2P2-D22

積載物の滑りを考慮した加速度制限つき最速誘導制御

Fastest Guidance Control with Accelerative Restriction Considering Slipping Movement of Carrying Objects

○ 向野　政紀, 見浪　護 (福井大学)

Masanori MUKONO, Mamoru Minami

Fukui, University of Fukui, {mukono,minami}@rc.his.fukui-u.ac.jp

Some of conveyance tasks of the mobile robot are used to improve the efficiency of the production system. If the induced inertia force and torque should be bigger than the maximum static friction force and torque, the carrying objects begin a slipping motion on the mobile robot and it is a serious problem for the production system. When carrying objects slip off the mobile robots, they may be broken and the accident interferes with accurate traveling motion of the mobile robot. Then, in this study we set the purpose of this research to guide the mobile robot as fast as possible while keeping the objects not slip. Effectiveness of the guidance control with accelerative restriction of the mobile robot is verified with travelling experiment with mobile robot.

Key Words: 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．

ロボットの走行を制御することで滑りを防止し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．そして，作業効率が上昇することで生産性の向上，労働者の労働時間の短縮になり，以前と変わらぬ給料で自由な時間が増え，ゆとりのある生活が送れるようになる．

本研究では，積載物の滑りを防止し固定することなくロボットができるだけ速く搬送作業を行うことを目的とし，加速度制限つき最速誘導制御法という制御法を用いる．この制御法は，加速度センサなどの外界センサを用いずに，積載物を滑らせずに最大許容速度で走行するというものである．実機による走行実験を行うことで，加速度制限つき最速誘導制御法の有効性を示す．

2. 積載物に作用する力

2.1 静止摩擦力

基準座標系 Σ_W 内を走行する移動ロボットに固定した Σ_0 上の点 ${}^W\boldsymbol{P}_0$ に位置する積載物 S の位置を Σ_W で表すとき ${}^W\boldsymbol{P}_{W,S} = {}^W\boldsymbol{P}_{W,0} + {}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{P}_{0,S}$ と表される．この関係を時間で微分することによって ${}^W\dot{\boldsymbol{P}}_{W,S}$，${}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,S}$ を求めると，

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

となる．次に積載物の角速度 ${}^W\boldsymbol{\omega}_S$，角加速度 ${}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_S$ は，

$$
\begin{aligned}
{}^W\boldsymbol{\omega}_S &= {}^W\boldsymbol{\omega}_0 + {}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{\omega}_S \qquad (3)\\
{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_S &= {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_S + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{\omega}_S) \qquad (4)
\end{aligned}
$$

ここで，移動ロボットの運動中に積載物が滑り移動を起こさない時，${}^0\dot{\boldsymbol{P}}_{0,S} = {}^0\ddot{\boldsymbol{P}}_{0,S} = {}^0\boldsymbol{\omega}_S = {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_S = \boldsymbol{0}$ となる．この時，Σ_W から見た移動ロボット上の積載物の並進速度 ${}^W\dot{\boldsymbol{P}}^*_{W,S}$，並進加速度 ${}^W\ddot{\boldsymbol{P}}^*_{W,S}$，回転角速度 ${}^W\boldsymbol{\omega}^*_S$，回転角加速度 ${}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}^*_S$ は，

$$
\begin{aligned}
{}^W\dot{\boldsymbol{P}}^*_{W,S} &= {}^W\dot{\boldsymbol{P}}_{W,0} + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{P}_{0,S}) \qquad (5)\\
{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}^*_{W,S} &= {}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,0} + {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{P}_{0,S}) \\
&\quad + {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times \{{}^W\boldsymbol{\omega}_0 \times ({}^W\boldsymbol{R}_0{}^0\boldsymbol{P}_{0,S})\} \qquad (6)\\
{}^W\boldsymbol{\omega}^*_S &= {}^W\boldsymbol{\omega}_0 \qquad (7)\\
{}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}^*_S &= {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \qquad (8)
\end{aligned}
$$

また，移動ロボット上において滑りが発生しないとき，静止摩擦力と慣性力は釣り合っている．よって移動ロボットと共に運動し，移動ロボット上で滑りを起こさない時の静止摩擦力 ${}^W\boldsymbol{f}_S^*$，${}^W\boldsymbol{\tau}_S^*$ は

$$ {}^W\boldsymbol{f}_S^* = m_S {}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_{W,S}^* \tag{9} $$

$$ {}^W\boldsymbol{\tau}_S^* = {}^W\boldsymbol{I}_S {}^W\dot{\boldsymbol{\omega}}_S^* + {}^W\boldsymbol{\omega}_S^* \times ({}^W\boldsymbol{I}_S {}^W\boldsymbol{\omega}_S^*) \tag{10} $$

と表せる．

2.2 最大静止摩擦力

静止摩擦力，静止摩擦トルクにはそれぞれ最大値が存在し，これを超えた場合に積載物は滑り始める．逆に，${}^W\boldsymbol{f}_S^*$，${}^W\boldsymbol{\tau}_S^*$ が最大静止摩擦力以下ならば，積載物は移動ロボット上を滑らない．最大静止摩擦力，最大静止摩擦トルクは，

$$ {}^W\boldsymbol{f}_{S,max} = -\frac{{}^W\boldsymbol{f}_S^*}{||{}^W\boldsymbol{f}_S^*||}\mu m_S g \tag{11} $$

$$ {}^W\boldsymbol{\tau}_{S,max} = -[0, 0, \int_S \Delta f_S r_S ds]^T \tag{12} $$

と表される．ここで，$-{}^W\boldsymbol{f}_S^*/||{}^W\boldsymbol{f}_S^*||$ は最大静止摩擦力が働く方向を表し，積載物の移動する方向とは逆方向である．また，μ は静止摩擦係数，m_S は積載物の質量，g は重力加速度，r_S は積載物の質量中心から微小領域 ds までの距離，Δf_S は微小領域に作用する静止摩擦力である．$||{}^W\boldsymbol{f}_S^*|| < ||{}^W\boldsymbol{f}_{S,max}||$ かつ $||{}^W\boldsymbol{\tau}_S^*|| < ||{}^W\boldsymbol{\tau}_{S,max}||$ の条件を満たしている間は積載物は滑らずに移動ロボット上で静止している．

3．移動ロボットの誘導制御

3.1 瞬時目標と追従する誘導方法

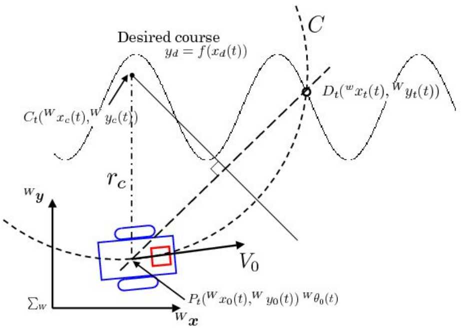

Fig. 1: Relation between the mobile robot and the desired couse

移動ロボットを走行させるときの目標軌道は既知であり，$y_d(t) = f(x_d(t))$ とする．また，Fig.1 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 $(x_d(t), y_d(t))$ の空間周波数によっ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 を通り，移動ロボットの速度ベクトル $\boldsymbol{V}_0(t)$ と P_t 点で接する円 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．

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．

3.2 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

$$ ||{}^W\boldsymbol{f}_S^*|| = m_S\sqrt{(\dot{V}_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0\sin\theta_0 + a_y)^2} \tag{13} $$

となる．ここで，

$$ \begin{aligned} a_x = &-V_0\dot{\theta}_0\sin\theta_0 - \ddot{\theta}_0({}^0x_S\sin\theta_0 + {}^0y_S\cos\theta_0) \\ &-\dot{\theta}_0^2({}^0x_S\cos\theta_0 - {}^0y_S\sin\theta_0) \end{aligned} \tag{14} $$

$$ \begin{aligned} a_y = &V_0\dot{\theta}_0\cos\theta_0 + \ddot{\theta}_0({}^0x_S\cos\theta_0 - {}^0y_S\sin\theta_0) \\ &-\dot{\theta}_0^2({}^0x_S\sin\theta_0 + {}^0y_S\cos\theta_0) \end{aligned} \tag{15} $$

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．

$$ ||{}^W\ddot{\boldsymbol{P}}_S^*|| = \sqrt{(\dot{V}_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0\sin\theta_0 + a_y)^2} < \frac{{}^W f_{S,max}}{m_S} \tag{16} $$

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

$$ (\dot{V}_0\cos\theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0\sin\theta_0 + a_y)^2 < \frac{{}^W f_{S,max}^2}{m_S^2} \tag{17} $$

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 と $V_0(t) = ||V_0(t)|| = \sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}$ を用いて次のように表わされる．

$$ \dot{\theta}_0(t) = \frac{V_0(t)}{r_c(t)} \tag{18} $$

$$ \ddot{\theta}_0(t) = \frac{r_c(t)\dot{V}_0(t) - \dot{r}_c(t)V_0(t)}{r_c^2(t)} \tag{19} $$

式 (18)，(19) を用い，式 (17) を $\dot{V}_0$ について解くと次式が得られる．

$$ \dot{V}_{0,min}(r_c, \dot{r}_c, V_0) < \dot{V}_0 < \dot{V}_{0,max}(r_c, \dot{r}_c, V_0) \tag{20} $$

以上を整理すると，式 (20) の加速度制限値はそれぞれ

$$\dot{V}_{0,max} = \frac{-(\frac{V_0 \dot{r}_c {}^0y_S}{r_c^2} - \frac{V_0 \dot{r}_c ({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^3}) + \sqrt{D}}{(1 - \frac{2\,{}^0y_S}{r_c} + \frac{({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^2})} \quad (21)$$

$$\dot{V}_{0,min} = \frac{-(\frac{V_0 \dot{r}_c {}^0y_S}{r_c^2} - \frac{V_0 \dot{r}_c ({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^3}) - \sqrt{D}}{(1 - \frac{2\,{}^0y_S}{r_c} + \frac{({}^0x_S^2 + {}^0y_S^2)}{r_c^2})} \quad (22)$$

で表すことができる．ここで，D は式 (17) の $\dot{V}_0$ に関する 2 次代数方程式の判別式である．

3.3 加速度制限つき誘導制御

一般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構成されているため，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すると考えられる．速度は制御周期 Δt 秒毎に $V_{0d}(t)$ を指示される．時刻 t 直前の実際の速度を $V_0^-(t)$，直後の目標速度を $V_{0d}^+(t)$ と表すと，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

$$\dot{V}_{0d}^+(t) \fallingdotseq \frac{V_{0d}^+(t) - V_0^-(t)}{\Delta t} \quad (23)$$

と表される．式 (23) で得た予定の加速度 $\dot{V}_{0d}^+(t)$ と式 (21), (22) 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．

$$\dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t) = \begin{cases} \dot{V}_{0,max} - \epsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) > \dot{V}_{0,max} - \epsilon) \\ \dot{V}_{0d}^+(t) & (\dot{V}_{0,min} \le \dot{V}_{0d}^+(t) \le \dot{V}_{0,max}) \\ \dot{V}_{0,min} + \epsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) < \dot{V}_{0,min} + \epsilon) \end{cases} \quad (24)$$

ここで，ϵ は積載物を滑らさずに誘導走行させ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 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ を以下のように求める．

$$\tilde{V}_{0d}^+(t) = \dot{\tilde{V}}_{0d}^+(t)\Delta t + V_0^-(t) \quad (25)$$

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．

$$\tilde{V}_{ref,i}^+(t) = \frac{1}{r_c}(r_c \pm \frac{T}{2})\tilde{V}_{0d}^+(t) \ ,(i{=}R,L) \quad (26)$$

4. 実機による検証

4.1 実験機

Fig.2 に示した移動ロボットを用いて走行実験を行った．移動ロボットは PWS 型であり，左右独立駆動型のモータを用いている．搬送台はアクリル板により作成し，積載物

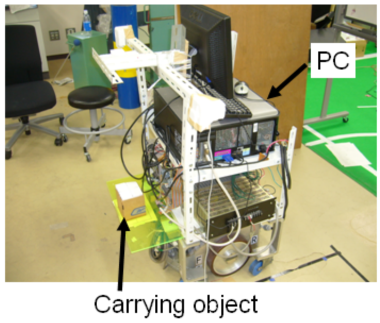

Fig. 2: PWS-type Mobile robot

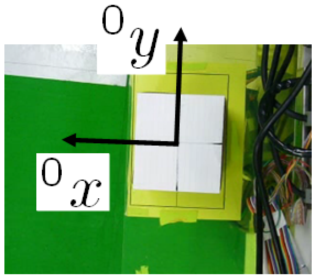

Fig. 3: Carrying object on the Mobile robot

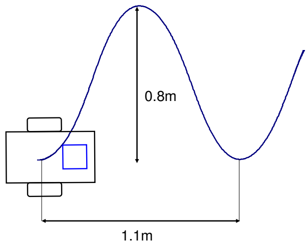

Fig. 4: Desired Course

としては段ボール製の箱を使用した．積載物の上方にカメラを固定し，搬送台上の積載物の動きを観察した．固定したカメラから積載物を撮影した実際の画像を Fig.3 に示す．移動ロボットは画像左方を進行方向として，目標軌道に追従しながら走行していく．

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，回転角度と角速度が測定されている．駆動モータの増幅器は速度制御型である．

4.2 実験内容

実機の初期位置姿勢を $({}^Wx_0(0), {}^Wy_0(0), {}^W\theta_0(0)) = (0,0,0)$，目標軌道を $y_d(t) = k(1 - \cos\omega x_d(t))$ とし，加速度制限をかける場合と加速度制限をかけない場合の走行実験を行った．ここで，$k = 0.4$，$\omega = 2\pi/T$，$T = 1.1$，目標速度は $V_{0d}(t) = \dot{V}_{0d} \cdot t$ とし，$\dot{V}_{0d} = 0.037[m/s^2]$ とする．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 とした．加速度制限をかけた場合には $t = 14.4[s]$，加速度制限をかけない場合は $t = 7.1[s]$ で停止のための加速度 $\dot{V}_{0d} = -0.05[m/s^2]$ に切り替わる．これは，加速度制限をかける実験では 2 つのカーブを走行し，加速度制限をかけない場合では 1 つのカーブを走行し停止することになる．加速度制限をかけない場合に 2 つ目のカーブを走行しない理由は，加速度一定で加速し続けるため，車輪に掛かる電圧が規定の範囲を超えてしまうためである．

以上のような条件で実験を行い，加速度制限の有効性を調べた．

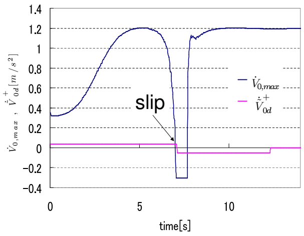

Fig. 5: Acceleration (Not Limited)

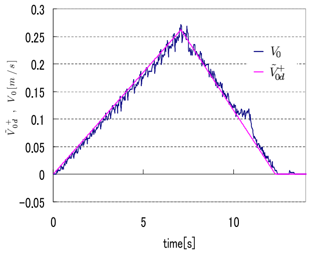

Fig. 6: Velocity (Not Limited)

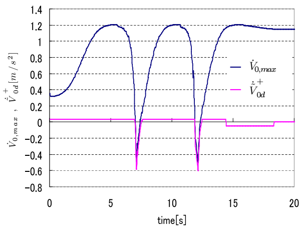

Fig. 7: Acceleration (Limited)

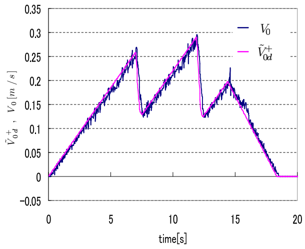

Fig. 8: Velocity (Limited)

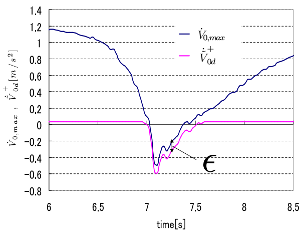

Fig. 9: 6.0[s]〜8.5[s] of Fig.7

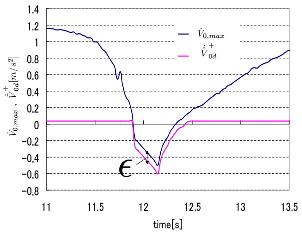

Fig. 10: 11.0[s]〜13.5[s] of Fig.7

4.3 結果と考察

まず，加速度制限を行わなかった場合の走行結果について考察する．Fig5，Fig6，Fig11 は加速度制限を行わなかった場合の走行結果で，それぞれ最大加速度 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ と加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$ のグラフ，実際の速度 $V_0(t)$ と誘導制御出力速度 $\tilde{V}^{+}_{0d}(t)$ のグラフ，積載物の様子を移動ロボットに固定したカメラで撮影したものである．Fig.5 を見ると，Slip と矢印のついた $t = 7.05[s]$ 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 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ を超えている．そのため，加速度制限を行わない場合には，$t = 7.05[s]$ に積載物は滑り始める．Fig11 からも実際に積載物の滑り移動の様子がわかる．積載物が滑り出す時間も $t = 7[s]$ から $t = 7.1[s]$ の間で，Fig.5 のデータとほぼ一致している．また，積載物が滑って搬送台から落ちてしまい，急ブレーキか積載物を拾わないと移動ロボットが積載物を轢いてしまうため，危険であることは明らかである．

次に，加速度制限を行った場合の走行結果について考察する．Fig7，Fig8，Fig9，Fig10，Fig12 は加速度制限を行った場合の走行結果で，それぞれ最大加速度 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ と加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$ のグラフ，実際の速度 $V_0(t)$ と誘導制御出力速度 $\tilde{V}^{+}_{0d}(t)$ のグラフ，Fig7 の 6.0[s]〜8.5[s]，および 11.0[s]〜13.5[s] の部分を拡大したもの，積載物の様子を移動ロボットに固定したカメラで撮影したものである．Fig.7，Fig.9，Fig.10 を見ると，$t = 6.99[s]$ から $t = 7.56[s]$ の間と $t = 11.91[s]$ から $t = 12.45[s]$ の間で加速度制限が働いている．その間は最大加速度 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ の減少と共に加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$ も最大加速度 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ を超えないように下がっている．また，Fig.9，Fig.10 から，加速度制限が働いているときに加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$ が最大加速度 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ よりも常に ϵ だけ小さい値であることがわかる．これは，加速度制限が働いている間は ϵ を考慮した上で最速であるといえる．さらに，加速度制限が働いているときには加速度指令値 $\dot{\tilde{V}}^{+}_{0d}(t)$ が負の値になるため，その間は速度が落ちていることが Fig8 より確認できる．

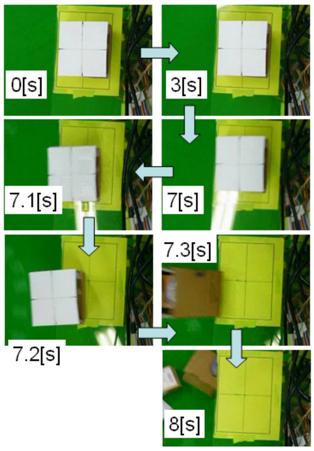

Fig. 11: Carrying object (Not Limited)

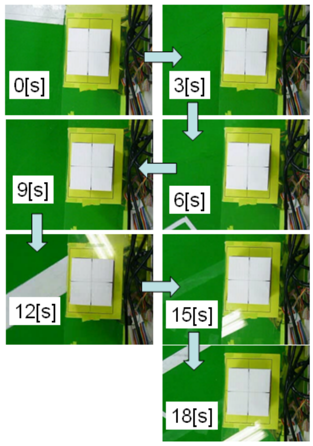

Fig. 12: Carrying object (Limited)

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 $\dot{V}^{+}_{0d}(t)$ を超えないため，積載物は滑らない．Fig12 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．

5. 結言

実機での走行実験により，加速度制限つき最速誘導制御法の有効性を確認した．今後は，様々な軌道で走行をし，更なる有効性を示す必要があると考える．

参考文献

[1] 川崎晴久，“ロボット工学の基礎”

[2] 矢崎靖啓，“PWS 型移動ロボットの加速度制限つき最速誘導制御”，平成 17 年度修士論文

[3] 竹内元哉，“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”，平成 15 年度修士論文