加速度制限付最速誘導制御と実験による評価

Fastest Guidance Control with Acceleration Restriction and Experiment Evaluation

○ 向野　政紀 (福井大)　見浪　護 (福井大)

Mamoru MINAMI, University of Fukui, Bunkyo3-9-1, Fukui
Masanori Mukono, Graduate school of engineering, University of Fukui,
3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507, Japan

Force and torque induced by traveling motion of a mobile robot effect dynamically to the objects being carried on it. If the induced force and torque should be bigger than the static friction force and torque exerting between the carrying objects and the mobile robot, the carrying objects start to slip on it. Since this slipping motion causes increasing the acceleration of the mobile robot, then the slipping of one object leads to dangerous collapse of all carrying objects. Furthermore it interferes with accurate traveling motions. On the other hand, mobile robots are desired to transfer the carrying objects as fast as it can. On this view point of cantradcted requirements, this paper purposes a controller to guide the mobile robot along a given course as fast as possible with acceleration restriction not to slip the carrying objects during traveling.

Keywords : Mobile Robot, Carrying Object, Slipping, Guidance Method

1　緒言

ロボットが移動する際，積載物には遠心力などの慣性力が働く．積載物に働く摩擦力と慣性力がつりあっている時は積載物は静止しているが，慣性力が最大静止摩擦力を超えてしまうと積載物は滑り始める．積載物に滑りが生じることで，積載物の落下もしくは移動ロボットのふらつき・転倒の原因となってしまう．さらにそれらが原因で，積載物の破損や人間の怪我など二次的な被害につながる可能性もあり，非常に危険である．積載物の滑りを防止する手段として，ベルトやロープなどで積載物を固定する方法があるが，その分手間が掛かってしまい作業効率の低下につながる．

また最近の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 [3] 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がある．

ロボットの走行を制御することで積載物の滑りを防止し，積載物を固定することなく搬送作業を行うことができる．そのことで上記のような危険性をなくすことができ，安心して作業を行うことが可能になる．また積載物を固定する手間や作業人員の削減など，コストを抑えることができ，作業効率が上昇する．

本研究では，移動ロボットの走行や制御が積載物に対してどのような影響を及ぼすかを調べることを目的とし，まず搬送作業を行う移動ロボットのモデリングを行う．さらに，積載物を滑らせないという制約の中で，最速で誘導走行する制御法を提案する．ここで，加速度センサなどの外界センサを用いて，積載物の慣性力を測定することで滑りを防止する方法も考えられるが，本手法では提案したモデルを用いることによって加速度センサが不用な加速度制限方法を提案する．この誘導制御は目標走行軌道に依存した方法ではないため，任意な目標軌道を与えても有効に加速度を制限し，積載物に作用する慣性力を最大静止摩擦力以下に保つことができる方法である．この誘導制御により積載物を滑らせずに目標軌道に収束し最大許容速度で走行することをシミュレーションおよび実機による走行実験により示すことで，提案手法の有効性を確認する．

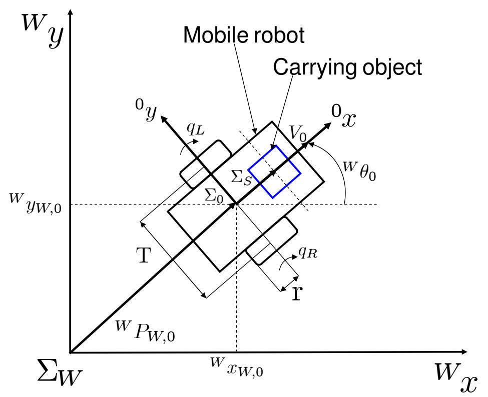


Fig. 1: Mobile robot on the standard of coordnates

2　ニュートンオイラー法による定式化

2.1　積載物の運動方程式

リンク 0 上に m 個の積載物があり，その内 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

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

$$
\begin{aligned}
{}^{W}\boldsymbol{\omega}_{Sj} &= {}^{W}\boldsymbol{\omega}_0 + {}^{W}\boldsymbol{R}_0\,{}^{0}\boldsymbol{\omega}_{Sj} && (2)\\
{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} &= {}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^{W}\boldsymbol{R}_0\,{}^{0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} + {}^{W}\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^{W}\boldsymbol{R}_0\,{}^{0}\boldsymbol{\omega}_{Sj}) && (3)
\end{aligned}
$$

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．動摩擦力が S_j に作用するときの滑り移動する積載物の運動方程式は，

$$
\begin{aligned}
& m_{Sj}\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sj} - {}^{W}\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} = \boldsymbol{0} && (4)\\
& {}^{W}\boldsymbol{I}_{Sj}\,{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sj} + {}^{W}\boldsymbol{\omega}_{Sj} \times ({}^{W}\boldsymbol{I}_{Sj}\,{}^{W}\boldsymbol{\omega}_{Sj}) - {}^{W}\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj} = \boldsymbol{0} && (5)
\end{aligned}
$$

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．

$$
\begin{aligned}
& m_{Sk}\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sk} - {}^{W}\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} = \boldsymbol{0} && (6)\\
& {}^{W}\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{Sk} + {}^{W}\boldsymbol{\omega}_{Sk} \times ({}^{W}\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^{W}\boldsymbol{\omega}_{Sk}) - {}^{W}\boldsymbol{\tau}^{*}_{Sk} = \boldsymbol{0} && (7)
\end{aligned}
$$

以上のことより積載物とリンク 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 (6)，(7) 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 (4)，(5) へと切り替わる．

2.2 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．

$$
\begin{aligned}
{}^{W}\boldsymbol{f}_0 &= m_0\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} && (8)\\
{}^{W}\boldsymbol{n}_0 &= {}^{W}\boldsymbol{I}_0\,{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^{W}\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^{W}\boldsymbol{I}_0\,{}^{W}\boldsymbol{\omega}_0)\\
&\quad + {}^{W}\boldsymbol{S}_0 \times m_0\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} && (9)
\end{aligned}
$$

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 Sk に発生している静摩擦 ${}^{W}\boldsymbol{f}^{*}_{Sk}$，${}^{W}\boldsymbol{\tau}^{*}_{Sk}$ は，

$$
\begin{aligned}
{}^{W}\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} &= m_{Sk}\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,Sk} && (10)\\
{}^{W}\boldsymbol{\tau}^{*}_{Sk} &= {}^{W}\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}^{*}_{Sk} + {}^{W}\boldsymbol{\omega}^{*}_{Sk} \times ({}^{W}\boldsymbol{I}_{Sk}\,{}^{W}\boldsymbol{\omega}^{*}_{Sk}) && (11)
\end{aligned}
$$

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．従って 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 (4)，(5) 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，

$$
\begin{aligned}
{}^{W}\boldsymbol{f}_0 &= \sum_{j=0}^{p} {}^{W}\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^{W}\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} + m_0\,{}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0} && (12)\\
{}^{W}\boldsymbol{n}_0 &= \sum_{j=0}^{p} {}^{W}\boldsymbol{\tau}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^{W}\boldsymbol{\tau}^{*}_{Sk} + {}^{W}\boldsymbol{I}_0\,{}^{W}\dot{\boldsymbol{\omega}}_0\\
&\quad + {}^{W}\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^{W}\boldsymbol{I}_0\,{}^{W}\boldsymbol{\omega}_0) + m_0\,{}^{W}\boldsymbol{S}_0 \times {}^{W}\ddot{\boldsymbol{P}}_{G0}\\
&\quad + \sum_{j=0}^{p} {}^{W}\boldsymbol{P}_{0,Sj} \times {}^{W}\boldsymbol{f}^{\#}_{Sj} + \sum_{k=0}^{q} {}^{W}\boldsymbol{P}_{0,Sk} \times {}^{W}\boldsymbol{f}^{*}_{Sk} && (13)
\end{aligned}
$$

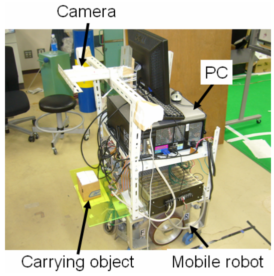


Fig. 2: Experimental system

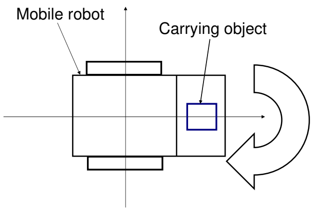


Fig. 3: Experiment image

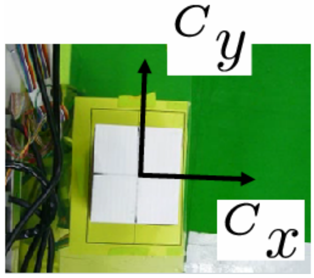


Fig. 4: Carrying object on the mobile robot

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及び旋回トルクは，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

$$
\begin{aligned}
\frac{\hat{\tau}_R}{r} + \frac{\hat{\tau}_L}{r} &= {}^{W}\boldsymbol{f}_0^{T}\,{}^{W}\boldsymbol{x}_0 = f_0 && (14)\\
\frac{T}{2}\left(\frac{\hat{\tau}_R}{r} - \frac{\hat{\tau}_L}{r}\right) &= {}^{W}\boldsymbol{n}_0^{T}\,{}^{W}\boldsymbol{z}_0 = \tau_0 && (15)
\end{aligned}
$$

が成り立つ．$\hat{\tau}_L, \hat{\tau}_R$ は連立方程式 (14),(15) 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，

$$
\begin{aligned}
\tau_L &= \hat{\tau}_L + I_{aL}\ddot{q}_L + C_L\dot{q}_L && (16)\\
\tau_R &= \hat{\tau}_R + I_{aR}\ddot{q}_R + C_R\dot{q}_R && (17)
\end{aligned}
$$

と求めることができる．式 (14)，(15) 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

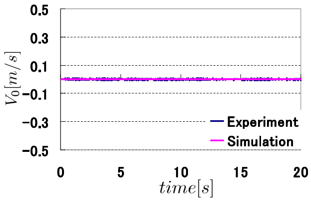


Fig. 5: Translational velocity

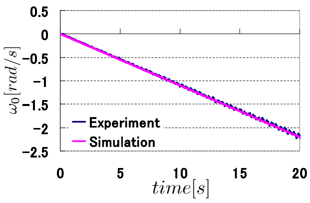


Fig. 6: Angular velocity

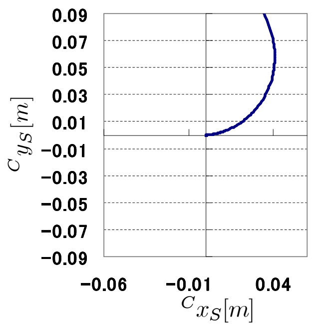


Fig. 7: Slipping locus (Simulation)

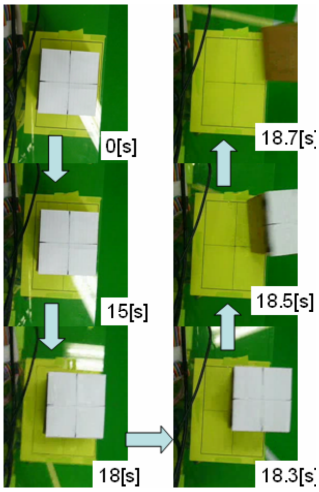


Fig. 8: Slipping locus (Experiment)

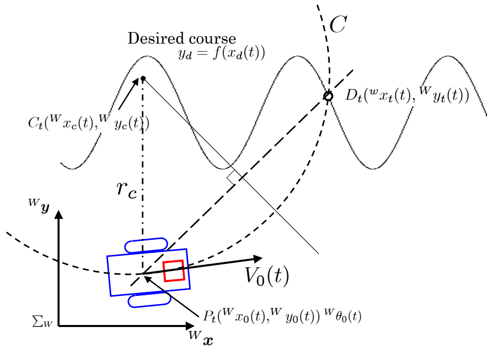


Fig. 9: Relation between the mobile robot and the desired course

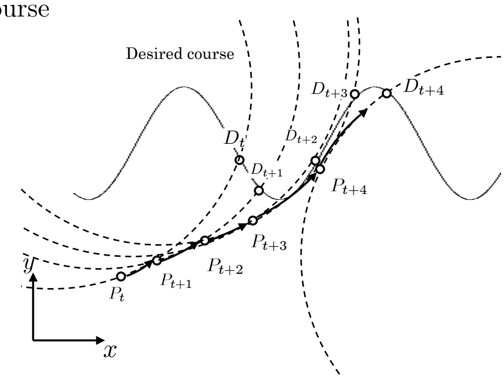


Fig. 10: Guidance traveling in time-series

ションでは，移動ロボットに Fig.3 に示すような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 Fig.2 に示す実機を用い走行実験を行い，Fig.4 のように搬送台上の積載物の動きを撮影しその軌跡を確認する．それらの結果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検証を行う．

3.2 結果と考察

シミュレーションと実験の結果を Fig.5〜Fig.8 に示す．Fig.5，Fig.6 は移動ロボットの並進速度と角速度を表している．この結果では，シミュレーションと実験の結果がほぼ一致していることから，シミュレーションと実験で移動ロボットは同じ運動をしていることがわかる．また，並進速度がほぼ $0[m/s]$ で角速度が正比例の関係になっていることから，移動ロボットは初期位置を中心として等角加速度の回転運動を行っている．Fig.7，Fig.8 は積載物の滑った軌跡を示している．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．また，その移動軌跡も酷似している．以上のことから，このモデリングが妥当なものであるといえる．

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，Fig.9 に示すように，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 は誘導目標コース $(x_d(t), y_d(t))$ の空間周波数に基づいて決定する定数である．

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．よって Fig.10 に示す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

$$||{}^W\boldsymbol{f}_S^*|| = m_S\sqrt{(\dot V_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot V_0\sin\theta_0 + a_y)^2} \quad (18)$$

と表される．ここで，

$$\begin{aligned} a_x &= -V_0\dot\theta_0\sin\theta_0 - \ddot\theta_0({}^0x_s\sin\theta_0 + {}^0y_s\cos\theta_0) \\ &\quad -\dot\theta_0^2({}^0x_s\cos\theta_0 - {}^0y_s\sin\theta_0) \quad (19) \\ a_y &= V_0\dot\theta_0\cos\theta_0 + \ddot\theta_0({}^0x_s\cos\theta_0 - {}^0y_s\sin\theta_0) \\ &\quad -\dot\theta_0^2({}^0x_s\sin\theta_0 + {}^0y_s\cos\theta_0) \quad (20) \end{aligned}$$

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．

$$||{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_S^*|| = \sqrt{(\dot V_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot V_0\sin\theta_0 + a_y)^2} < \frac{{}^Wf_{S,max}}{m_s} \quad (21)$$

ここで，${}^Wf_{S,max} = ||{}^W\boldsymbol{f}_{S,max}||$ である．従って，

$$(\dot V_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot V_0\sin\theta_0 + a_y)^2 < \frac{{}^Wf_{S,max}^2}{m_s^2} \quad (22)$$

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．

$$\dot\theta_0(t) = \frac{V_0(t)}{r_c(t)} \quad (23)$$

$$\ddot\theta_0(t) = \frac{r_c(t)\dot V_0(t) - \dot r_c(t)V_0(t)}{r_c^2(t)} \quad (24)$$

式 (22) の不等式に式 (23)，(24) 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．

$$\dot V_{0,min}(r_c, \dot r_c, V_0) < \dot V_0 < \dot V_{0,max}(r_c, \dot r_c, V_0) \quad (25)$$

式 (19)，(20)，(23)，(24) を代入し整理すると，式 (25) の加速度制限値はそれぞれ，

$$\dot V_{0,max} = \frac{-\left(\frac{V_0\dot r_c{}^0y_S}{r_c^2} - \frac{V_0\dot r_c({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^3}\right) + \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{2{}^0y_S}{r_c} + \frac{{}^0x_S^2 + {}^0y_S^2}{r_c^2}\right)} \quad (26)$$

$$\dot V_{0,min} = \frac{-\left(\frac{V_0\dot r_c{}^0y_S}{r_c^2} - \frac{V_0\dot r_c({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^3}\right) - \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{2{}^0y_S}{r_c} + \frac{{}^0x_S^2 + {}^0y_S^2}{r_c^2}\right)} \quad (27)$$

と表される．ここで，

$$\begin{aligned} D = &-\left\{\frac{1}{r_c^2} - \frac{2{}^0y_S}{r_c^3} + \frac{2({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^4} - \frac{4{}^0y_S^2}{r_c^4} \right. \\ &\left. - \frac{({}^0x_S - 1)^2}{r_c^4} - \frac{4{}^0y_S({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^5} + \frac{({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)^2}{r_c^6}\right\} V_0^4 \\ &+ \left\{\frac{2\dot r_c{}^0x_S}{r_c^3} - \frac{2{}^0x_S{}^0y_S\dot r_c}{r_c^4} - \frac{2\dot r_c{}^0y_S}{r_c^4} \right. \\ &\left. + \frac{2\dot r_c({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^5}\right\} V_0^3 - \left\{\frac{\dot r_c^2({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^4}\right\} V_0^2 \\ &+ \left\{1 - \frac{2{}^0y_S}{r_c} + \frac{({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^2}\right\} \frac{f_{S,max}^2}{m_S^2} \quad (28) \end{aligned}$$

である．

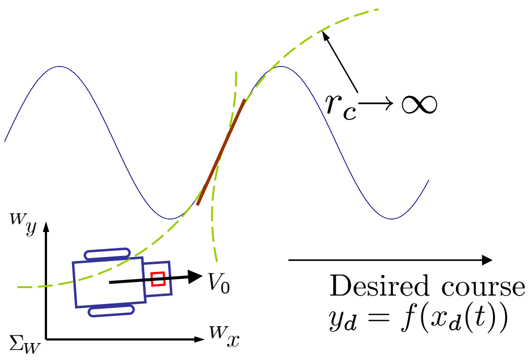


Fig. 11: Relation between the mobile robot and the deseired couse

4.3 加速度制限付き誘導制御

一般的に移動ロボットの駆動系は，速度制御型のサーボ系を用いて減速機を組み込んだ構成であるため，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していると考えてよい．速度は制御周期 Δt 秒毎に $V_{0d}(t)$ 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，$V_{0d}^+(t)$ が指示された時に予定される加速度 $\dot V_{0d}^+(t)$ は，近似的に

$$\dot V_{0d}^+(t) \fallingdotseq \frac{V_{0d}^+(t) - V_0^-(t)}{\Delta t} \quad (29)$$

と表される．式 (29) で得た予定の加速度 $\dot V_{0d}^+(t)$ と式 (26)，(27) の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．

$$\dot{\tilde V}_{0d}^+(t) = \begin{cases} \dot V_{0,max} - \varepsilon & (\dot V_{0d}^+(t) > \dot V_{0,max} - \varepsilon) \\ \dot V_{0d}^+(t) & (\dot V_{0,min} + \varepsilon \le \dot V_{0d}^+(t) \le \dot V_{0,max} - \varepsilon) \\ \dot V_{0,min} + \varepsilon & (\dot V_{0d}^+(t) < \dot V_{0,min} + \varepsilon) \end{cases} \quad (30)$$

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．

$$\tilde V_{0d}^+(t) = \dot{\tilde V}_{0d}^+(t)\Delta t + V_0^-(t) \quad (31)$$

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．

$$\tilde V_{ref,i}^+(t) = \frac{1}{r_c}(r_c \pm \frac{T}{2})\tilde V_{0d}^+(t) \ , (i = R, L) \quad (32)$$

4.4 直線の走行

Fig.11 に表すように，目標曲線軌道の右カーブと左カーブが切り替わる際に，ごくわずかな時間，直線軌道になる．このときに瞬時曲線軌道円 C の半径 r_c が一時的に無限大となり，加速度制限値 $\dot V_{0,max}$，$\dot V_{0,min}$ の計算が不連続になってしまう．これを解決するために，円 C の半径 $r_c(t)$ がある値以上大きくなった時には，左右車輪速度

を一定にして，目標軌道コースを瞬間的に直線として与えて走行する．その式を以下に示す．

$$\bar{V}_i^+(t) = \begin{cases} \tilde{V}_{ref,i}^+(t) & (r_c < H \ , \ i = R, L) \\ \tilde{V}_{0d}^+(t) & (r_c \geq H \ , \ i = R, L) \end{cases} \tag{33}$$

このとき H は目標軌道によって異なる．

4.5 停止アルゴリズム

加速度制限をしていても停止のときに急ブレーキをかけていたのでは，その衝撃で積載物が滑ってしまう可能性があり，加速度制限の意味がなくなってしまう．

そこで，移動ロボットを停止させるために，途中から加速度をマイナスの値にして移動ロボットを徐々に減速させていき，スムーズに停止させる．停止処理は加速度制限とは無関係に実行するため，$\dot{V}_{0,max}$，$\dot{V}_{0,min}$ の制限を行わない．

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.12 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．加速度制限による限界値への置き換えは式 (30) 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．

この時，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 $0.1[m/s^2]$ とした．加速度制限を付けた場合には $t = 15.5$ 秒，加速度制限を付ない場合は $t = 8.0$ 秒で停止のための加速度 $\dot{V}_{0d} = -0.04[m/s^2]$ に切り替わる．これは，加速度制限を付ける実験では 2 つのカーブを走行し，加速度制限を付けない場合では 1 つのカーブを走行し停止することになる．また摩擦係数は $\mu = 0.12278$ とする．

まず，Fig.13 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.17 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．走行距離が異なるが，1 つめのカーブだけを見ると，加速度制限を行わなかった場合と加速度制限を行った場合の両方とも走行軌跡はほぼ同じであることがわかる．これは，加速度制限の有無に関係なく第 4 章で示した誘導が行われているためであり，かつ積載物の滑りによる影響が微小なためである．

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.14 に加速度制限を行わなかった場合の最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$，Fig.15 に誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ と実際の速度 $V_0(t)$，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．まず，Fig.15 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走行していることがわかる．次に Fig.14 を

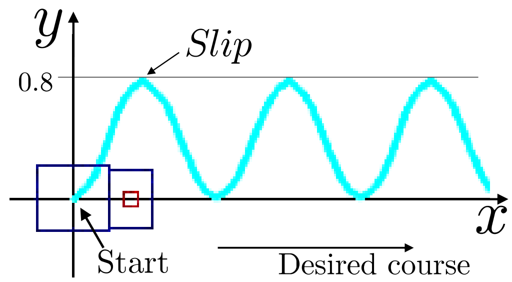


Fig. 12: Experiment image

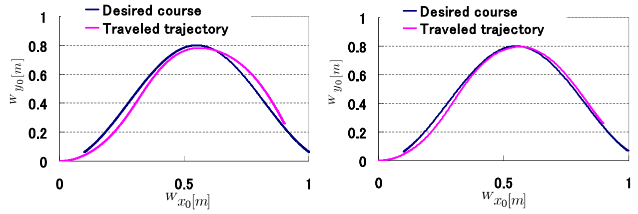
見ると，$t = 7.74$ 秒で加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$ は積載物が滑らない最大の加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を超えている．そのため，加速度制限を行わない場合には，$t = 7.74$ 秒に積載物は滑り始める．Fig16 からも積載物が滑り出す時間が $t = 7.7$ 秒から $t = 7.8$ 秒の間で，Fig.14 のデータとほぼ一致していることがわかる．また Fig16 では積載物が滑って搬送台上から落ちてしまい，ロボットが積載物を轢きそうな状況になり危険である．

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.18 に加速度制限を行った場合の最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$，Fig.19 に Fig.18 の A の部分，Fig.20 に Fig.18 の B の部分，Fig.21 に誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ と実際の速度 $V_0(t)$，Fig.22 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.18 より，最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の減少と共に，加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$ も最大加速度 $\dot{V}_{0d}^+(t)$ 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，最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ が変化する原因として，式 (25) に示す解の中にある走行の曲率半径 r_c，曲率半径の変化量 $\dot{r}_c$，走行速度 V_0 が変数として働くためである．つまり，許容範囲である最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ 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，各時刻において最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を式 (26) によって計算し，境界とするためである．また Fig.21 より，加速度制限が働いている時には加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$ が負の値になるため，その間は速度 $V_0(t)$ が減少していることが確認できる．また Fig.19 と Fig.20 を比較すると，実験結果とも 2 つ目のカーブを曲がる際の Fig.20 の方が最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の減少の幅が大きい．これは Fig.21 から分かるように加速度制限が働く前の速度が 1 つ目のカーブの時よりも速いため，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，加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)$ が最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を超えないため，積載物は滑らない．Fig.22 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わかる．

以上の結果より，本提案手法の有効性が確認できた．

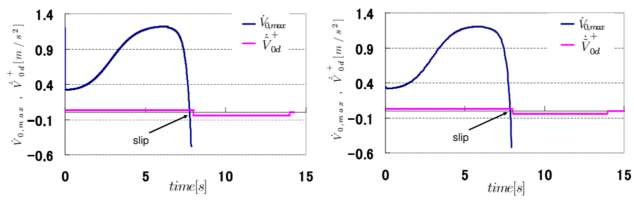
5.2 L の影響

4.1 節で示した定数 L が本手法の加速度制限つき誘導制御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 $x_d \leqq 1.0$ の時，$y_d = x_d$，$x_d > 1.0$ の時，$y_d = -x_d + 2.0$ とし，Fig.23 のような直



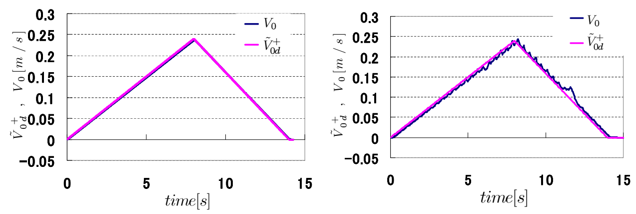
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 13: Locus of mobile robot (Not limited)



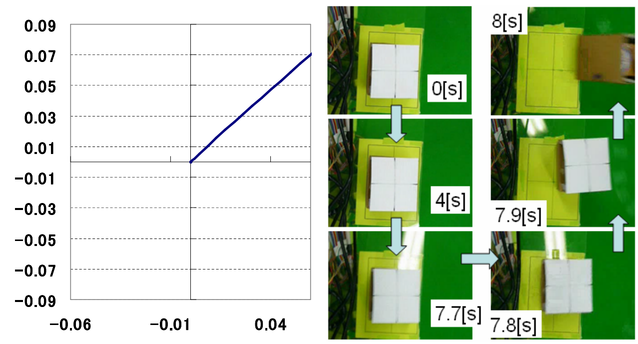
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 14: Translational acceleration (Not limited)



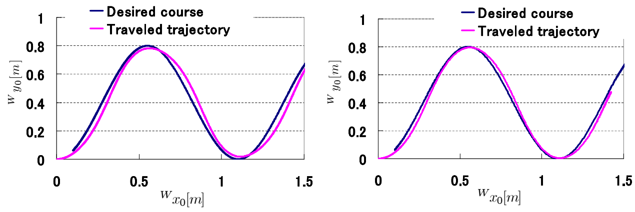
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 15: Translational velocity (Not limited)



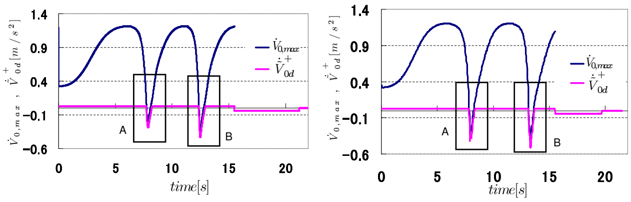
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 16: Slipping locus (Not limited)



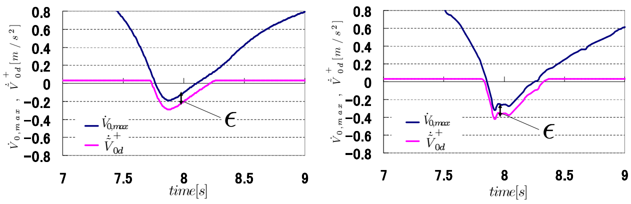
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 17: Locus of mobile robot (Limited)



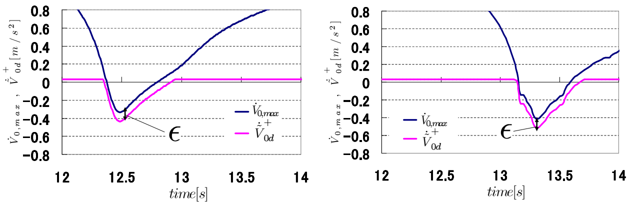
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 18: Translational acceleration (Limited)



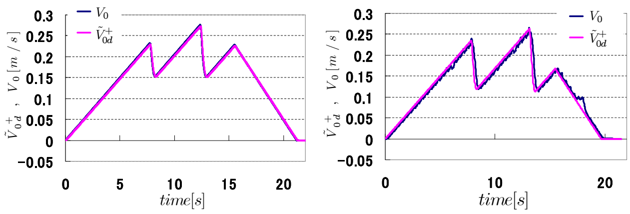
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 19: Part of A for Fig.18



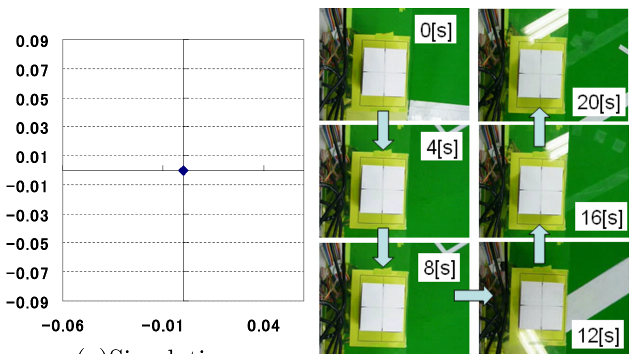
(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 20: Part of B for Fig.18



(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 21: Translational velocity (Limited)



(a)Simulation (b)Experiment

Fig. 22: Slipping locus (Limited)

角コースを設定した．角を曲がりきった $t = 11.0$ 秒以降は停止のための加速度に切り替わる．定数 L の値をそれぞれ $L = 0.1$，$L = 0.2$，$L = 0.3$ と変更し，その他の条件は 5.1 節と同様にする．

Fig.24 に $L = 0.1$，Fig.25 に $L = 0.2$，Fig.26 に $L = 0.3$ の場合のシミュレーション結果を示す．また Fig.24, Fig.25，Fig.26，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 $\dot{V}_{0,max}$ と加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$ 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 の値が増すごとに目標軌道への誘導の精度が低くなることがわかる．つまり角を曲がる際には L の値が増すごとによりゆるいカーブを走行していることになる．次にそれぞれの (b) の結果について考察する．まず，Fig.24(b) 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 (26) の D が負になった際に $\dot{V}_{0,max} = 1.0$ と設定したためである．したがって，$t = 9.35$ 秒からは最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の計算が出来ていないことになる．そのため，加速度制限は働かず積載物を滑らせてしまう．次に Fig.25(b) を見ると，Fig.24(b) に見られたような最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の計算が出来ていない箇所がなく，$t = 9.03$ 秒から $t = 9.33$ 秒までの間で加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$ が最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を超えないように減少し，加速度制限が働いていることがわかる．最後に Fig.26(b) を見ると，Fig.25(b) 同様に最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の減少は見られるが，加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$ 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．これは先に述べた通り，$L = 0.2$ の時よりもゆる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最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の計算が出来ない箇所が無くなるが，目標軌道への誘導の精度が低くなるといえる．

5.3　直角コースにおける加速度制限

5.2 節と同様の目標軌道を与え，シミュレーションと実験を行った．今回，5.2 節の結果を踏まえて $L = 0.24$ とし，その他の条件は 5.2 節と同様にする．

シミュレーションと実験の結果を Fig.27，Fig.28，Fig.29 に示す．Fig.27 は目標軌道と移動ロボットの軌跡，Fig.28 は最大加速度 $\dot{V}_{0d}^{+}(t)$ と加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$，Fig.29 は誘導制御出力速度 $\bar{V}_{0d}^{+}(t)$ と実際の速度 $V_0(t)$ を表している．また，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.27 より，移動ロボットは直角の目標軌道を追従できていることがわかる．また Fig.28 より，$t = 9$ 秒あたりで加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$ が最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ を超えないように減少し，加速度制限が働いている．さらに Fig.29 より，加速度制限が働いている時には加速度指令値 $\dot{\bar{V}}_{0d}^{+}(t)$ が負の値になるため，その間は速度 $V_0(t)$ が減少していることが確認できる．

以上の結果より，目標軌道で直角コースを与えても提案手法が有効であることが確認できた．

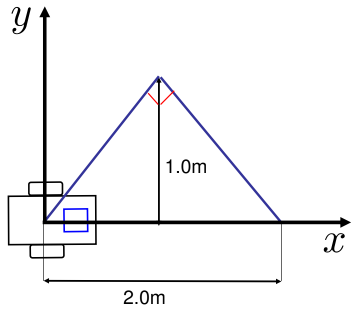
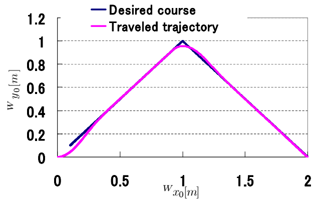


Fig. 23: Desired course



(a)Locus of mobile robot

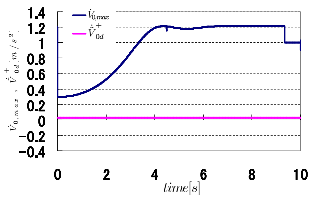
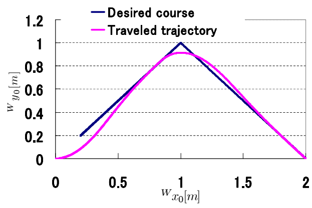

(b)Translational acceleration

Fig. 24: $L = 0.1$



(a)Locus of mobile robot

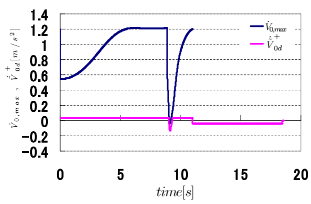
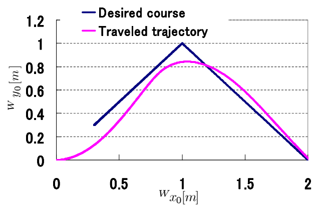

(b)Translational acceleration

Fig. 25: $L = 0.2$



(a)Locus of mobile robot

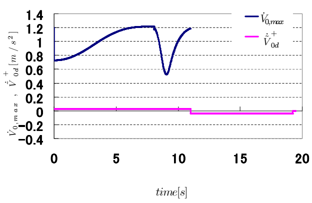
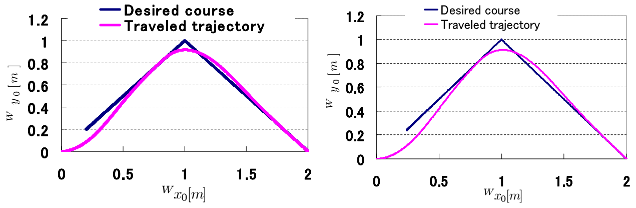
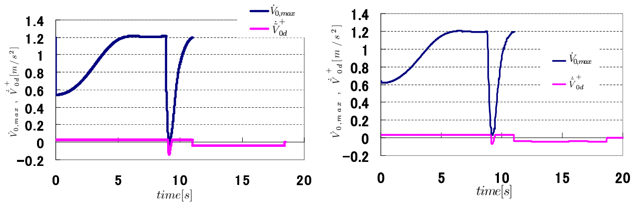

(b)Translational acceleration

Fig. 26: $L = 0.3$



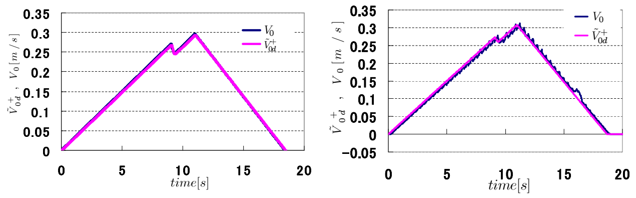
(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 27: Locus of mobile robot



(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 28: Translational acceleration



(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 29: Translational velocity

5.4　鋭角コースにおける加速度制限

目標軌道を $x_d \leqq 1.0$ の時，$y_d = x_d$，$x_d > 1.0$ の時，$y_d = -2x_d + 3.0$ とし，Fig.30 のような鋭角コースを設定し，シミュレーションと実験を行った．今回，5.2 節の結果を踏まえて $L = 0.25$ とし，その他の条件は 5.2 節と同様にする．Fig.31 に目標軌道と移動ロボットの軌跡，Fig.32 に最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$，Fig.33 に誘導制御出力速度 $\tilde{V}^{+}_{0d}(t)$ と実際の速度 $V_0(t)$ を示す．また，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.31 から，移動ロボットは少しオーバーラン気味に走行しているものの，鋭角コースを曲がれていることがわかる．また Fig.32 より，$t = 9$ 秒のあたりで加速度制限が働いていることが確認できる．さらに，直角コースよりも曲がる角度が鋭いため，Fig.28 より最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ の減少が大きく，加速度制限が大きく働いている．Fig.33 からも速度 $V_0(t)$ の減少がはっきりとわかり，加速度制限が働いている様子がわかる．

以上の結果より，目標軌道で鋭角コースを与えても提案手法が有効であることが確認できた．

6　結言

本報告は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．また，4.1 節で示した定数 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．さらに本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．

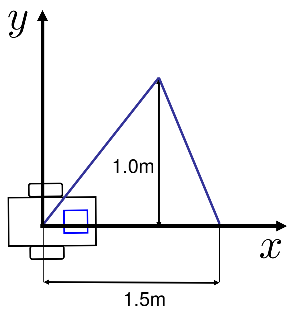
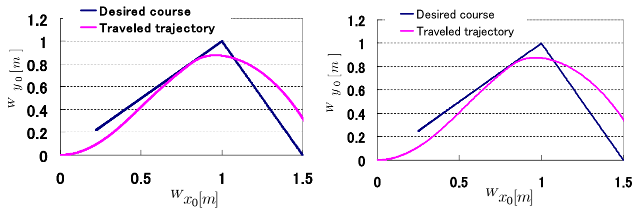
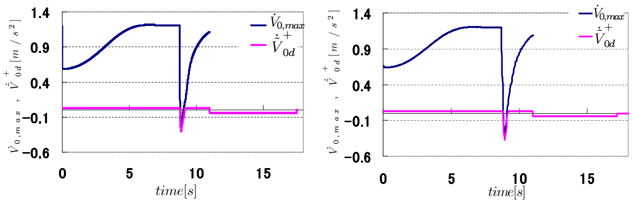


Fig. 30: Desired course



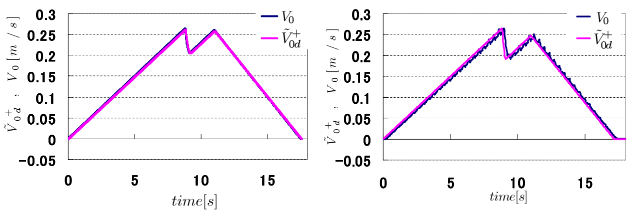
(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 31: Locus of mobile robot



(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 32: Translational acceleration



(a)Simulation　　(b)Experiment

Fig. 33: Translational velocity

参考文献

[1] 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 (2007.5)

[2] 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，pp3227-3235(2004.11)

[3] 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, (1998),317-320.