qquad (6)
$$

最大静止摩擦力を ${}^W\boldsymbol{f}_{Sk,max}$，最大静止摩擦トルクを ${}^W\boldsymbol{\tau}_{Sk,max}$ と表すとき，積載物とリンク 0 との間に作用する静止摩擦力が $|{}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk}| < |{}^W\boldsymbol{f}_{Sk,max}|$ かつ $|{}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk}| < |{}^W\boldsymbol{\tau}_{Sk,max}|$ の条件を満たしている間，積載物は式（5）（6）で表されるようにリンク 0 上に静止状態にある．しかし，$|{}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk}| > |{}^W\boldsymbol{f}_{Sk,max}|$ または $|{}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk}| > |{}^W\boldsymbol{\tau}_{Sk,max}|$ となった瞬間に積載物の運動を支配する式は式（3）（4）へと切り替わる．

2.3 積載物の運動を考慮した移動ロボットの運動方程式

リンク 0 上に積載物が載っていない場合のリンク 0 の運動方程式は，移動ロボットに固定された座標系 $\boldsymbol{\Sigma}_0$ の原点に加わる力とトルクを計算することで求められる．

$$
{}^W\boldsymbol{f}_0 = m_0\,{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} \qquad (7)
$$

$$
\begin{aligned}
{}^W\boldsymbol{n}_0 = {}&{}^W\boldsymbol{I}_0\,{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{I}_0\,{}^W\boldsymbol{\omega}_0) \\
&+ {}^W\boldsymbol{S}_0 \times m_0\,{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} \qquad (8)
\end{aligned}
$$

この運動方程式に積載物の影響を組み込む必要がある．静止している q 個の積載物について考えると，リンク 0 の運動に従って積載物 S_k に発生している静摩擦 ${}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk}$ は，

$$
{}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk} = m_{Sk}\,{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sk} \qquad (9)
$$

$$
{}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk} = {}^W\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}^*_{Sk} + {}^W\boldsymbol{\omega}^*_{Sk} \times ({}^W\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^W\boldsymbol{\omega}^*_{Sk}) \qquad (10)
$$

であり，${}^W\boldsymbol{f}^*_{Sk}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^*_{Sk}$ はリンク 0 の運動のみにより決定される．したがって S_k はそれ自身の運動方程式を持たず，リンク 0 の負荷として運動方程式に組み込まれる．また滑りを発生した積載物 S_j からリンク 0 が受ける外力は式（3）（4）で表された ${}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj}$ である．

以上の準備により，積載物 S_j，S_k に加わる摩擦力を考慮した移動ロボットの運動方程式は，

$$ {}^W\boldsymbol{f}_0 = \sum_{j=0}^{p} {}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^W\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} + m_0 {}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} \quad (11) $$

$$ \begin{aligned} {}^W\boldsymbol{n}_0 = & \sum_{j=0}^{p} {}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^W\boldsymbol{\tau}^{*}_{Sk} + {}^W\boldsymbol{I}_0 \, {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \\ & + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{I}_0 \, {}^W\boldsymbol{\omega}_0) + m_0 {}^W\boldsymbol{S}_0 \times {}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} \\ & + \sum_{j=0}^{p} {}^W\boldsymbol{P}_{0,Sj} \times {}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^W\boldsymbol{P}_{0,Sk} \times {}^W\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} \end{aligned} \quad (12) $$

と表される．${}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj}$ を含む項は，滑り移動する積載物とリンク 0 との干渉力を表す．ただし上式では，${}^W\boldsymbol{f}^{\#}_{S0} = \boldsymbol{0}$，${}^W\boldsymbol{f}^{*}_{S0} = \boldsymbol{0}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^{\#}_{S0} = \boldsymbol{0}$，${}^W\boldsymbol{\tau}^{*}_{S0} = \boldsymbol{0}$ と定義する．

移動ロボットは，${}^0\boldsymbol{x}$ 方向の並進運動と ${}^0\boldsymbol{z}$ 回りの回転運動のみの自由度しかもたないこと，この二つの自由度に対する移動ロボットの駆動力および旋回トルクは，左右駆動輪が発生すべき駆動トルク $\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_R$ の和と差より求まることを考慮すると，これらのトルクと ${}^W\boldsymbol{f}_0, {}^W\boldsymbol{n}_0$ の間には，次の関係

$$ \frac{\hat{\tau}_R}{r} + \frac{\hat{\tau}_L}{r} = {}^W\boldsymbol{f}_0{}^T \, {}^W\boldsymbol{x}_0 = f_0 \quad (13) $$

$$ \frac{T}{2}\left(\frac{\hat{\tau}_R}{r} - \frac{\hat{\tau}_L}{r}\right) = {}^W\boldsymbol{n}_0{}^T \, {}^W\boldsymbol{z}_0 = \tau_0 \quad (14) $$

が成り立つ．$\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_R$ は連立方程式（13）（14）の解として得られる．左右駆動系の粘性抵抗を C_L, C_R，慣性モーメントを I_{aL}, I_{aR} とすると，モータの発生トルク τ_L, τ_R と $\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_R$ との関係は，

$$ \tau_L = \hat{\tau}_L + I_{aL}\ddot{q}_L + C_L\dot{q}_L \quad (15) $$

$$ \tau_R = \hat{\tau}_R + I_{aR}\ddot{q}_R + C_R\dot{q}_R \quad (16) $$

と求めることができる．式（13）（14）の逆動力学計算の中で f_0 と τ_0 は ${}^W\boldsymbol{f}_0, {}^W\boldsymbol{n}_0$ より求められたものであり，これらは V_0，$\dot{V}_0$，ω_0，$\dot{\omega}_0$ を変数として含んでいる．

3. モデリングの検証

3.1 概要

導出した運動方程式に基づき，積載物を一つ載せた場合についてシミュレーションと実験を行う．シミュレーションのなかで使用される移動ロボットのパラメータは，実験で用いる移動ロボットのパラメータから決定され，**Table 1** にそのパラメータを示す．シミュレーションでは，時計回りに等角加速度の回転運動をさせ，積載物が滑る状況をつくり，搬送台上を滑る移動軌跡を調べる．次に実機を用いシミュレーション同様の走行実験を行い，搬送台上の積載物の動きを撮影しその軌跡を確認する．シミュレーションによる積載物の滑った軌跡が一致することを確認することによって，積載物の滑りを考慮した移動ロボットのモデリングの正当性の確認とする．

3.2 実験システム

走行実験を行った移動ロボットを **Fig. 2** に示す．移動ロボットは PWS 型であり，搬送台はアクリル板により作製し紙製の箱を積載物とした．搬送台上にある積載物の動きを観察するために積載物の上方にカメラを固定した．その固定したカメラから積載物を撮影したものを **Fig. 3** に示す．

Table 1 Parameters of actual mobile robot

	Symbol	Magnitude	Unit
Tread	T	0.4	m
Radius of wheel	r	0.11	m
Mass of vehicle	m_0	7.14	kg
Mass of object	m_s	0.05	kg
Moment of inertia (vehicle)	I_{0z}	0.93	kg·m^2
Moment of inertia (object)	I_{sz}	0.42×10^{-3}	kg·m^2
Reduction ratio	R_R	1/52	-
	R_L	1/52	-
Servo Amplifier	K_{fR}	1.11	V/(rad/s)
Velocity Feedback Gain	K_{fL}	1.11	V/(rad/s)
Servo Amplifier	K_{mR}	0.613	-
Torque Gain	K_{mL}	0.613	-
Motor Resistance	R_{mR}	4.91	Ω
	R_{mL}	4.91	Ω
Torque Constant	L_{mR}	0.89	Nm/A
	L_{mL}	0.89	Nm/A

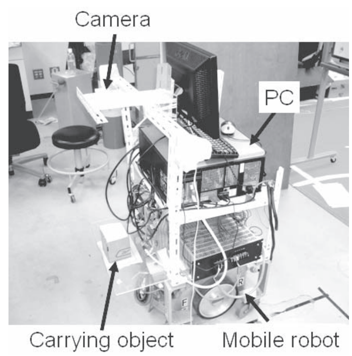


Fig. 2 Experimental system

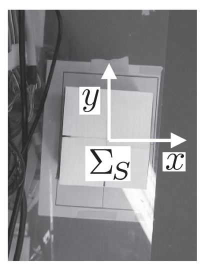


Fig. 3 Carrying object on the mobile robot

移動ロボットの左右車輪にはパルスカウンタが装着され，速度フィードバックはパルス周波数を電圧に変換する F/V 変換を介してアンプに入力される．また，駆動モータの増幅器は速度制御型であり，$K_{fi}(i = L, R)$ を速度フィードバックゲイン，K_{mi} を電圧増幅ゲイン，J_{mi} をモータ軸慣性モーメント，D_{mi} をモータ軸粘性抵抗係数，q_i を車輪軸回転角度，q_{mi} をモータ軸回転角度，$R_i(< 1)$ を減速比，R_{mi} を電気子抵抗，L_i をトルク定数，$V_{ref,i}$ をアンプへの速度指示電圧，τ_{mi} をモータ出力トルク，τ_i を車輪軸出力トルクである．このときサーボ系およびモータの運動方程式は，

$$ K_{mi}\left(V_{ref,i} - \frac{K_{fi}\dot{q}_i}{R_i}\right) = \frac{R_{mi}}{L_i}\tau_{mi} \quad (17) $$

$$ J_{mi}\ddot{q}_{mi} + D_{mi}\dot{q}_{mi} = \tau_{mi} - R_i\tau_i \quad (i = L, R) \quad (18) $$

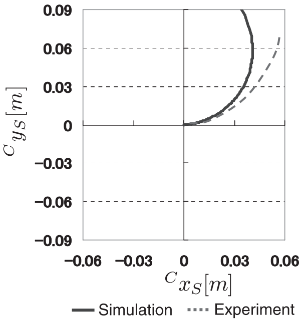


Fig. 4　Slipping locus

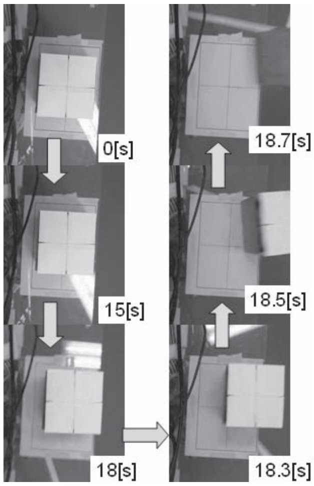


Fig. 5　Slipping locus (Experiment)

と表される．通常モータの慣性抵抗や粘性抵抗に比べ τ_i を大きく取れるようにモータが選定されていることから，ここでは相対的に $J_{mi}\ddot{q}_{mi}+D_{mi}\dot{q}_{mi}$ を無視することとする．式（17）（18）を用いると電圧指令値 $V_{ref,i}$ は，

$$V_{\mathrm{ref},i}=\frac{R_iR_{mi}}{L_iK_{mi}}\tau_i+\frac{K_{fi}\dot{q}_i}{R_i} \tag{19}$$

と求められる．上式中の実機のパラメータを Table 1 に示している．ここで，目標回転角速度 $\dot{q}_{id}$ をもとにフィードバックゲイン，減速比を考慮して，$V_{\mathrm{ref},i}=(K_{fi}/R_i)\dot{q}_{id}$ と与え，式（19）に代入し変形すると，

$$\dot{q}_{id}-\dot{q}_i=\frac{R_{mi}R_i^2\tau_i}{K_{mi}K_{fi}L_i} \tag{20}$$

となり，式（20）の右辺は減速比の二乗を含み，Table 1 を参照すると 0.01 以下の微小な値をとることが分かる．つまり，$\dot{q}_{id}\approx\dot{q}_i$ であり，移動ロボットの速度はサーボ系へ指示される目標速度に追従すると考えることができる．

3.3　静止摩擦係数の測定

積載物の写真を Fig. 3 に示す．外形は $0.1\times0.1\times0.12$ [m] であり，質量は 0.05 [kg] である．積載物が滑り移動を起こさない限界値であり，滑り移動の発生の境界値を計算するために静止摩擦係数を二とおりの方法で 20 回ずつ測定する．

第一の方法は搬送台を傾けていき，積載物が滑り始めないぎりぎりの傾斜角より静止摩擦係数を算出する．この実験より静止摩擦係数は $\mu=0.122$ となった．

第二の方法は搬送台上に置いた積載物をバネばかりで引く．荷物が動き始めたときのバネばかりの目盛りから静止摩擦係数を計算する．この実験より静止摩擦係数は $\mu=0.125$ となった．

以上の摩擦係数測定実験の結果より，この二つの値の平均をとり静止摩擦係数 $\mu=0.1235$ とする．積載物の重量を 0.5 [kg 重] とすると，最大静止摩擦力は 0.605 [N] と計算される．

3.4　実験結果と考察

$V_{ref,L}=0.025t$，$V_{ref,R}=-0.025t$ と与えて時計回りに定点旋回をするランプ入力を左右車輪駆動系に与えるシミュレーションと実験を行う．シミュレーションと実験の結果を **Fig. 4**, **Fig. 5** に示す．シミュレーション，実験の結果とも積載物は ^{C}x 軸，^{C}y 軸それぞれ正方向に移動していることが確認できる．このことから滑り軌跡の傾向は同じであり，また滑り軌跡の差異の発生原因の一つは式（3）（4）より実機とシミュレーションの微小な摩擦係数の差異であると考えられる．したがって筆者らは，Fig. 4 の移動軌跡の結果からモデリングが妥当なものであると考える．

4.　移動ロボットの誘導制御

4.1　瞬時目標を追従する誘導方法

本節では目標軌道へ移動ロボットを誘導する方法について述べる．まず，目標軌道は既知であり，$y_d(t)=f(x_d(t))$ とする．また移動ロボットの位置を $P_t(^{W}x_0(t),{}^{W}y_0(t))$，姿勢を $^{W}\theta_0(t)$ と表す．ここで，P の添え字 t は現在の時刻を意味し，P_{t+1} は $P(t+\Delta t)$ を意味する．移動ロボットの位置 P_t に基づいて，目標軌道上に瞬時目標位置 $D_t(^{W}x_d(t),{}^{W}y_d(t))\triangleq(^{W}x_0(t)+l,f(^{W}x_0(t)+l))$ をとる．ここで，l は P_t からどれだけ前方を参照するかという値であり，誘導目標コース $(x_d(t),y_d(t))$ の空間周波数と走行速度に関係し，予備実験により定めることとする．

次に移動ロボットの時刻 t の位置 P_t と目標位置 D_t を接点とし，移動ロボットの速度ベクトル $\boldsymbol{V}_0(t)$ を接線とする円 C を求める．P_t と目標軌道上の目標位置 D_t によって円の中心点 $C_t(^{W}x_c(t),{}^{W}y_c(t))$ と半径 $r_c(t)$ が得られる．この得られた円は移動ロボットが実際の時刻 t から $t+\Delta t$ までの間に走行する瞬時曲線軌道として用いる．ここでは，目標コース上を走行するための目標速度 $V_{0d}(t)$ は，移動ロボットの走行を決定する上位タスクより運動計画に基づいて指示されるべきものであり，与えられているものとする．

また，次の制御周期においても同様に実際の移動ロボットの位置 P_{t+1} と目標位置 D_{t+1} より $t+\Delta t$ から $t+2\Delta t$ 間を走行する新たな走行軌道が得られる．このように各時刻における円軌道を用いた目標誘導曲線上を移動ロボットに走行させることによって目標軌道へと誘導させることができる．

本報告では目標位置 D_t の設定は誘導コースが x 軸方向に伸びていることを仮定したが，そうでない方向に誘導コースが設定されている場合であっても適当な座標変換により上記の状態に変換できるので，この手法は様々な設定のコースにも適応可能である．

4.2　加速度の限界値

移動ロボット上の搬送面と積載物の間に働く静止摩擦力の大きさは

$$||^{W}\boldsymbol{f}_S^*||=m_S\sqrt{(\dot{V}_0\cos\theta_0+a_x)^2+(\dot{V}_0\sin\theta_0+a_y)^2} \tag{21}$$

と表される．ここで，

$$\begin{aligned}a_x=&-V_0\dot{\theta}_0\sin\theta_0-\ddot{\theta}_0(^{0}x_s\sin\theta_0+{}^{0}y_s\cos\theta_0)\\&-\dot{\theta}_0^2(^{0}x_s\cos\theta_0-{}^{0}y_s\sin\theta_0)\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}a_y=&\,V_0\dot{\theta}_0\cos\theta_0+\ddot{\theta}_0(^{0}x_s\cos\theta_0-{}^{0}y_s\sin\theta_0)\\&-\dot{\theta}_0^2(^{0}x_s\sin\theta_0+{}^{0}y_s\cos\theta_0)\end{aligned} \tag{23}$$

である．

積載物を滑らさずに走行するための加速度は最大静止摩擦力より次のように制限される．

$$
\begin{aligned}
\|{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}^{*}_{S}\| &= \sqrt{(\dot{V}_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0\sin\theta_0 + a_y)^2} \\
&< \frac{{}^{W}f_{S,max}}{m_s}
\end{aligned}
\tag{24}
$$

ここで，${}^{W}f_{S,max} = \|{}^{W}\boldsymbol{f}_{S,max}\|$ である．したがって，

$$
(\dot{V}_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0\sin\theta_0 + a_y)^2 < \frac{{}^{W}f^2_{S,max}}{m_s^2}
\tag{25}
$$

が得られる．また，誘導走行時には移動ロボットの角速度，角加速度は従属的に決まり，誘導半径 $r_c(t)$ と $V_0(t) = \|\boldsymbol{V}_0(t)\|$ を用いて次のように表される．

$$
\dot{\theta}_0(t) = \frac{V_0(t)}{r_c(t)}
\tag{26}
$$

$$
\ddot{\theta}_0(t) = \frac{r_c(t)\dot{V}_0(t) - \dot{r}_c(t)V_0(t)}{r_c^2(t)}
\tag{27}
$$

式（25）の不等式に式（26）（27）を代入した状態で $\dot{V}_0$ について解くと次式が得られる．

$$
\dot{V}_{0,min}(r_c, \dot{r}_c, V_0) < \dot{V}_0 < \dot{V}_{0,max}(r_c, \dot{r}_c, V_0)
\tag{28}
$$

式（22）（23）（26）（27）を代入し整理すると，式（28）の加速度制限値はそれぞれ，

$$
\dot{V}_{0,max} = \frac{-\left(\dfrac{V_0\dot{r}_c{}^{0}y_S}{r_c^2} - \dfrac{V_0\dot{r}_c({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^3}\right) + \sqrt{D}}{\left(1 - \dfrac{2{}^{0}y_S}{r_c} + \dfrac{{}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2}{r_c^2}\right)}
\tag{29}
$$

$$
\dot{V}_{0,min} = \frac{-\left(\dfrac{V_0\dot{r}_c{}^{0}y_S}{r_c^2} - \dfrac{V_0\dot{r}_c({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^3}\right) - \sqrt{D}}{\left(1 - \dfrac{2{}^{0}y_S}{r_c} + \dfrac{{}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2}{r_c^2}\right)}
\tag{30}
$$

と表される．ここで，

$$
\begin{aligned}
D = &\left\{-\frac{1}{r_c^2} + \frac{4{}^{0}y_S}{r_c^3} - \frac{2({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^4} - \frac{4{}^{0}y_S^2}{r_c^4} \right. \\
&\left. + \frac{4{}^{0}y_S({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^5} - \frac{({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)^2}{r_c^6}\right\} V_0^4 \\
&+ \left\{\frac{2\dot{r}_c{}^{0}x_S}{r_c^3} - \frac{4{}^{0}x_S{}^{0}y_S\dot{r}_c}{r_c^4} + \frac{2\dot{r}_c{}^{0}x_S({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^5}\right\} V_0^3 \\
&- \frac{\dot{r}_c^{2\,0}x_S^2}{r_c^4}V_0^2 + \left\{1 - \frac{2{}^{0}y_S}{r_c} + \frac{({}^{0}x_S^2 + {}^{0}y_S^2)}{r_c^2}\right\}\frac{f^2_{S,max}}{m_S^2}
\end{aligned}
\tag{31}
$$

である．

4.3 加速度制限付き誘導制御

速度は制御周期 Δt 秒ごとに $V_{0d}(t)$ を離散値として指示されるが，時刻 t 直前の実際の速度を $V_0^{-}(t)$，直後の目標速度を $V_{0d}^{+}(t)$ と表すことにする．時刻 t で，$V_{0d}^{+}(t)$ が指示されたときに予定される加速度 $\dot{V}_{0d}^{+}(t)$ は，近似的に

$$
\dot{V}_{0d}^{+}(t) \fallingdotseq \frac{V_{0d}^{+}(t) - V_0^{-}(t)}{\Delta t}
\tag{32}
$$

と表される．式（32）で得た予定の加速度 $\dot{V}_{0d}^{+}(t)$ と加速度限界値を比較し，積載物を滑らさずにできるだけ速く走行するための加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}{}^{+}_{0d}(t)$ を最大許容並進加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を用いて，次式により決定する．

$$
\dot{\tilde{V}}{}^{+}_{0d}(t) = \begin{cases}
\dot{V}_{0,max} - \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^{+}(t) > \dot{V}_{0,max} - \varepsilon) \\
\dot{V}_{0d}^{+}(t) & (\dot{V}_{0,min} + \varepsilon \leq \dot{V}_{0d}^{+}(t) \leq \dot{V}_{0,max} - \varepsilon) \\
\dot{V}_{0,min} + \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^{+}(t) < \dot{V}_{0,min} + \varepsilon)
\end{cases}
\tag{33}
$$

ここで，ε は積載物を滑らさずに誘導走行する際の安定性を増すために用いた値である．この $\dot{\tilde{V}}{}^{+}_{0d}(t)$ を用いて $t \sim t + \Delta t$ 秒間の新たな誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^{+}(t)$ を求める．

$$
\tilde{V}_{0d}^{+}(t) = \dot{\tilde{V}}{}^{+}_{0d}(t)\Delta t + V_0^{-}(t)
\tag{34}
$$

この誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^{+}(t)$ を用いて目標軌道を走行するための左右車輪指示速度を決定する．

$$
\tilde{V}_{ref,i}^{+}(t) = \frac{1}{r_c}\left(r_c \pm \frac{T}{2}\right)\tilde{V}_{0d}^{+}(t),\ (i = R, L)
\tag{35}
$$

5. シミュレーションおよび実験

5.1 曲線コースにおける加速度制限

提案手法の有効性を確認するために **Fig. 6** に示すような，目標曲線コース $y_d(t) = k(1 - \cos\omega x_d(t))$ を与え，加速度に制限を付けない場合と付けた場合の誘導走行シミュレーションおよび実機による実験を行った．ここで，$k = 0.4$，$\omega = 2\pi/T$，$T = 1.1$ とする．また，図中に示した点 *Slip* は制限を付けない場合に積載物が滑り出した地点を表している．加速度制限は式（33）に従って行い，積載物の滑りを防ぐ目標加速度として出力する．

移動ロボットの初期位置は $({}^{W}x_0(0), {}^{W}y_0(0)) = (0, 0)$ で，姿勢は ${}^{W}\theta_0(0) = 0$ である．目標速度は $V_{0d}(t) = \dot{V}_{0d}\,t$ [m/s] とし，$\dot{V}_{0d} = 0.03$ [m/s^2] である．また，積載物を滑らさずに誘導制御を安定に行うための値である ϵ は 0.15 [m/s^2] とした．加

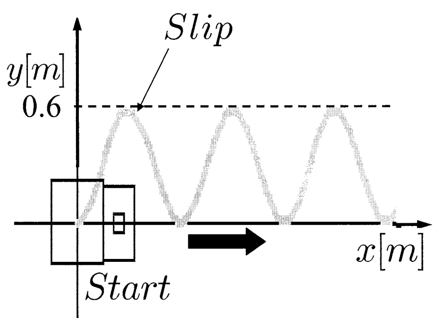
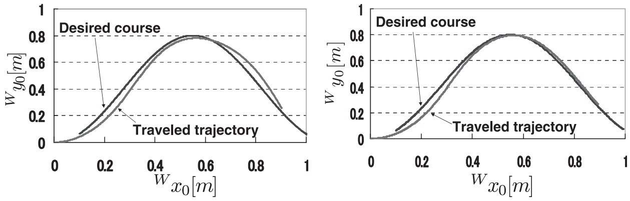
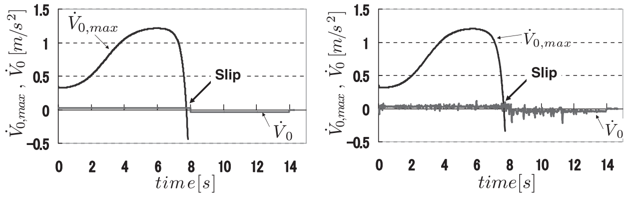


Fig. 6 Desired course



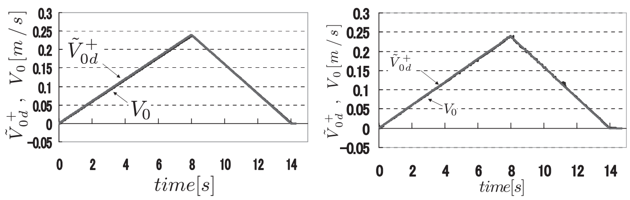
(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 7 Trajectories of mobile robot (Not limited)



(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 8 Acceleration profiles (Not limited)



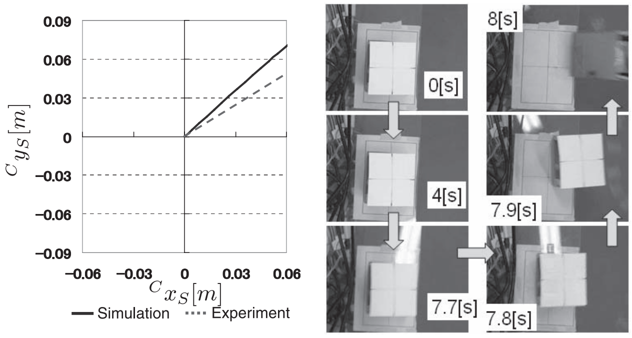
(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 9 Velocity profiles (Not limited)

速度制限を付けた場合には $t = 15.5$ 秒，加速度制限を付けない場合は $t = 8.0$ 秒で停止のための加速度 $\dot{V}_{0d} = -0.04\,[\mathrm{m/s^2}]$ に切り替わる．これは，加速度制限を付ける実験では二つのカーブを走行し，加速度制限を付けない場合では一つのカーブを走行し停止することになる．また摩擦係数 $\mu = 0.1235$，誘導パラメータ $l = 0.1\,[\mathrm{m}]$ とする．

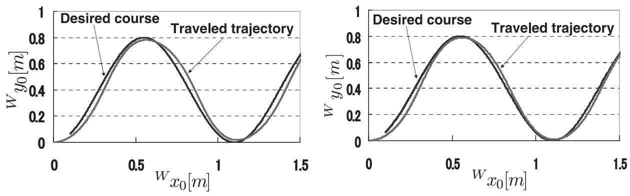
まず，**Fig. 7** に加速度制限を行わなかった場合の移動ロボットの走行軌跡，**Fig. 11** に加速度制限を行った場合の移動ロボットの走行軌跡を示す．加速度制限の有無にかかわらず，ほぼ同じ走行軌跡を描き目標軌道への誘導が行われていることが分かる．

次に，加速度制限を行わなかった場合の結果について考察する．**Fig. 8** に加速度制限を行わなかった場合の最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と最小加速度 $\dot{V}_{0,min}$ と並進加速度 $\dot{V}_0$，**Fig. 9** に誘導制御出力速度 $\tilde{V}^+_{0d}(t)$ と並進速度 $V_0(t)$，**Fig. 10** に搬送台上の積載物の様子を示す．それぞれ (a) がシミュレーション，(b) が実験の結果を示している．まず，Fig. 9 から停止のための加速度に切り替わる $t = 8.0$ 秒までの間は等加速度で加速し続けていることが分かる．次に Fig. 8 を見ると，$\dot{V}_{0,max}$ が 7 秒付近から急激に下がっている．これは，Fig. 6 の最初のカーブを走行中に遠心加速度の急な増大により，並進加速度の許容値が急に下がるためである．また Fig. 8 において，$t = 7.74$ 秒の地点で $\dot{V}_0$ は $\dot{V}_{0,max}$ を超えている．そのため，加速度制限を行わない場合には，$t = 7.74$ 秒に積載物は滑り始める．Fig. 10 からも積載物が滑り出す時間が $t = 7.7$ 秒から $t = 7.8$ 秒の間で，Fig. 8 のデータとほぼ一致していることが分かる．また Fig. 10 では積



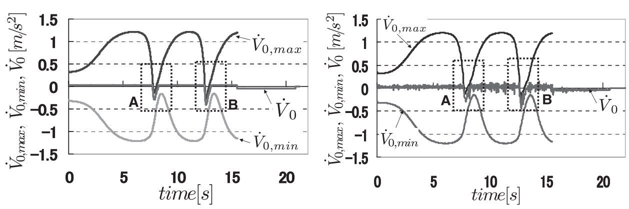
(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 10 Slipping locus (Not limited)



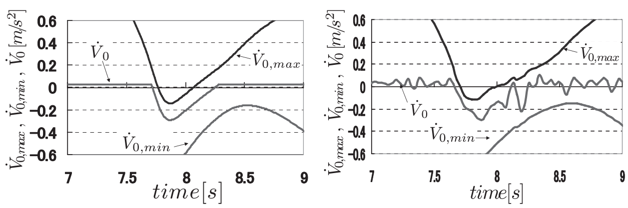
(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 11 Trajectories of mobile robot (Limited)



(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 12 Acceleration profiles (Limited)

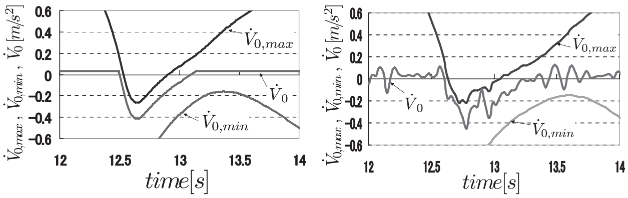


(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 13 Expansions of A in Fig. 12

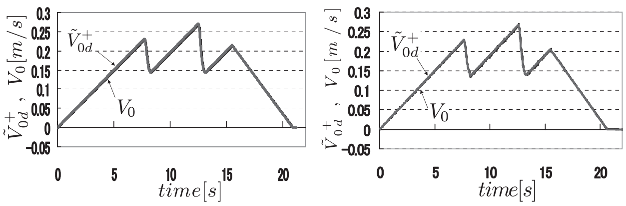
載物が滑って搬送台上から落ちてしまい，加速度制限を行わないと危険であることが確認できる．

次に，加速度制限を行った場合の結果について考察する．**Fig. 12** に加速度制限を行った場合の最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と最小加速度 $\dot{V}_{0,min}$ と並進加速度 $\dot{V}_0$，**Fig. 13** に Fig. 12 の A の部分，**Fig. 14** に Fig. 12 の B の部分の拡大図を，**Fig. 15** に誘導制御出力速度 $\tilde{V}^+_{0d}(t)$ と並進速度 $V_0(t)$，**Fig. 16** に搬送台上の積載物の様子を示す．それぞれ (a) がシミュレーション，(b) が実験の結果を示している．Fig. 12 より，$\dot{V}_{0,max}$ の減少とともに $\dot{V}_0$ も $\dot{V}_{0,max}$ を超えないように減少し，加速度制限が働いている．ここで，$\dot{V}_{0,max}$，$\dot{V}_{0,min}$ が変化する原因として，走行の曲率半径 r_c，曲率半径の変化量 $\dot{r}_c$，走行速度 V_0 が変数と



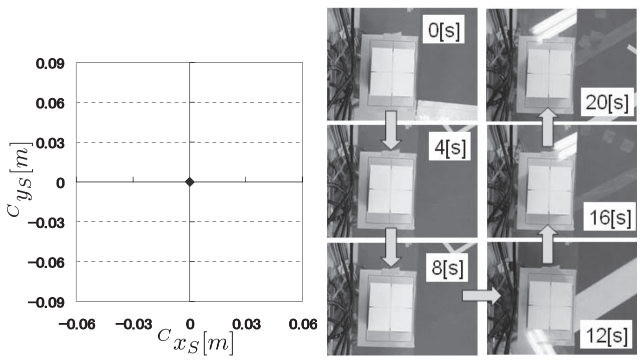
(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 14 Expansions of B in Fig. 12



(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 15 Velocity profiles (Limited)



(a) Simulation (b) Experiment

Fig. 16 Slipping locus (Limited)

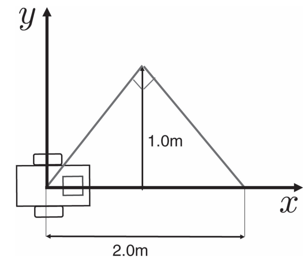
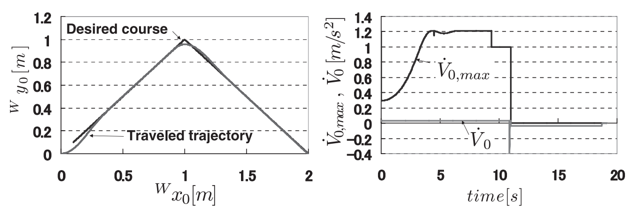
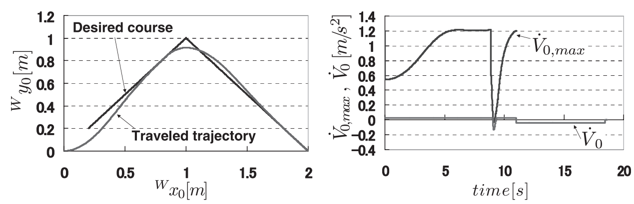


Fig. 17 Desired course



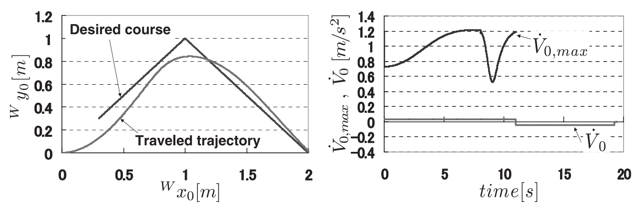
(a) Trajectory of mobile robot (b) Acceleration profile

Fig. 18 Guidance experiment with $l = 0.1$



(a) Trajectory of mobile robot (b) Acceleration profile

Fig. 19 Guidance experiment with $l = 0.2$



(a) Trajectory of mobile robot (b) Acceleration profile

Fig. 20 Guidance experiment with $l = 0.3$

して働くためである．つまり，許容範囲である $\dot{V}_{0,max}$，$\dot{V}_{0,min}$ をある定数として設定するのではなく，走行速度や走行軌道の曲率の影響を受けて変化する状況で，各時刻において $\dot{V}_{0,max}$，$\dot{V}_{0,min}$ を計算し境界とするためである．また Fig. 15 より，加速度制限が働いているときには $\dot{V}_0$ が負の値になるため，その間は $V_0(t)$ が減少していることが確認できる．Fig. 13 と Fig. 14 を比較すると，実験結果とも二つ目のカーブを曲がる際の Fig. 14 のほうが $\dot{V}_{0,max}$ の減少の幅が大きい．これは Fig. 15 から分かるように加速度制限が働く前の速度が一つ目のカーブのときよりも速いため，より減速を必要とするためである．加速度制限を行わなかった場合と違い加速度制限を行った場合には，$\dot{V}_0$ が $\dot{V}_{0,max}$，$\dot{V}_{0,min}$ を超えずその間に制御されているため，積載物は滑らない．Fig. 16 からも実際に移動ロボットが積載物を滑らせず，安全に走行できていることが分かる．

以上の結果より，本提案手法の有効性が確認できた．

5.2 誘導パラメータ l の影響

4.1 節で示したパラメータ l が本提案手法にどのような影響を与えるかをシミュレーションを用いて確認する．目標軌道は **Fig. 17** のような直角コースを設定した．コーナーを曲がりきった $t = 11.0$ 秒以降，停止のための加速度に切り替わり停止する．パラメータ l の値をそれぞれ $l = 0.1$ [m]，$l = 0.2$ [m]，$l = 0.3$ [m] と変更し，その他の条件は 5.1 節と同様とする．

Fig. 18 に $l = 0.1$，**Fig. 19** に $l = 0.2$，**Fig. 20** に $l = 0.3$ の場合のシミュレーション結果を示す．また Fig. 18，Fig. 19，Fig. 20 において，それぞれの (a) は移動ロボットの走行軌跡，(b) は最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と並進加速度 $\dot{V}_0$ を示している．それぞれの (a) の結果について比較すると，l の値が増すと目標軌道への誘導の精度が低くなることが分かる．つまりコーナーを曲がる際には l の値が増すと曲率が大きいカーブを走行する．次にそれぞれの (b) の結果について考察する．まず，Fig. 18 (b) の A を見ると，$t = 9.35$ 秒から最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の値が 1.0 となっている．これは今回，最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の計算式である式（31）の D が負になった際に $\dot{V}_{0,max} = 1.0$ と指定したためである．このとき，走行制御プログラムは減速の後停止するルーチンへと進む．次に Fig. 19 (b) を見ると，$t = 9.03$ 秒から $t = 9.33$ 秒までの間で $\dot{V}_0$ が $\dot{V}_{0,max}$ を超えないように減少し，

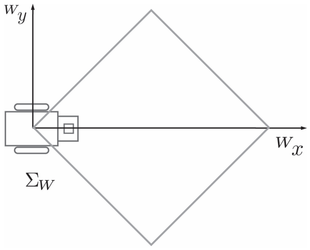


Fig. 21　Desired course

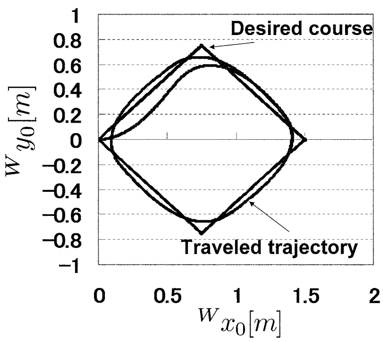


Fig. 22　Trajectory of mobile robot (Round)

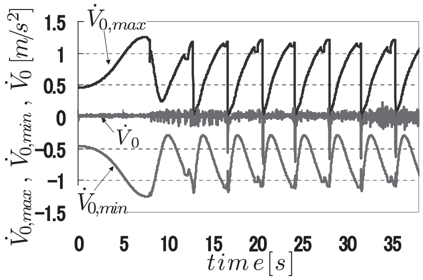


Fig. 23　Acceleration profile (Round)

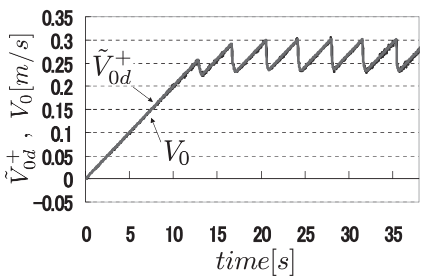


Fig. 24　Velocity profile (Round)

加速度制限が働いていることが分かる．しかし，Fig. 20 (b) では Fig. 19 (b) 同様に $\dot{V}_{0,max}$ の減少は見られるが，$\dot{V}_0$ の値にまで減少しないため加速度制限が働くことなく走行を終える．これは先に述べたとおり，$l = 0.2$ のときよりも曲率が大きいカーブを走行しているためである．

以上より，l の値を大きくすればコーナーにおいて曲率の大きなカーブを走行する．また，l の値を変更することで最大加速度の計算結果に影響があることを確認した．

5.3　周回コースにおける加速度制限

閉ループの連続走行可能なコースを与えても積載物を滑らせずに走行し続けることが可能かを確認するために，**Fig. 21** のような正方形コースを目標軌道として与え，走行実験を行った．5.2 節の結果をふまえ，誘導のパラメータである l は $l = 0.27+0.3{V_0}^2$ と速度に依存した値に設定した．その他の条件は 5.1 節と同様とする．

実験結果を **Fig. 22**〜**Fig. 25** に示す．Fig. 22 は目標軌道と走行軌跡，Fig. 23 は最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と最小加速度 $\dot{V}_{0,min}$ と並進加速度 $\dot{V}_0$，Fig. 24 は誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^{+}(t)$ と並進速度 $V_0(t)$，Fig. 25 は走行中の積載物の様子を表している．Fig. 22 より移動ロボットは目標軌道を追従し，周回できていることが確認できる．Fig. 23 より $\dot{V}_0$ が $\dot{V}_{0,max}$ の減少とともに $\dot{V}_{0,max}$ を超えないように減少しており，加速度制限が働いている．また $\dot{V}_0$ は常に $\dot{V}_{0,max}$ と $\dot{V}_{0,min}$ の間にあり，積載物は滑らない．加速度制限が働いている際，$\dot{V}_0$ は負の値になるため，その間は $V_0(t)$ が減少していることが Fig. 24 より分かる．また，正の目標加速度を与えているにもかかわらず，加速度制限が働いたため速度は一定のところで収束をみせる．その結果，誘導のパラメータを速度に依存する変数としているため，移動ロボットの走行軌跡も一定の収束をする．

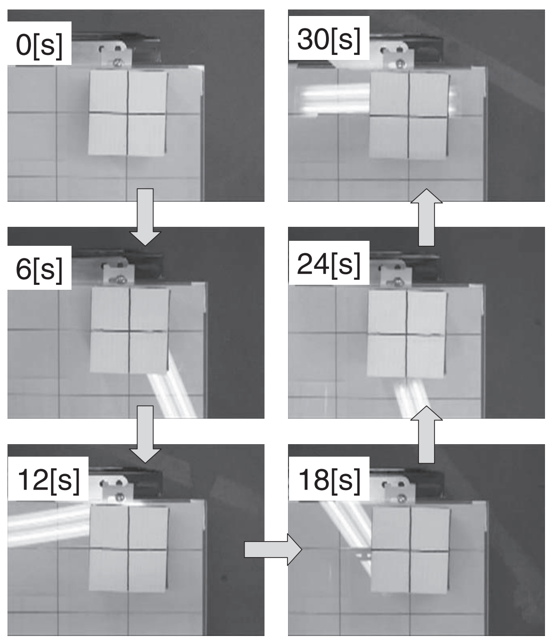


Fig. 25　Slipping locus (Round)

加速度制限が有効に働いた結果，Fig. 25 に示すように積載物を滑らせず目標軌道を走行し続けることが可能であることが確認できた．

最後に提案手法を実際の搬送作業に応用する場合の課題について述べる．提案手法は加速度の限界値を計算する際に静止摩擦係数がパラメータとして必要となる．しかし，種類の違う複数の積載物を搬送する際には積載物によっては静止摩擦係数が異なり，あらかじめ測定しておく必要がある．

6. 結　　言

本報告はまず，積載物の滑りを考慮した移動ロボットの運動方程式を導出し，そのモデルに基づき行ったシミュレーションと実機での実験の結果を比較することでモデルの確認を行った．

次に移動ロボットが目標軌道をできるだけ速く走行する加速度制限付最速誘導制御法を提案した．これは力学モデルに基づき，最大静止摩擦力と積載物に作用する静止摩擦力の不等式から積載物を滑らせずに走行できる並進加速度を算出し加速度の限界値とすることで加速度センサなどの外界センサをシステムに組み込まない方法である．

この提案手法の有効性をシミュレーションと実験によって確認した．さらに 4.1 節で示した誘導パラメータ l が本提案手法にどのような影響を与えるかをシミュレーションを行い考察した．その結果をもとに，周回コースを目標軌道に与えても提案手法が有効に働き，また定常な加速／減速の速度パターンに収束することを実験により示した．

参　考　文　献

[1] 河野寿之，神田真司：“高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム”，日本ロボット学会誌，vol.16, no.3, pp.317–320, 1998.

[2] 梶谷誠，美馬一博，金森哉吏，明愛国：“オフィスビルにおける搬送作業移動ロボットシステム”，ロボティクス・メカトロニクス講演会’99 講演論文集，1P1-01-004, 1999.

[3] 美馬一博，長谷川敬晃，中坊貴亨，金森哉吏，梶谷誠，明愛国：“ゴミ収集ロボットシステムのためのゴミ集積所の自動化”，日本ロボット学会誌，vol.17, no.7, pp.983–992, 1999.

[4] 小島宏行，楽燕群，呉大鵬，高田嘉之：“受動的コンプライアンス機構を有する 3 台の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送（クロソイド曲線を用いた軌道計画と押し搬送の実験）”，日本機械学会論文集（C 編），vol.70, no.692, pp.994–1001, 2004.

[5] 小田島正，大西正輝，田原健二，向井利春，平野慎也，羅志偉，細江繁幸：“抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援ロボット研究用プラットフォーム “RI-MAN” の開発と評価”，日本ロボット学会誌，vol.25, no.4, pp.554–565, 2007.

[6] 上野山毅，川名正昭，下郷太郎，宮地秀征：“救急車担架の能動制御による患者負荷の軽減（第 2 報）”，Dynamics and Design Conference’99 講演論文集，D114, 1999.

[7] T. Fukao, H. Nakagawa and N. Adachi: “Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot,” IEEE Tran. on Robotics and Automation, vol.16, pp.609–615, 2000.

[8] W. Dong and Y. Guo: “Dynamic Tracking Control of Uncertain Nonholonomic Mobile Robots,” 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1714–1719, 2005.

[9] 亀島鉱二，小川優理子，中野善之：“再帰型画像処理機構を用いた移動ロボットの視覚誘導”，日本ロボット学会誌，vol.5, no.5, pp.343–349, 1987.

[10] 滝田好宏，背戸一登，肥田祐司：“自律走行ロボットに関する研究（壁に囲まれた矩形空間の走行方法）”，日本ロボット学会誌，vol.10, no.3, pp.411–417, 1992.

[11] 湯軍，渡辺桂吾，栗林勝利，白石大和：“直交車輪機構を用いた全方向移動ロボット車の自律制御”，日本ロボット学会誌，vol.17, no.1, pp.51–60, 1999.

[12] 王輝宇，深尾隆則，足立紀彦：“非ホロノミック移動ロボットの適応トラッキング制御”，日本ロボット学会誌，vol.19, no.2, pp.271–276, 2001.

[13] 池田毅，竹内元哉，浪花智英，見浪護：“積載物の滑りを考慮した移動ロボットのモデリングと走行実験”，日本機械学会論文集（C 編），vol.70, no.699, pp.3227–3235, 2004.

[14] 矢崎靖啓，池田毅，竹内元哉，見浪護：“PWS 型移動ロボットの加速度制限付き最速誘導制御”，日本ロボット学会誌，vol.25, no.4, pp.535–544, 2007.

向野政紀（Masanori Mukono）

福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻所属．移動ロボットの力学と運動制御に興味を持っている．

見浪　護（Mamoru Minami）

1979 年大阪府立大学航空工学科卒業，1981 年大阪府立大学航空工学専攻修士課程修了．1993 年金沢大学大学院自然科学研究科博士課程修了．博士（工学）．1994 年福井大学工学部機械工学科助教授，2002 年同学部知能システム工学科教授，2010 年岡山大学大学院自然科学研究科教授，現在に至る．ロボットの力学，拘束運動，力制御，移動マニピュレータの制御，画像認識，ビジュアルサーボイング等の研究に従事．日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE などの会員．（日本ロボット学会正会員）