人間操作型移動ロボットの物体搬送制御*

橋本 竜弘^{*1}, 内山 直樹^{*2}
佐野 滋則^{*2}, 高木 章二^{*2}

Object Transportation Control for a Human-Operated Mobile Robot

Tatsuhiro HASHIMOTO, Naoki UCHIYAMA^{*3},
Shigenori SANO and Shoji TAKAGI^{*3} Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

Because of the difficulty in realizing fully automated robotic systems from the viewpoint of cost efficiency and current available technologies, human-robot cooperative system has been widely studied to date. In this study, we consider a general type two-wheeled human-operated mobile robot that may support object transportation tasks in houseworks and factories. Inexpensive infrared distance sensors are installed on the robot to detect obstacles. A controller design that provides two fundamental functions is developed; obstacle avoidance and stable transportation of object, even when the human operator makes mistakes in operation. To consider the nonholonomic constraint and incorporate the human operator's command, we propose a model reference control approach in which the robot follows a desired trajectory generated by a reference model. The reference model has steering and brake-like functions that are adjusted according to the distance sensor information. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments in which several unskilled operators operate the robot in a corridor-like space.

Key Words: Mobile Robot, Obstacle Avoidance, Motion Control, Mechatronics

1. 緒 言

ロボットに要求される基本的な作業のひとつに物体を搬送することがあげられる。近年、人間と協調的に作業を行うロボットに関する研究が広く行われているが⁽¹⁾, 物体搬送を行わせる場合には、人間の操作ミスが生じて、安全に搬送できる機能が必要である。本研究では、構造が単純で汎用性がある人間操作型の二輪独立駆動型移動ロボットを対象とし、人間の操作ミスが生じた場合にも、以下の項目を達成できる制御法の実現を目的とする。

(a1) ロボットと他の物体との衝突回避

(a2) 搬送物の転倒回避

著者らは文献(3)において、(a1)を達成するための方法を提案した。本稿ではこの方法を(a2)を達成するために拡張し、実験により有効性を検証した結果について述べる。移動ロボットのリアルタイム障害物回避法として有名なものに文献(4)などが存在するが、(a2)の目的を含めた方法は著者らの知る限り存在しない。

Fig. 1 Mobile robot system

2. 制 御 系 設 計

本研究では図1に示すような人間操作型移動ロボットを対象としている。操作者はジョイスティックを用いて移動ロボットの左右車輪の駆動力を制御できる。移動ロボットには、進行方向に関して対称に複数の距離センサが取り付けられており、障害物までの距離を測定できる。また、移動ロボットには搬送物が搭載されている。

移動ロボットの動特性はつぎのように表される。

$$\begin{cases} I\ddot{\phi} = (u_r - u_l)L \\ M\dot{v} = (u_r + u_l) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 I , M はそれぞれ慣性モーメント, 質量であ

* 原稿受付 2008年10月31日。

^{*1} 学生員, 豊橋技術科学大学機械システム工学系(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 正員, 豊橋技術科学大学機械システム工学系。

E-mail: uchiyama@mech.tut.ac.jp

Fig. 2 Block diagram of control system

Fig. 3 Model for calculating acceleration limit

り, ϕ , v はそれぞれロボットの姿勢, 進行速度, L は車体中心から車輪までの距離である. 記号 u_l , u_r はそれぞれ左右車輪が発生する駆動力であり, ジョイスティックの傾斜角に比例する.

式 (1) に対してつぎのモデル参照型の制御法を提案する.

$$I\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} = (u_r - u_l)L + \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{d_{li}}} \quad (2)$$

$$M(t)\dot{v} + C_v v = u_r + u_l - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt{d_{li}}} \quad (3)$$

ここで, C_ϕ , C_v は回転, 並進方向に対する粘性抵抗係数, α_i , β_i はそれぞれステアリングやブレーキのような効果を与えるための係数, d_{li} , d_{ri} は距離センサと障害物との距離である. ここで, 添え字 l , r はそれぞれロボットの進行方向に関して左側, 右側に配置されていることを示す. また距離センサの数を $2m$ としている. 距離の n 乗根に反比例する項を含んでいる理由は, n を変化させることによって, 障害物との距離に対するロボットの反応の度合を変化させるためである. 参照モデルを数値積分し, 計算機内で逐次目標値を生成することによりロボットは障害物回避を行う. 図 2 にこの制御法のブロック線図を示す. 両車輪には駆動モータとロータリエンコーダが取り付けられ, 速度フィードバック制御が行われている. 式 (2), (3) の $\dot{\phi}$, v と両車輪の角速度 $\dot{\theta}_l$, $\dot{\theta}_r$ にはつぎの関係があり, この式を用いて両車輪の目標角速度を逐次生成している.

$$R_w\dot{\theta}_l = v - L\dot{\phi}, \quad R_w\dot{\theta}_r = v + L\dot{\phi} \quad (4)$$

ここで R_w は両車輪の半径である.

式 (3) の質量係数は実際のロボットの質量と一致する必要はないため, 任意に変更できる. 本研究では

Fig. 4 Experimental results (Robot trajectories)

Fig. 5 Experimental results (without acc. adjust.)

Fig. 6 Experimental results (with acc. adjust.)

$M(t)$ を利用してロボットの加速度を調整し, 搬送物の転倒を回避する方法を提案する. すなわち, 式 (3) で求めたロボットの目標加速度が搬送物の転倒が生じないための限界加速度を超えた時に, 質量係数を増加させることで目標加速度を低減し搬送物の転倒を防ぐ. この限界加速度を図 3 に示すモデルをもとに計算する. 図 3 では接触面の左端を中心に回転運動が生じ, 転倒することを仮定している. 図 3 において, M_o は搬送物質量, l は搬送物回転軸から重心までの距離, ψ は搬送物搭載面から重心までの角度, g は重力加速度である. 図 3 より転倒が生じないための以下の条件を得る.

Table 1 Parameter values of experimental system

M	4.4 [kg]	I	0.064 [kgm ²]
C_v	1.0 [Nm/s]	C_ϕ	3.0 [Nm/(rad/s)]
L	0.17 [m]	R_w	0.027 [m]
α_i	60.0 [Nm ^{$\frac{5}{4}$}]	β_i	60.0 [Nm ^{$\frac{1}{4}$}]
n	4	m	2

$$M_0|\dot{v}|l \sin \psi \leq M_0gl \cos \psi \quad (5)$$

上式より転倒が生じない限界加速度 $\dot{v}_{max}$ をつぎのように定める.

$$\dot{v}_{max} = g \cot \psi \quad (6)$$

このようにして求めた限界加速度より目標加速度が大きいとき, 式 (3) の $M(t)$ をつぎのように変更する.

$$M(t) = |-C_v v + u_r + u_l - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt[5]{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt[5]{d_{li}}}| / \dot{v}_{max} \quad (7)$$

以上の制御を行った際の安定性については, 式 (2), (3) の線形化モデルに基づき文献 (2) と同様の方法により確認している.

3. 実 験

提案法の有効性を確認するために図4のような通路(幅 50cm)の通過実験を行った. 表1に実験でのパラメータ値を示す. 障害物回避のためのパラメータ α_i , β_i , n は, 文献 (2) に記載した方法により実験的に求めた. なお, すべての α_i , β_i に同じ値を用いた. 実験ではロボットに底面が円形の搬送物 ($\psi = 75^\circ$) を積載した状態で, 人間が操作して通路を通過させ, 障害物との衝突, 搬送物の転倒の有無, ロボットの加速度などを調べた. 距離センサの計測範囲の上限は 70[cm] であり, 障害物との距離がこの値を超えた場合には式 (2), (3) の計算にこの上限値を用いた.

まず, 障害物回避機能のみを付加して実験を行った. 図4(a)にロボットの移動軌跡, 図5に (a) ロボットの駆動力 (操作者の入力に比例), (b) ロボットの姿勢, (c) 速度, (d) 加速度を示す. 図5(a)のように, 操作者の入力ほぼ一定であるにもかかわらず, 図5(b)のようにロボットの姿勢が調整され, 図4(a)のように障害物を回避できていることが確認できる. また, ロボットの加速度の大きさは発進・停止時に特に大きくなっていることがわかる. なお, このことにより発進時において搬送物の転倒が発生した.

つぎに, 障害物回避に加えて加速度調整機能を付加し実験を行った. 図4(b)に移動軌跡, 図6に加速度等の結果をそれぞれ示す. 図4(b)より加速度調整を

Table 2 Occurrence of tumbles

Operator No.	Manual control	Obst. avoid.	Obst. avoid. & acc. adjust.
1	○	×	○
2	○	×	○
3	○	×	○
4	×	×	○
5	○	×	○

○:Not occur ×:Occur

Fig. 7 Required time to pass through the course

行っても障害物回避が適切に行われていることが分かる. 目標加速度が予め設定された加速度を超えた時, 式 (3) の質量係数が増加され, 図6(d)のように加速度が低減されている. このことにより搬送物の転倒を防ぐことができた.

さらに, 操縦に不慣れな操作者5名による比較実験を行った. 表2に搬送物の転倒の有無を, 図7に通過時間をそれぞれ示す. なお, マニュアル制御時には, 操作者に対して搬送物の転倒をできるだけ起こさないよう指示を与えて実験を行った. そのため転倒の発生は少ないが, 操作者により通過時間が大きく異なることを確認できる. 障害物回避機能のみを付加した場合には, すべての操作者において搬送物の転倒が発生しているが, 通過時間は1名を除いて減少している. さらに加速度調整機能を付加することで搬送物の転倒が抑制でき, かつ通過時間に大きな違いがないことから, 提案法は有効であると考えられる.

4. 結 言

本稿では物体搬送を行う人間操作型移動ロボットの制御法を提案した. また, 実験により, 障害物および搬送物の転倒を回避できることを確認した.

文 献

- (1) Peshkin, M. A., Colgate, J. E., Wannasuphprasit, W., Moore, C., Gillespie, B., Akella, P., *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4 (2001), pp. 377-390.
- (2) Uchiyama, N., Hashimoto, T., Sano, S., Takagi, S., *Proc. IEEE 10th Int. Workshop on Advanced Motion Control*, No. 2(2008-3), pp. 468-473.
- (3) Fox, D., Burgard, W., Thrun, S., *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 4(1997), pp. 23-33.