

積載物を滑らすことのない最速誘導制御方法と実験による評価

Fastest Guidance Control Avoiding Slipping of Carrying Objects and Experimental Evaluation

福井大学 ○ 向野 政紀, 見浪 護

○ Masanori MUKONO and Mamoru MINAMI University of Fukui

Abstract: 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. 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 contradicted requirements, this paper purposes a controller to guide the mobile robot along a given course as fast as possible with acceleration restriction to avoid slipping of carrying objects during traveling.

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。

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 [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。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 [4] 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應した軌道制御方法を提案した研究 [5][6] 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 [7]-[10] 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、過去の研究には著者の知る限り同じ目的の研究は見当たらない。著者らはすでに、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 [11]、これに基づいた最速誘導制御を提案した [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、提案した手法は動力

学モデルを用いた計算による加速度制限方法を提案した。この方法は加速度センサが不用な利点を持つ。

しかし上記の研究の検証 [12] 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 移動ロボットの誘導制御

2.1 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。

2.2 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 $V_{od}(t)$ 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 $V_{od}^+(t)$ と表すことにする。時刻 t で、 $V_{od}^+(t)$ が指示された時に予定される加速度 $\dot{V}_{od}^+(t)$ は、近似的に

$$\dot{V}_{od}^+(t) \doteq \frac{V_{od}^+(t) - V_0^-(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

と表される。式 (1) で得た予定の加速度 $\dot{V}_{od}^+(t)$ 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 $\dot{V}_{od}^+(t)$ 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。

$$\dot{V}_{0d}^+(t) = \begin{cases} \dot{V}_{0,max} - \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) > \dot{V}_{0,max} - \varepsilon) \\ \dot{V}_{0d}^+(t) & (\dot{V}_{0,min} + \varepsilon \leq \dot{V}_{0d}^+(t) \leq \dot{V}_{0,max} - \varepsilon) \\ \dot{V}_{0,min} + \varepsilon & (\dot{V}_{0d}^+(t) < \dot{V}_{0,min} + \varepsilon) \end{cases} \quad (2)$$

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 $\dot{V}_{0d}^+(t)$ 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.

$$\tilde{V}_{0d}^+(t) = \dot{V}_{0d}^+(t)\Delta t + V_0^-(t) \quad (3)$$

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.

$$\tilde{V}_{ref,i}^+(t) = \frac{1}{r_c} (r_c \pm \frac{T}{2}) \tilde{V}_{0d}^+(t), (i=R,L) \quad (4)$$

3 シミュレーションおよび実験

3.1 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.1 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験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 (2) 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 $0.1 [m/s^2]$ 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 $\dot{V}_{0d} = -0.04 [m/s^2]$ 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 $\mu = 0.1235$, 誘導パラメータ $L = 0.1 [m]$ とする.

まず, Fig.2 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.6 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関わらず, 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わかる.

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.3 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 $\dot{V}_{0d}^+(t)$, Fig.4 に誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ と並進速度 $V_0(t)$, Fig.5 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.4 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わかる. 次に Fig.3 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.1 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.3 において, $t = 7.74$ 秒の地点で $\dot{V}_{0d}^+(t)$ 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. Fig5 から積載物が

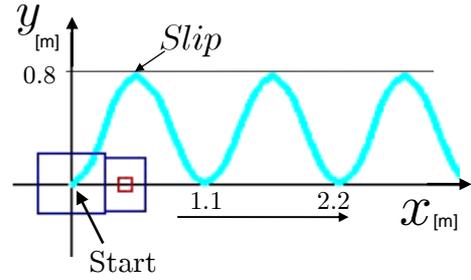


Fig. 1: Desired course

滑り出す時間が $t = 7.7$ 秒から $t = 7.8$ 秒の間で, Fig.3 のデータとほぼ一致していることがわかる. また Fig5 では積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.7 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 $\dot{V}_{0d}^+(t)$, Fig.8 に Fig.7 の A の部分, Fig.9 に Fig.7 の B の部分の拡大図を, Fig.10 に誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ と並進速度 $V_0(t)$, Fig.11 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.7 より, $\dot{V}_{0,max}$ の減少と共に $\dot{V}_{0d}^+(t)$ も $\dot{V}_{0d}^+(t)$ 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, $\dot{V}_{0,max}$ 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 が変数として働くためである. つまり, 許容範囲である $\dot{V}_{0,max}$ 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 $\dot{V}_{0,max}$ を計算し, 境界とするためである.

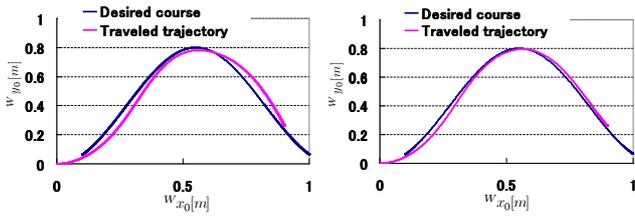
また Fig.10 より, 加速度制限が働いている時には $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ が負の値になるため, その間は $V_0(t)$ が減少していることが確認できる. また Fig.8 と Fig.9 を比較すると, 実験結果とも2つ目のカーブを曲がる際の Fig.9 の方が $\dot{V}_{0,max}$ の減少の幅が大きい. これは Fig.10 から分かるように加速度制限が働く前の速度が1つ目のカーブの時よりも速いため, より減速を必要とするためである. 加速度制限を行わなかった場合と違い, 加速度制限を行った場合には, $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ が $\dot{V}_{0,max}$ を超えないため, 積載物は滑らない. Fig.11 から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.

3.2 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.12 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. 誘導のパラメータである L は $L = 0.07 + 2.26V_0^2$ と速度に依存した値に設定した. 目標軌道を2周する $t = 82$ 秒以降, 停止のための加速度に切り替わる. その他の条件は3.1節と同様とする.

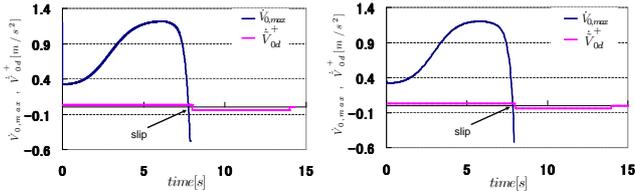
実験結果を Fig.13-Fig.16 に示す. Fig.13 は目標軌道と走行軌跡, Fig.14 は最大加速度 $\dot{V}_{0,max}$ と加速度指令値 $\dot{V}_{0d}^+(t)$, Fig.15 は誘導制御出力速度 $\tilde{V}_{0d}^+(t)$ と並進速度 $V_0(t)$, Fig.16 は走行中の積載物の様子を表している. Fig.13 より移動ロボットは目標軌道を追従し, 周回できていることが確認できる. Fig.14 より $\dot{V}_{0d}^+(t)$ が $\dot{V}_{0,max}$ の減



(a)Simulation

(b)Experiment

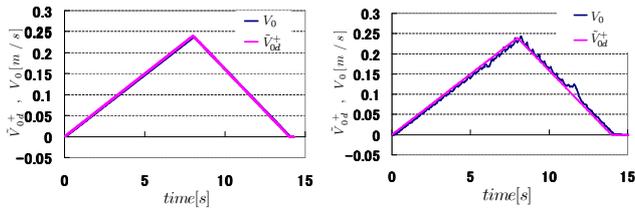
Fig. 2: Trajectories of mobile robot (Not limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

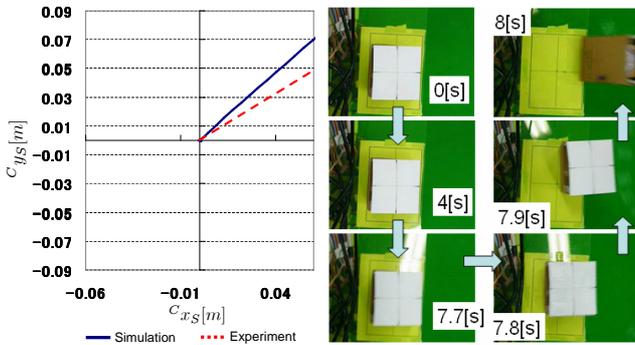
Fig. 3: Acceleration profiles (Not limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

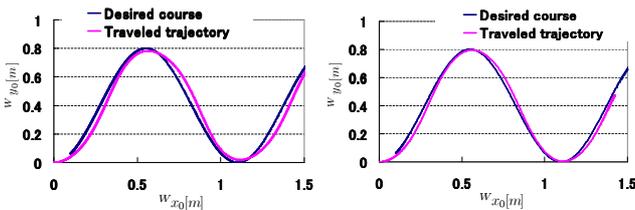
Fig. 4: Velocity profiles (Not limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

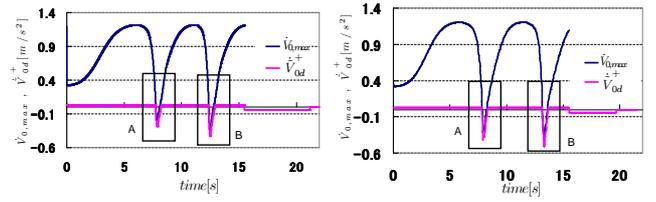
Fig. 5: Slipping locus (Not limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

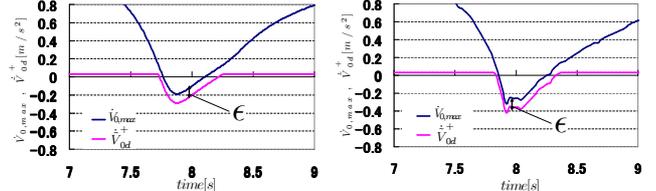
Fig. 6: Trajectories of mobile robot (Limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

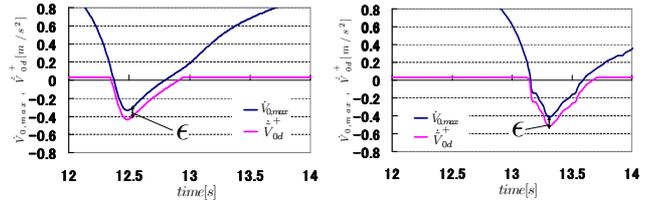
Fig. 7: Acceleration profiles (Limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

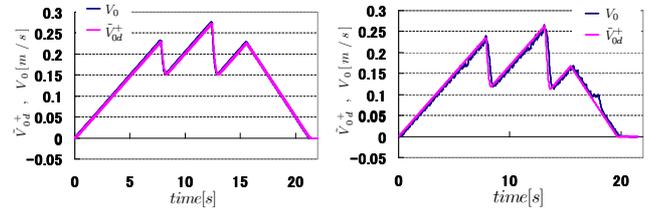
Fig. 8: Expansions of A in Fig.7



(a)Simulation

(b)Experiment

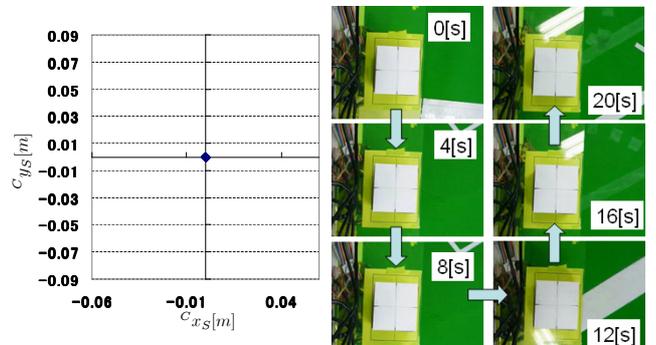
Fig. 9: Expansions of B in Fig.7



(a)Simulation

(b)Experiment

Fig. 10: Velocity profiles(Limited)



(a)Simulation

(b)Experiment

Fig. 11: Slipping locus (Limited)

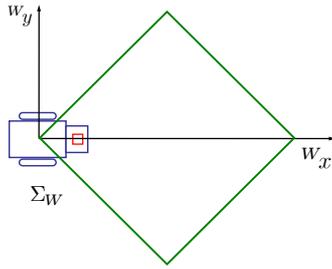


Fig. 12: Desired course

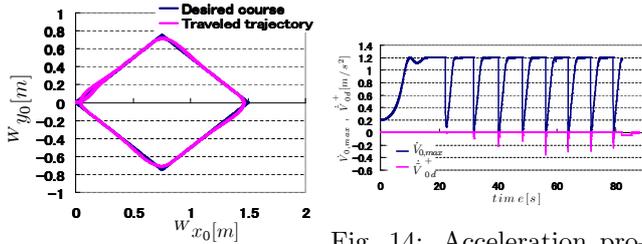


Fig. 14: Acceleration profile (Round)

Fig. 13: Trajectory of mobile robot (Round)

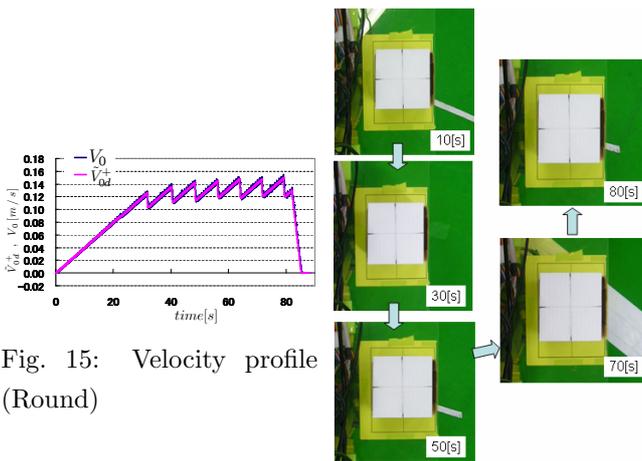


Fig. 15: Velocity profile (Round)

Fig. 16: Slipping locus (Round)

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．加速度制限が働いている際， $\dot{V}_{0d}^+(t)$ 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.15 よりわかる．また，正の目標加速度を与えているにも関わらず，加速度制限が働いたため速度は一定のところまで収束をみせる．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．

加速度制限が有効に働いた結果，Fig.16 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．

4 結言

本報告で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き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．また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，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, (1998),317-320.
- [2] 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, (1999), 1P1-01-004 .
- [3] 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, (1999),983-992.
- [4] 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, (1999),D114.
- [5] 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
- [6] Wenjie Dong and Yi Guo, "Dynamic Tracking Control of Uncertain Nonholonomic Mobile Robots," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1714-1719, 2005
- [7] 亀島鉦二, 小川真理子, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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)