

# PWS型移動ロボットの加速度制限付き最速誘導制御

矢崎 靖啓<sup>\*1</sup> 池田 毅<sup>\*2</sup> 竹内 元哉<sup>\*3</sup> 見浪 護<sup>\*4</sup>

## Fastest Guidance Control with Acceleration Restriction of PWS Mobile Robot

Yasuhiro Yazaki<sup>\*1</sup>, Takeshi Ikeda<sup>\*2</sup>, Motoya Takeuchi<sup>\*3</sup> and Mamoru Minami<sup>\*4</sup>

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 guidance control. On the other hand, mobile robots are desired to transfer the carrying objects as fast as it can. On this view point of this contradicted requirement, this paper purposes a controller to guide a mobile robot along a given course as fast as possible with acceleration restriction not to slip the carrying objects during traveling. The performances have been examined by simulations.

**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に限らず病院などでの配膳作業を考えると、短い距離を走行し、積み下ろしを繰り返している。このような場合、搬送の対象を固定していたのでは作業効率の低下を招く。この搬送作業において積み込んだ荷物（積載物）と走行途中の移動ロボットの走行運動との関係で問題となるのは、積載物に作用する慣性力が最大静止摩擦力以上になる場合、積載物は移動ロボット上を滑ることである。このように作業効率を考慮し積載物を固定せず搬送する場合には、積載物の滑りが移動ロボットのダイナミクスを変化させ、誘導制御系を不安定にさせる危険性がある。その結果、滑り運動は走行台車の走行運動に外乱として作用し、さらに積載物の落下、破損などの原因だけでなく、滑り移動は載荷時と脱荷時に積載物の位置が変わる原因となり、走行後の作業効率の低下につながるというデメリットがある。以上の点から積載物の滑りを抑制する必要がある。積載物の滑りを発生させる原因である移動ロボットの加速度を制限し、積載

物を滑らさない誘導制御を行うべきである。そこで、本研究の第一段階として、筆者らは、積載物の滑りのダイナミクスを含む移動ロボットのモデリングを行い、そのモデルの有効性を実験機を用いて確認した[1]。

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[2]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[3][4]がある。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[5]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[6][7]がある。さらに移動ロボットの誘導走行方法としては、搬送作業に関して積載物の滑りや落下を防ぐものではなく、移動ロボットの走行のみに関してダイナミクスを推定しながらニューラルネットワークを用いて軌道追従を行うものであったり、ダイナミクスを無視した手法[8]~[11]が提案されている。

そこで本報告では、提案した積載物の滑りを考慮した力学モデルに基づいて積載物に作用する摩擦力と移動ロボットの運動の影響に着目し、積載物を滑らさない制約の中、最高速で誘導走行する制御方法を提案する[12]。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要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

原稿受付 2006年3月31日

<sup>\*1</sup>福井大学大学院工学研究科, 現:株式会社ビック東海

<sup>\*2</sup>福井大学大学院工学研究科, 現:九州大学大学院工学研究院

<sup>\*3</sup>株式会社東海理化

<sup>\*4</sup>福井大学大学院工学研究科

<sup>\*1</sup>Graduate School of Engineering, University of Fukui, Currently with VIC TOKAI CORPORATION

<sup>\*2</sup>Graduate School of Engineering, University of Fukui, Currently with Kyushu University

<sup>\*3</sup>TOKAI RIKI CO., LTD.

<sup>\*4</sup>Graduate School of Engineering, University of Fukui

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さ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により示すことで、提案手法の有効性を確認する。

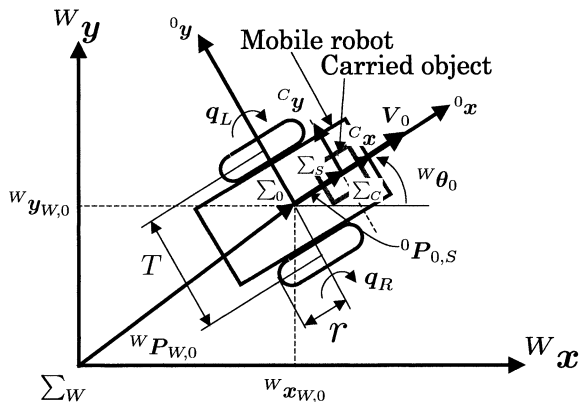
## 2. 座標系とモデリング方法

**Fig. 1** に示す 2 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について考える。走行路面は水平であり、車輪が滑らないことを仮定する。この仮定は、工場等で使用されている無人搬送車の走行速度 (40 [m/min] 以下) では妥当である。また、ここでは移動ロボット上の積載面は水平を保つことを仮定する。これは工場内で作業する移動ロボットは乗り心地を考慮する必要がないため車輪と車軸およびモータはバネ・ダンパを介さず直結されていることによる。

$\Sigma_W$  は基準座標系を表し、移動ロボットに固定された  $\Sigma_0$  は左右の駆動輪を結ぶ軸の中間に原点を持ち、車軸方向に  ${}^0y$  軸を、また車軸に垂直で移動ロボットの進行方向に  ${}^0x$  軸をとる。左上の添え字は基準とする座標系を、右下のそれは対象としている座標系を表す。 $\Sigma_S$  は積載物 S の重心に固定された座標系を表す。 ${}^0x$  軸、 ${}^0y$  軸と同じ方向にそれぞれ  ${}^c x$  軸、 ${}^c y$  軸を持つカメラ座標系  $\Sigma_c$  を滑り移動する積載物の運動を観察するために搬送台上に固定する。

$\Sigma_0$  の  $x$ ,  $y$  軸回りの回転は駆動輪と前後のキャスタ輪により拘束されているので、 $\Sigma_0$  で表された移動ロボットの角速度  ${}^0\omega_0$  は  ${}^0\omega_0 = [0 \ 0 \ \omega_0]^T$ ,  $\omega_0 = {}^W\dot{\theta}_0$  と表される。 $\Sigma_0$  の  $z$  軸  ${}^Wz_0$  は  $\Sigma_W$  の  $z$  軸方向と一致しているため  ${}^0\omega_0$  は基準座標系  $\Sigma_W$  で表した移動ロボットの角速度ベクトル  ${}^W\omega_0$  と等しい。次に  $\Sigma_0$  の  $y$  軸方向の並進は車輪の摩擦力により拘束されており、 $z$  軸方向の並進も重力によって拘束されているから、 $\Sigma_0$  で表された移動ロボットの並進速度  ${}^0V_0$  は常に  ${}^0x$  軸方向の成分以外は零であり  ${}^0V_0 = [V_0, 0, 0]^T$  となる。また  $\Sigma_W$  で表された  $\Sigma_0$  の座標変換行列を  ${}^WR_0$  で表す。

$\Sigma_W$  における  $\Sigma_0$  の原点の位置を  ${}^Wx_0, {}^Wy_0$ , 移動ロボットの回転角を  ${}^W\theta_0$  と表すと、移動ロボットの一般化座標は  ${}^Wx_0, {}^Wy_0, {}^W\theta_0$  の 3 変数で表すことができる。左右駆動輪の回転角を



**Fig. 1** Mobile robot on the standard of coordinates

$q_L, q_R$ , 車輪の半径を  $r$ , 左右車輪間の長さを  $T$  と表す。 ${}^Wx_0$  軸方向の移動ロボットの走行速度  $V_0$ , 回転角速度  $\omega_0$  は、次式で表される。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ -\frac{r}{T} & \frac{r}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_L \\ \dot{q}_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、一般化座標の速度  ${}^W\dot{x}_0, {}^W\dot{y}_0, {}^W\dot{\theta}_0$  と  $V_0, \omega_0$  の関係は次式で得られる。

$$\begin{bmatrix} {}^W\dot{x}_0 \\ {}^W\dot{y}_0 \\ {}^W\dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos {}^W\theta_0 & 0 \\ \sin {}^W\theta_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) の第 1, 第 2 行の関係を用いて  $V_0$  を消去して得られる次式

$${}^W\dot{x}_0 \sin {}^W\theta_0 - {}^W\dot{y}_0 \cos {}^W\theta_0 = 0 \quad (3)$$

は、移動ロボットの走行運動が非ホロノミックな運動であることを表している。移動ロボットのモデリングでは、一般化座標で表された運動方程式を式 (2) 中の右辺第 2 項の行列の零空間を用いて非ホロノミックな拘束条件の数だけ次元を落としてモデリングする手法 [13] が一般的に知られている。この方法は、一般化座標  ${}^Wx_0, {}^Wy_0, {}^W\theta_0$  を用いて表された運動方程式の変数を  $V_0, \omega_0$  に変換して次元を落としている。これに対してここでは、最初から  $V_0, \omega_0$  を変数としてモデリングを行うことで拘束条件を用いた低次元化の手順を省くことができ、本報ではこの方法に従ってモデリングを行った積載物の滑り移動を考慮した移動ロボットのモデル [1] を用いた。

## 3. 積載物に働く作用力

### 3.1 静止摩擦力

基準座標系  $\Sigma_W$  内を走行する移動ロボットに固定した座標系  $\Sigma_0$  上の点  ${}^0P_{0,S}$  に位置する積載物 S の位置を  $\Sigma_W$  で表すとき  ${}^WP_{W,S}$  は、

$${}^WP_{W,S} = {}^WP_{W,0} + {}^WR_0 {}^0P_{0,S} \quad (4)$$

と表される。

これを時間で微分することにより  ${}^W\dot{P}_{W,S}, {}^W\ddot{P}_{W,S}$  は、

$$\begin{aligned} {}^W\dot{P}_{W,S} &= {}^W\dot{P}_{W,0} + {}^WR_0 {}^0\dot{P}_{0,S} + {}^W\omega_0 \times ({}^WR_0 {}^0P_{0,S}) \\ {}^W\ddot{P}_{W,S} &= {}^W\ddot{P}_{W,0} + {}^WR_0 {}^0\ddot{P}_{0,S} + 2{}^W\omega_0 \times ({}^WR_0 {}^0\dot{P}_{0,S}) \\ &\quad + {}^W\dot{\omega}_0 \times ({}^WR_0 {}^0P_{0,S}) + {}^W\omega_0 \times \{ {}^W\omega_0 \times ({}^WR_0 {}^0P_{0,S}) \} \end{aligned} \quad (5)$$

と表される。また積載物の角速度  ${}^W\omega_S$  角加速度  ${}^W\dot{\omega}_S$  は、

$${}^W\omega_S = {}^W\omega_0 + {}^WR_0 {}^0\omega_S \quad (7)$$

$${}^W\dot{\omega}_S = {}^W\dot{\omega}_0 + {}^WR_0 {}^0\dot{\omega}_S + {}^W\omega_0 \times ({}^WR_0 {}^0\omega_S) \quad (8)$$

と表される。

ここで、積載物が移動ロボットの運動中に滑り移動をしてい

ないときには、 ${}^0\dot{P}_{0,S} = {}^0\ddot{P}_{0,S} = {}^0\omega_S = {}^0\dot{\omega}_S = \mathbf{0}$  となる。これは、移動ロボット上で積載物が静止しているので位置  ${}^0P_{0,S}$ 、姿勢  $\theta_S$  が定数項となり速度項、加速度項が零となることを意味する。このとき  $\Sigma_W$  から見た移動ロボット上で静止状態にある積載物の速度、加速度、角速度、角加速度を  ${}^W\dot{P}_{W,S}^*$ 、 ${}^W\ddot{P}_{W,S}^*$ 、 ${}^W\omega_S^*$ 、 ${}^W\dot{\omega}_S^*$  と表すと、上式より

$${}^W\dot{P}_{W,S}^* = {}^W\dot{P}_0 + {}^W\omega_0 \times ({}^W R_0 {}^0P_{0,S}) \quad (9)$$

$${}^W\ddot{P}_{W,S}^* = {}^W\ddot{P}_0 + {}^W\dot{\omega}_0 \times ({}^W R_0 {}^0P_{0,S}) + {}^W\omega_0 \times \{ {}^W\omega_0 \times ({}^W R_0 {}^0P_{0,S}) \} \quad (10)$$

$${}^W\omega_S^* = {}^W\omega_0 \quad (11)$$

$${}^W\dot{\omega}_S^* = {}^W\dot{\omega}_0 \quad (12)$$

が得られる。

また滑り移動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。したが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ときの静止摩擦力  ${}^W f_S^*$ 、 ${}^W \tau_S^*$  は移動ロボットの運動に関する変数だけで支配され、

$${}^W f_S^* = m_S {}^W \ddot{P}_{W,S}^* \quad (13)$$

$${}^W \tau_S^* = {}^W I_S {}^W \dot{\omega}_S^* + {}^W \omega_S^* \times ({}^W I_S {}^W \omega_S^*) \quad (14)$$

と表される。

しかし、この静止摩擦力には次節に示す最大値が存在し、これを超えた場合に積載物は滑り移動を始める。逆に移動ロボットの運動に従って発生する  $\Sigma_W$  上の積載物の運動を引き起こす力とトルク  ${}^W f_S^*$ 、 ${}^W \tau_S^*$  が最大静止摩擦力以下であるとき積載物は移動ロボット上を滑らない。

### 3.2 最大静止摩擦力

まず、積載物が静止している間に移動ロボットとの間に作用する摩擦力の最大値を示す。最大静止摩擦力は積載物の垂直抗力に比例した値として求まり、

$${}^W f_{S,max} = - \frac{{}^W f_S^*}{\|{}^W f_S^*\|} \mu m_S g \quad (15)$$

$${}^W \tau_{S,max} = - \left[ 0, 0, \int_S \Delta f_s \rho ds \right]^T \quad (16)$$

と表される。ここで、 $-{}^W f_S^* / \|{}^W f_S^*\|$  : 最大静止摩擦力が働く方向、 $\mu$  : 静止摩擦係数、 $m_S$  : 積載物の質量、 $g$  : 重力加速度、 $\rho$  : 積載物の質量中心から微小面積  $ds$  までの距離、 $\Delta f_s$  :  $ds$  当たりの静止摩擦力である。上式以上の力、トルクが積載物に作用すると並進、回転の滑りが発生することから最大許容作用力を意味するため添字に *max* を付記している。 $\|{}^W f_S^*\| < \|{}^W f_{S,max}\|$  かつ  $\|{}^W \tau_S^*\| < \|{}^W \tau_{S,max}\|$  の条件を満たしている間は積載物は滑らず移動ロボット上で静止している。

## 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. 2 に示すように、移動ロボットの位置を

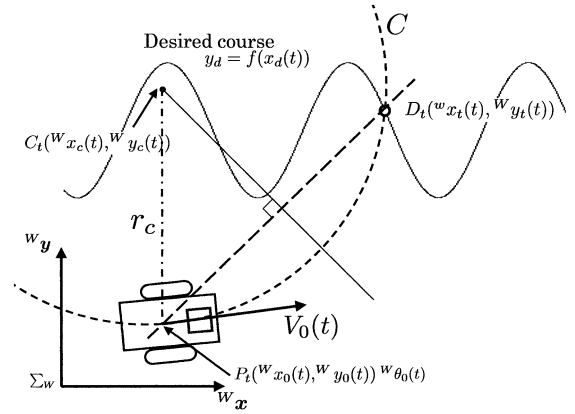


Fig. 2 Relation between the mobile robot and the desired course

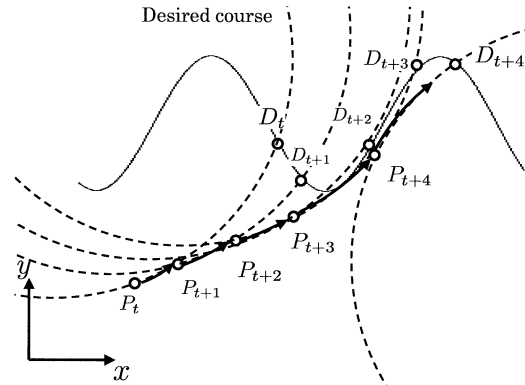


Fig. 3 Guidance traveling in time-series

$P_t(W x_0(t), W y_0(t))$ 、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  $V_0(t)$  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. 3 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式 (13) のユークリッドノルムで表され、

$$\|{}^W \mathbf{f}_S^*\| = m_S \sqrt{(\dot{V}_0 \cos \theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0 \sin \theta_0 + a_y)^2} \quad (17)$$

となる。ここで、

$$a_x = -V_0 \dot{\theta}_0 \sin \theta_0 - \ddot{\theta}_0 ({}^0 x_S \sin \theta_0 + {}^0 y_S \cos \theta_0) - \dot{\theta}_0^2 ({}^0 x_S \cos \theta_0 - {}^0 y_S \sin \theta_0) \quad (18)$$

$$a_y = V_0 \dot{\theta}_0 \cos \theta_0 + \ddot{\theta}_0 ({}^0 x_S \cos \theta_0 - {}^0 y_S \sin \theta_0) - \dot{\theta}_0^2 ({}^0 x_S \sin \theta_0 + {}^0 y_S \cos \theta_0) \quad (19)$$

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。

$$\|{}^W \ddot{\mathbf{P}}_S^*\| = \sqrt{(\dot{V}_0 \cos \theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0 \sin \theta_0 + a_y)^2} < \frac{{}^W f_{S,max}}{m_s} \quad (20)$$

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

$$(\dot{V}_0 \cos \theta_0 + a_x)^2 + (\dot{V}_0 \sin \theta_0 + a_y)^2 < \frac{{}^W f_{S,max}^2}{m_s^2} \quad (21)$$

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  $V_0(t) = \|\mathbf{V}_0(t)\|$  を用いて次のように表される。

$$\dot{\theta}_0(t) = \frac{V_0(t)}{r_c(t)} \quad (22)$$

$$\ddot{\theta}_0(t) = \frac{r_c(t)\dot{V}_0(t) - \dot{r}_c(t)V_0(t)}{r_c^2(t)} \quad (23)$$

式 (21) の不等式に式 (22), (23) 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。

$$\dot{V}_{0,min}(r_c, \dot{r}_c, V_0) < \dot{V}_0 < \dot{V}_{0,max}(r_c, \dot{r}_c, V_0) \quad (24)$$

式 (18), (19), (22), (23) を代入し整理すると、式 (24) の加速度制限値はそれぞれ、

$$\dot{V}_{0,max} = \frac{-\left(\frac{V_0 \dot{r}_c {}^0 y_S}{r_c^2} - \frac{V_0 \dot{r}_c ({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^3}\right) + \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{2 {}^0 y_S}{r_c} + \frac{{}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2}{r_c^2}\right)} \quad (25)$$

$$\dot{V}_{0,min} = \frac{-\left(\frac{V_0 \dot{r}_c {}^0 y_S}{r_c^2} - \frac{V_0 \dot{r}_c ({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^3}\right) - \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{2 {}^0 y_S}{r_c} + \frac{{}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2}{r_c^2}\right)} \quad (26)$$

と表される。ここで、

$$D = -\left\{\frac{1}{r_c^2} - \frac{2 {}^0 y_S}{r_c^3} + \frac{2({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^4} - \frac{4 {}^0 y_S^2}{r_c^4} - \frac{({}^0 x_S - 1)^2}{r_c^4} - \frac{4 {}^0 y_S ({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^5} + \frac{({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)^2}{r_c^6}\right\} V_0^4 + \left\{\frac{2 \dot{r}_c {}^0 x_S}{r_c^3} - \frac{2 {}^0 x_S {}^0 y_S \dot{r}_c}{r_c^4} - \frac{2 \dot{r}_c {}^0 y_S}{r_c^4} + \frac{2 \dot{r}_c ({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^5}\right\} V_0^3 - \left\{\frac{\dot{r}_c^2 ({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^4}\right\} V_0^2 + \left\{1 - \frac{2 {}^0 y_S}{r_c} + \frac{({}^0 x_S^2 + {}^0 y_S^2)}{r_c^2}\right\} \frac{f_{S,max}^2}{m_s^2}$$

である。

#### 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  $\Delta t$  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、 $V_{0d}^+(t)$  が指示された時に予定される加速度  $\dot{V}_{0d}^+(t)$  は、近似的に

$$\dot{V}_{0d}^+(t) \doteq \frac{V_{0d}^+(t) - V_0^-(t)}{\Delta t} \quad (27)$$

と表される。式 (27) で得た予定の加速度  $\dot{V}_{0d}^+(t)$  と式 (25), (26) 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  $\dot{V}_{0d}^+(t)$  を次式により決定する。

$$\dot{V}_{0d}^+(t) = \begin{cases} \dot{V}_{0,max} - \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) > \dot{V}_{0,max}) \\ \dot{V}_{0d}^+(t) & (\dot{V}_{0,min} \leq \dot{V}_{0d}^+(t) \leq \dot{V}_{0,max}) \\ \dot{V}_{0,min} + \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) < \dot{V}_{0,min}) \end{cases} \quad (28)$$

ここで、 $\varepsilon$  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  $\dot{V}_{0d}^+(t)$  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。

$$\tilde{V}_{0d}^+(t) = \dot{V}_{0d}^+(t) \Delta t + V_0^-(t) \quad (29)$$

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。

$$\tilde{v}_{ref,i}^+(t) = \frac{1}{r_c} \left(r_c \pm \frac{T}{2}\right) \tilde{V}_{0d}^+(t) \quad (i = R, L) \quad (30)$$

## 5. シミュレーション

### 5.1 速度制御型サーボ系

シミュレーションに使用した移動ロボットのパラメータを **Table 1** に示す。シミュレーションは速度制御型サーボ系の構成に基づいて行う。そこで  $K_{fi}$  を速度フィードバックゲイン、 $K_{mi}$  を電圧トルク変換ゲイン、 $\tau_{mi}$  をモータ出力トルクとすると、サーボ系およびモータの運動方程式は、

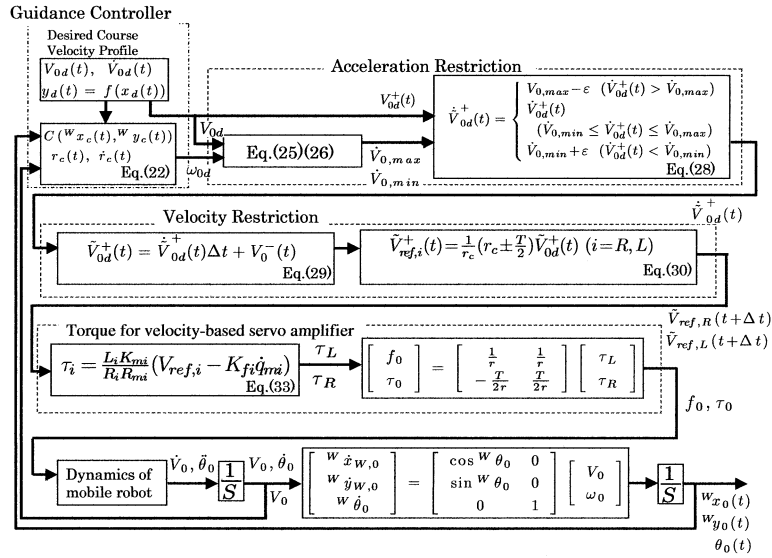


Fig. 4 Block diagram of guidance control

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	$m_0$	70.0	Kg
Mass of object	$m_s$	0.5	Kg
Moment of inertia (vehicle)	$I_{0z}$	0.93	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Moment of inertia (object)	$I_{sz}$	$0.42 \times 10^{-3}$	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Reduction ratio	$R_R$	1/52	-
	$R_L$	1/52	-
Servo Amplifier	$K_{fR}$	1.11	$\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
Velocity Feedback Gain	$K_{fL}$	1.11	$\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
Servo Amplifier	$K_{mR}$	0.613	$\text{Nm}/\text{V}$
Torque Gain	$K_{mL}$	0.613	$\text{Nm}/\text{V}$
Motor Resistance	$R_{mR}$	4.91	$\Omega$
	$R_{mL}$	4.91	$\Omega$
Torque Constant	$L_{mR}$	0.89	$\text{Nm}/\text{A}$
	$L_{mL}$	0.89	$\text{Nm}/\text{A}$

$$K_{mi}(V_{ref,i} - K_{fi}\dot{q}_{mi}) = \frac{R_{mi}}{L_i}\tau_{mi} \quad (i = L, R) \quad (31)$$

$$J_{mi}\ddot{q}_{mi} + D_{mi}\dot{q}_{mi} = \tau_{mi} - R_i\tau_i \quad (i = L, R) \quad (32)$$

と表される。ここで  $R_i (< 1)$  は減速比である。通常モータの慣性抵抗や粘性抵抗に比べ  $\tau_i$  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 (31), (32) を用いると出力  $\tau_i$ , 電圧指令値  $V_{ref,i}$  は、

$$\tau_i = \frac{L_i K_{mi}}{R_i R_{mi}} (V_{ref,i} - K_{fi}\dot{q}_{mi}) \quad (i = L, R) \quad (33)$$

と求められる。出力  $\tau_i$  と移動ロボットの並進方向に作用する力  $f_0$  と  $\Sigma_0$  の  $z_0$  軸回りに作用するトルク  $\tau_0$  の間には、次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ \tau_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \\ -\frac{T}{2r} & \frac{T}{2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} \quad (34)$$

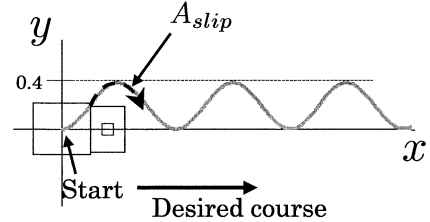


Fig. 5 Simulation image

ただし、 $T$  は車輪間距離、 $r$  は車輪半径を表す。

以上の加速度制限付き誘導制御のブロック線図を Fig. 4 に示す。このブロック線図内は提案したモデルに基づいて作られており、左右駆動輪への速度指示電圧を出力する前に Acceleration Restriction 部分において予測される加速度を積載物が滑らない範囲に制限し、入力を決定する。まず、現在の位置と姿勢 ( ${}^W x_0, {}^W y_0, \theta_0$ ) と現在の速度  $V_0$  をフィードバック情報として用いて Guidance Controller 部分により誘導走行円弧軌道を計算する。さらに、現在の速度  $V_0$  と Acceleration Restriction 部分において決定された加速度を用いて式 (29) に示した線形近似計算を行い、誘導制御出力速度を決定する。

ここで、誘導走行の際に問題として設定した滑りについて述べる。Table 1 に示したように移動ロボットの質量が大きいため、最大静止摩擦力の観点から移動ロボットの車輪と床面とのスリップは起こりにくく、質量の軽い積載物と搬送台との間の滑り現象のほうが発生しやすい。また、濡れた床面などでは摩擦係数が下がり、車輪と床面との間のスリップが発生しやすくなるが、そのような場合においても車輪のスリップが発生するような走行では積載物の滑りが発生していると考えられる。したがって、以下のシミュレーションでは積載物と移動ロボットの間に作用する力に注目し、議論する。

### 5.2 曲線コースにおける加速度制限

次に Fig. 5 に示すように、目標曲線コース  $y_d(t) = 0.2\{1 - \cos(2\pi x_d(t))\}$  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を行った。ここで、図中に示した点  $A_{Stip}$  は制限を付けない場合に積載物が滑り出した時刻を表しており、その時刻は  $t = 4.73$  [s] である。加速度制限による限界値への置き換えは式 (28) 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。

このとき、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、 $\dot{V}_{0d} = 0.05$  [m/s<sup>2</sup>] である。また、本節での摩擦係数は  $\mu = 0.12$  とする。Fig. 6 (a) に目標軌道と加速度制限を行った場合 (Limited) の軌跡、加速度制限を行わなかった場合 (Not limited) の移動ロボットの走行軌跡を示す。Fig. 6 (a) より、加速度制限を行った場合と行っていない場合、両方とも走行軌跡はほぼ同じであることが分かる。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少なためである。

しかし、以下に示すような違いがある。まず、Fig. 6 (a) の走行軌跡上の点について考察する。Fig. 6 (b) に示した加速度制限による走行が終了した後である 5.5 [s] の位置について見てみる。加速度制限がない場合には  $({}^W x_0, {}^W y_0) = (0.587, 0.371)$  まで走行しているのに対し、加速度制限を行い積載物を滑らせないように走行した場合には  $({}^W x_0, {}^W y_0) = (0.574, 0.377)$  までしか走行していない。これは、積載物が滑ると判定されたときには最速走行のための加速を優先した誘導走行ではなく、積載物を滑らせないことを優先した誘導走行に切り替わった結果である。しかしながら、Fig. 6 (a) に示したように制限を加えた結果、目標コースから逸れていくような走行は行っていない。これは現在位置をフィードバックし、誘導走行軌道を逐次計算しているからである。

移動ロボットの加速度  $\dot{V}_0$  と制限加速度  $\dot{V}_{0,max}$ ,  $\dot{V}_{0,min}$  の推移を Fig. 6 (c) に示す。このグラフより加速度が常に  $\dot{V}_{0,max}$  と  $\dot{V}_{0,min}$  に挟まれた領域内で推移していることが分かる。  $t = 4.73$  [s] から 5.12 [s] まで、 $\dot{V}_{0,max}$  が目標加速度  $\dot{V}_{0d}$  よりも小さくなったために提案した加速度制限が働き、加速度が減少しているためである。ここで、 $\dot{V}_{0,max}$  が変化する原因として、式 (24) 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  $V_0$  が変数として働いたためである。つまり、許容範囲である  $\dot{V}_{0,max}$  と  $\dot{V}_{0,min}$  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  $\dot{V}_{0,max}$  と  $\dot{V}_{0,min}$  を式 (25) と (26) によって計算し、境界とするためである。

今回の条件のように並進加速度を一定としている場合、静止摩擦力の成分である並進方向の慣性力は一定となるが、遠心力を含むその他の項が静止摩擦力内で大きく作用することから最大静止摩擦力以下に維持するためには  $\dot{V}_0$  を負にして  $V_0$  を減少させざるをえない状態となる。

この加速度制限は Fig. 6 (d), (e) に示すように  $V_0(t)$ ,  $\omega_0(t)$  を減少させている。すなわち、移動ロボットの加速度が減少するように制限されるとき、移動ロボットの速度と角速度もまた減少する。このことは、 $\dot{\theta}_0$ ,  $\ddot{\theta}_0$ ,  $V_0$  と  $\dot{V}_0$  の関係式 (22), (23) から分かる。式 (13) で表される積載物に作用する静止摩擦力の各成分ごとに記述すると、

$$\begin{aligned} {}^W f_{s,x} &= m_s \dot{V}_0 \cos \theta_0 - m_s V_0 \dot{\theta}_0 \sin \theta_0 \\ &\quad - m_s \ddot{\theta}_0 ({}^0 x_s \sin \theta_0 + {}^0 y_s \cos \theta_0) \\ &\quad - m_s \dot{\theta}_0^2 ({}^0 x_s \cos \theta_0 - {}^0 y_s \sin \theta_0) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} {}^W f_{s,y} &= m_s \dot{V}_0 \sin \theta_0 + m_s V_0 \dot{\theta}_0 \cos \theta_0 \\ &\quad + m_s \ddot{\theta}_0 ({}^0 x_s \cos \theta_0 - {}^0 y_s \sin \theta_0) \\ &\quad - m_s \dot{\theta}_0^2 ({}^0 x_s \sin \theta_0 + {}^0 y_s \cos \theta_0) \end{aligned} \quad (36)$$

となる。ここで、搬送台は水平を保つことを仮定しているのので  $z$  軸方向の力  ${}^W f_{s,z}$  については考えない。式 (35), (36) の右辺第一項は並進加速度に関する項である。ここでは添字にそれぞれ  $x1$ ,  $y1$  とつけて  $f_{x1}$ ,  $f_{y1}$  と表し、その推移を Fig. 6 (f) と Fig. 6 (g) に示す。また、第二項はコリオリに関する項であり  $f_{x2}$ ,  $f_{y2}$  とおき、その推移を Fig. 6 (h) と Fig. 6 (i) に示す。同様に第三項は回転角加速度に関する項であり  $f_{x3}$ ,  $f_{y3}$  とおき、その推移を Fig. 6 (j) と Fig. 6 (k) に示す。遠心力に関する項である第四項は  $f_{x4}$ ,  $f_{y4}$  とおき、その推移を Fig. 6 (l) と Fig. 6 (m) に示す。Fig. 6 (f) と Fig. 6 (g) は並進加速度に関する項であるので、“Limited” の線で表したように加速度制限が働くとき力が減少していることが見てとれる。Fig. 6 (h)~(m) についても加速度制限が働くことによって制限をかけずに走行したときと比べて作用力が小さくなっていることが分かる。これらの結果より加速度制限を行うことにより直接関わりのある  $f_{x1}$ ,  $f_{y1}$  の項だけでなく速度、角速度、角加速度に関する項についても積載物を滑らさないための効果があることが分かる。

また、Fig. 6 (n) に積載物に作用する静止摩擦力を示す。さらに、図中の  $A$  で示した領域を拡大したものを Fig. 6 (o) に示す。このグラフから、加速度制限を加えた状況では、積載物の静止摩擦力が最大値未満に抑えられていることが分かる。一方、制限を加えない場合には積載物の静止摩擦力は最大静止摩擦力を超え、滑り移動を始める。

この正弦曲線を走行する移動ロボットに載せた積載物の運動を考察するために、積載物の静止摩擦力を積載物中心に原点を持ち移動ロボットの搬送台に固定された積載物の座標系  $\Sigma_S$  ( $x-y$  軸は  $\Sigma_0$  と同じ方向) によって表したベクトル軌跡として記録したものを Fig. 6 (p) に示す。ここで、積載物に作用する慣性力を  $\Sigma_S$  で表現し  ${}^S \mathbf{F}_S^*$  とおくと、

$${}^S \mathbf{F}_S^* = -{}^S \mathbf{R}_W {}^W \mathbf{f}_S^* \quad (37)$$

と求められる。 $\Sigma_S$  の  $x$ ,  $y$  方向に作用する力を  $F_{S,x}$ ,  $F_{S,y}$  で表している。 $\Sigma_S$  の原点を中心とする円は、最大静止摩擦力を半径とする円である。このグラフから慣性力は移動ロボットの走行開始時に  $x$  軸負方向に作用し、移動ロボットの運動に従い推移していく。さらに、制限を加えた場合 (破線) の慣性力は最大静止摩擦力を示す円内に収まっている。しかし、制限を加えない場合 (2 点鎖線) の静止摩擦力は点  $A_{Stip}$  を境に最大静止摩擦力の円外に出ていることから、積載物は滑り移動を発生している。加速度制限がない場合の滑り始めてしまった積載物が  $t = 4.73$  [s] 以後に滑り移動する軌跡を Fig. 6 (q) に示す。Fig. 5 と Fig. 6 (e) より、滑り始める場所は、右カーブの旋回中であることが分かる。Fig. 6 (q) の積載物の滑り運動軌跡を見ると、搬

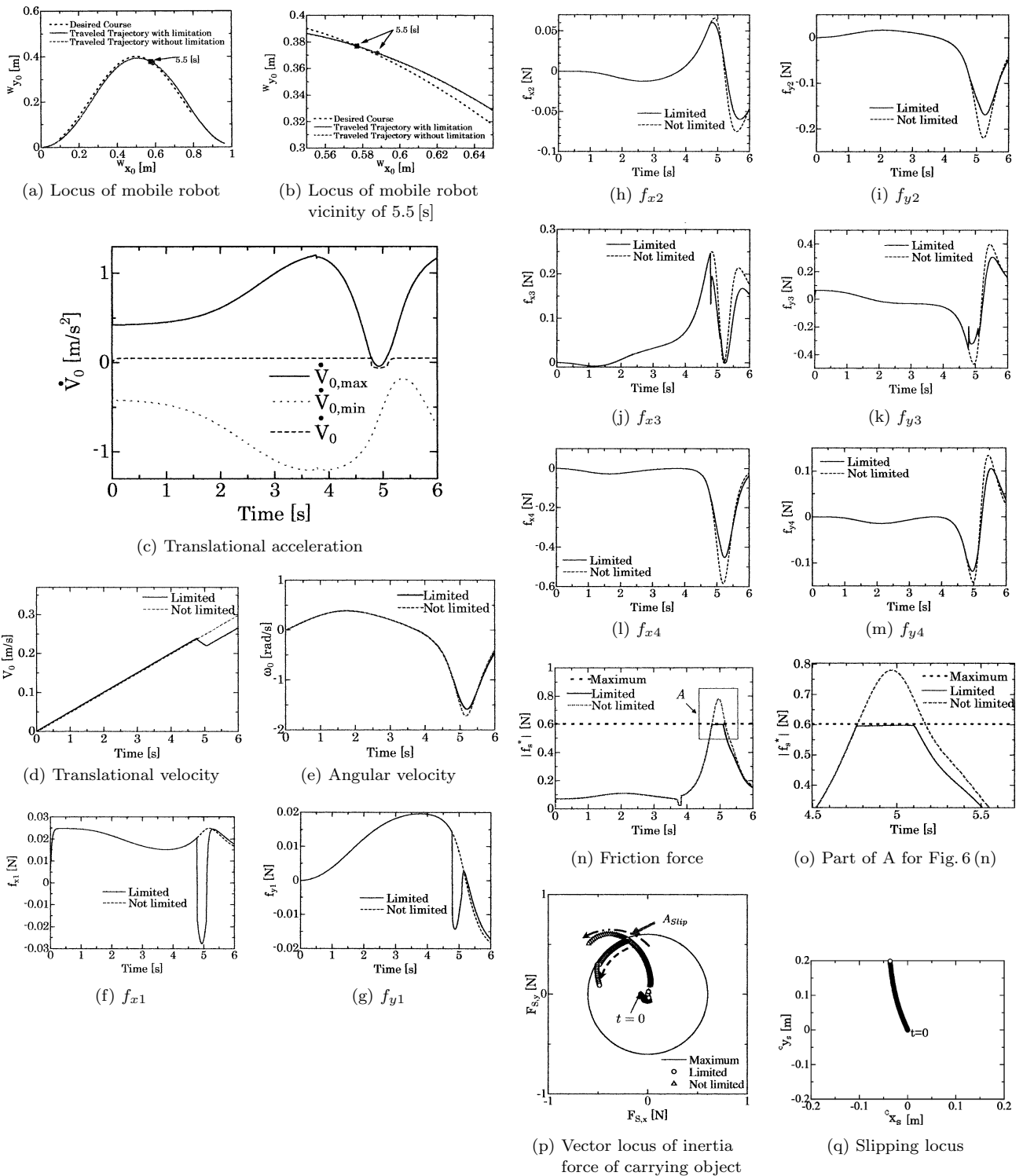


Fig. 6 Traveling the sinusoidal course

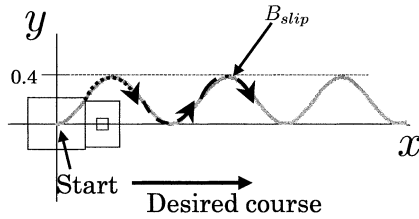
送台上で、搬送台に固定したカメラ座標系の  $y$  軸方向つまり進行方向左側に滑っていることが分かり、主に遠心力によりカーブ外側に滑り運動している。これは Fig. 6(f)~(m) で示した各項ごとの力の大きさを見ても Fig. 6(l) の遠心力に関する項が一番大きいことより明らかである。

以上の結果より、並進運動と回転運動を組み合わせた移動口

ボットの走行において加速度制限を加えることにより積載物の滑り移動を防ぎながら誘導できることを示した。

### 5.3 静止摩擦係数の影響

加速度の制限値は式 (25) で表されるように最大静止摩擦力の摩擦係数  $\mu$  や質量  $m_s$  によって範囲が決定される。そこで、本節では出力可能な加速度の範囲が変化しても提案する制限方

Fig. 7 Simulation image changing  $\mu$ 

法が適切に効果を発揮することをシミュレーション結果より示す。まず5.2節の条件の中で摩擦係数を  $\mu = 0.4$  とし、その他の条件は5.2節と同様にする。

Fig. 7 にこのシミュレーションの様子を示す。また、積載物が滑り始めた時刻  $t = 8.65$  [s] を図中に  $B_{Slip}$  として示している。

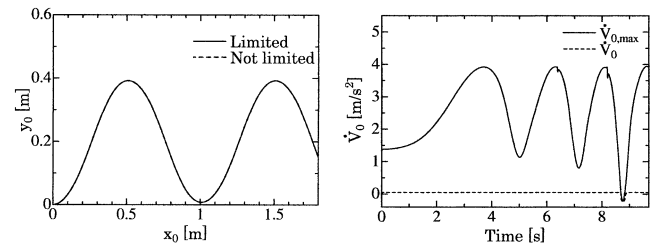
Fig. 8 (a) に目標軌道と加速度制限を行った場合 (Limited) の軌跡, 加速度制限を行わなかった場合 (Not limited) の軌跡を示す。Fig. 6 (a) と同様に加速度制限の有無にかかわらず目標軌道上を走行している。これは誘導方法が有効に働いており積載物の滑りによる影響が微小なためである。

移動ロボットの加速度  $\dot{V}_0$  と制限加速度  $\dot{V}_{0,max}$  の推移を Fig. 8 (b) に示す。摩擦係数が大きくなったことにより, 加速度制限が働く時間が遅くなり  $t = 8.65$  [s] から 8.8 [s] までの間に働いていることが分かる。

また, 積載物の滑りを防ぐため加速度制限を行うことにより, Fig. 8 (c), (d) に示した  $V_0(t)$ ,  $\omega_0(t)$  を減少させる。ここで, 加速度の制限値が5.2節での値に比べ大きな値を示しているが, これは静止摩擦係数  $\mu$  を大きくすることによって積載物を滑らさない範囲が広がったことによる。しかし, 積載物の滑りを防ぐために制限値が負の値まで減少し, 出力加速度を制限している。つまり, 5.2節とは異なる条件下においても移動ロボットの運動に従い加速度が効果的に制限されていることが分かる。

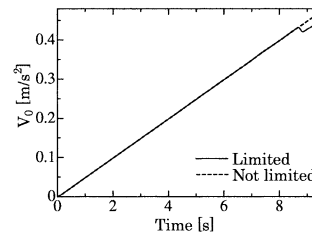
Fig. 8 (e) に積載物に作用する静止摩擦力を示す。Fig. 6 (n) に比べ制限が加わる時刻が遅いのは静止摩擦係数が大きいため最大静止摩擦力へ到達するまで時間が掛かるためである。さらに, 滑りが起きた時刻の静止摩擦力を拡大したものを Fig. 8 (f) に示す。これらのグラフから, 制限を加えた場合の静止摩擦力は最大静止摩擦力以下に抑えられていることが分かる。一方, 制限を加えない場合には積載物の静止摩擦力は最大静止摩擦力を超え, 滑り移動を始める。

Fig. 6 (p) と同様にカメラ座標系からみた積載物の座標系  $\Sigma_S$  によって表した積載物に作用する慣性力の推移をベクトル軌跡として表したものを Fig. 8 (g) に示す。ここで, 図中の点線, 破線, 1点鎖線は Fig. 7 の図中における矢印と対応している。 $t = 0$  時に  $x$  軸負方向に作用している慣性力は初めの曲線軌道を走行する移動ロボットの運動に従って点線の方向に時間推移し, 二つ目の山である時計回りの曲線軌道では破線に従って推移する。ここで, 三つ目の山である時計回りの曲線軌道では, 制限を加えた場合 (1点鎖線) の静止摩擦力は最大静止摩擦力を半径とする円内に収まっている。しかし, 制限を加えない場合 (2点鎖線) の慣性力は点  $B_{Slip}$  を境に最大静止摩擦力の円外に位置していることから, 積載物は滑り移動を発生している。積載物が

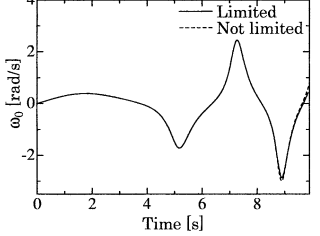


(a) Locus of mobile robot

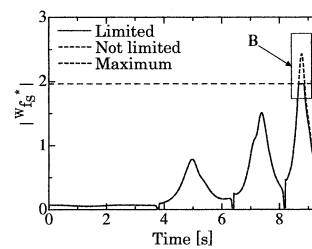
(b) Translation acceleration



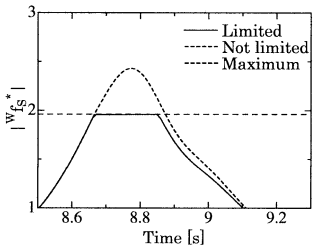
(c) Translational velocity



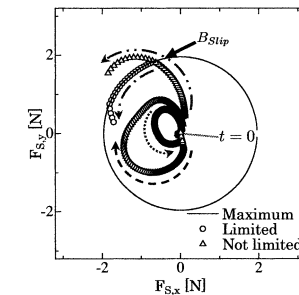
(d) Angular velocity



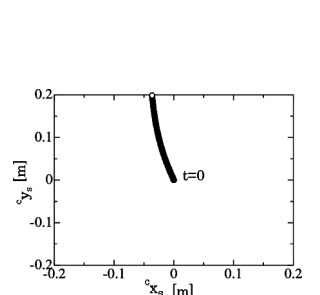
(e) Friction force



(f) Part of B for Fig. 8 (e)



(g) Vector locus of inertia force of carrying object



(h) Slipping locus

Fig. 8 Traveling the sinusoidal course (Changing  $\mu$ )

滑り始めてしまった後の, 積載物の滑り移動の軌跡を Fig. 8 (h) に示す。また, 前節と同じく, 移動ロボットは右カーブを走行中に積載物を滑らせてしまうことから, Fig. 7 の  $B_{Slip}$  点 (移動ロボットが右旋回中) に積載物の滑りが発生しており, Fig. 8 (h) の移動ロボットに固定したカメラ座標系における  $x$  軸負方向,  $y$  軸正方向に滑り出すのは結果として妥当である。

以上の結果から, 5.2節よりも  $\mu$  を大きく取ることによって最大静止摩擦力の値が増加し, 加速度制限値の範囲が広がるが, 5.2節の結果と同様に加速度制限することにより積載物を滑らせずに走行できることが確認できた。

#### 5.4 走行軌道による影響

次に走行軌道の変化における本手法の効果を考察する。目標



軌道を  $y_d(t) = 0.3\{1 - \cos(2\pi x_d(t))\}$  とし、リンク 0 の初期位置は  $({}^W x_0(0), {}^W y_0(0)) = (0, 0)$ 、姿勢は  ${}^W \theta_0(0) = 0$  とする。目標速度は  $\dot{V}_{0d}(t) = \dot{V}_{0d}t$  [m/s] とし、 $\dot{V}_{0d} = 0.025$  [m/s<sup>2</sup>] である。本節でのシミュレーション条件からでも、前節と同様に加速度制限が効果的に働くことが確認されている。ここでは、加速度制限の効果により積載物に作用する静止摩擦力と慣性力が抑えられていることを示す。移動ロボットの初期位置と目標コースを Fig. 9 に示す。また、積載物の滑り始めた位置を  $C_{slip}$  点として表しており  $t = 7.75$  [s] である。

Fig. 10 (a) に積載物に作用する静止摩擦力を示す。加速度制限を用いて積載物の滑りを抑えている時間の静止摩擦力を拡大したものを Fig. 10 (b) に示す。これらのグラフより、加速度制限を加えることによって、静止摩擦力は最大静止摩擦力以下に抑えられていることが分かる。

Fig. 6 (p), Fig. 8 (g) と同様に積載物に作用する慣性力をベクトル軌跡として表示したものを Fig. 10 (c) に示す。制限を加えた場合の慣性力は最大静止摩擦力を半径とする円内に収まる。つまり、加速度制限によって滑りを起こさせない走行ができています。しかし、制限を加えない場合の静止摩擦力は点  $C_{Slip}$  から円外に位置していることから、積載物は滑り移動が発生している。さらに、制限を加えない場合の積載物が  $t = 7.75$  [s] 以後滑り移動する積載物の軌跡を Fig. 10 (d) に示す。

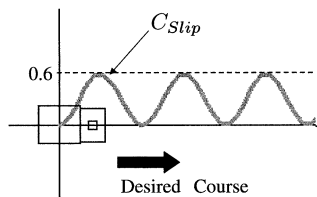


Fig. 9 Simulation image changing amplitude

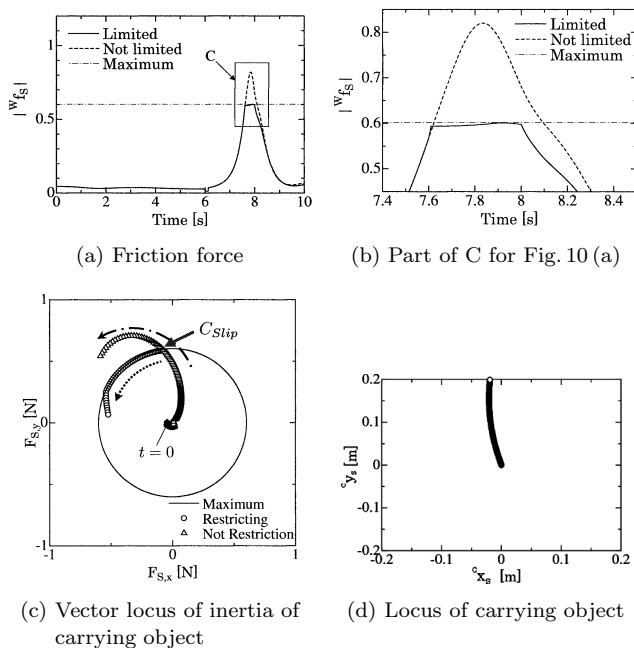


Fig. 10 Traveling this sinusoidal course ( $y_d(t) = 0.3(1 - \cos 2\pi x_d(t))$ )

以上の結果より、加速度と軌道を変化させたにもかかわらず、加速度制限は働きの最大静止摩擦力以下の走行が可能となっている。

## 6. 結 言

本報告は目標軌道をできるだけ早く走行する PWS 型移動ロボットの加速度制限付き最速誘導方法を提案した。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曲線コースの走行シミュレーションによって確認した。

また、静止摩擦係数を大きくした場合、加速度や目標曲線コースの振幅を変えた場合についてもシミュレーションを行い、条件が変わっても提案した誘導制御法により積載物を滑らせずに走行できることを示した。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 梶谷誠, 美馬一博, 金森哉史, 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.
- [4] 美馬一博, 長谷川敬晃, 中坊貴亨, 金森哉史, 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 亀島敏二, 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.343–350, 1987.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Y. Yazaki, T. Ikeda, M. Minami and Y. Mae: “Guidance Control of Mobile Robot Preventing Slipping of Carrying Objects,” Proc. The 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.1779–1784, 2005.
- [13] J.Y.S. Luh, M. Walker and R.P. Paul: “On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators,” Trans. ASME, J. DAMC, vol.102, pp.69–76, 1980.
- [14] R. Fierro and F.L. Lewis: “Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics,” J. of Robotic Systems, vol.14, no.3, pp.149–163, 1997.



矢崎靖啓 (Yasuhiro Yazaki)

1981年4月28日生。2004年福井大学工学部知能システム工学科卒業。2006年福井大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社ビック東海入社。在学中は移動ロボットの走行制御に関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



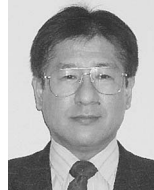
竹内元哉 (Motoya Takeuchi)

1980年1月1日生。2002年福井大学工学部機械工学科卒業。2004年福井大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社東海理化入社。在学中は移動ロボットのダイナミクスに関する研究に従事。



池田 毅 (Takeshi Ikeda)

1977年8月1日生。2000年福井大学工学部機械工学科卒業。2006年福井大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2006年九州大学大学院工学研究院助手。現在に至る。移動マニピュレータの運動制御、力制御等の研究に従事。日本機械学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



見浪 護 (Mamoru Minami)

1956年4月25日生。1981年大阪府立大学航空工学科修士課程修了。1993年金沢大学大学院自然科学研究科修了。博士(工学)。1994年福井大学工学部機械工学科助教授、2002年同知能システム工学科教授。現在に至る。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、力制御等の研究に従事。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)