

〈一般研究課題〉 人間生活環境における遠隔操作型ロボットの
操作性向上に関する研究
助成研究者 豊橋技術科学大学 内山 直樹



人間生活環境における遠隔操作型ロボットの 操作性向上に関する研究

内山 直樹
(豊橋技術科学大学)

Improvement of Operational Easiness of Teleoperated Robot in Human Living Environment

Naoki Uchiyama
(Toyohashi University of Technology)

Abstract

Because of the difficulty in realizing fully automated robotic systems from the viewpoints of cost efficiency and available current technologies, human-robot cooperative system has been widely studied to date. This paper deals with a human-operated mobile robot that supports the object-transportation task in houseworks and factories. A general type of two-wheeled mobile robot is considered, which can be remotely operated by a joy-stick controller. This paper presents a controller design that provides two fundamental functions; obstacle avoidance and stable transportation of object, even when the human operator makes mistakes in operation. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments where several unskilled operators operate the mobile robot for transporting an object in a corridor-like space.

1. 緒言

高齢化社会を迎え、これまで人間によって行われていた家庭内作業、福祉介護作業、工場内作業等においてロボットの活躍が期待されている。環境を認識し適確な判断を行う完全自動ロボットの開発は技術的ならびにコスト的に現状では困難であると考えられ、人間と協調的に作業を行うロボットに関する多くの研究が行われている^{[1][4]}。

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。人間生活環境において人間と協調的に物体搬送を行うロボットを想定した場合には、人間による操作ミスが生じても安全に物体を搬送できる機能が必要である。特にロボットを遠隔操作する場合には、人間が正確に状況判断することが困難な場合があり、人間の操作ミスを補償する制御技術が必要であると考える。

本研究では、人間によって操作される2輪独立駆動型移動ロボットを対象とし、人間による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方法の実現を目的とする。

(I) ロボットと他の物体との衝突回避

(II) 搬送物のすべりと転倒の回避

移動ロボットの障害物回避に関する多くの研究が行われており^{[5]-[10]}、未知環境に適用可能であり非ホロノミック拘束を考慮できる方法も存在するが、本研究ではこれらの研究と異なり、人間の操作命令を取り込む機構を有し、障害物回避のみならず(II)の目的を同時に達成する方法を提案する。

2. 制御対象

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する。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個の赤外線型距離センサが取り付けられており、障害物までの距離を計測できる。また、移動ロボットには搬送物が積載されている。

移動ロボットの動特性は以下のように表される。

$$I\ddot{\phi} = (u_r - u_l)L \quad (1)$$

$$M\dot{v} = u_r + u_l \quad (2)$$

ここで、 I 、 M はそれぞれ慣性モーメント、質量であり、 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。 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(比例定数 $1/k$)。 ϕ_i は両車輪中心を結んだ線から i 番目の距離センサまでの角度である。

3. 制御方法

式(1)の動特性を有する移動ロボットに対して、つぎの動特性モデルを利用したモデル参照型の制御法を提案する。

$$I\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} = (u_r - u_l)L + \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt[n]{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt[n]{d_{li}}} \quad (3)$$

$$M(t)\dot{v} + C_v v = u_r + u_l - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt[n]{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt[n]{d_{li}}} \quad (4)$$

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 i 番目の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左側, 右側を意味する。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割合を変化させるためである。

式 (3) と (4) の参照モデルを用いて, 計算機内で逐次目標値を生成することによりロボットの制御を行う。図 2 に

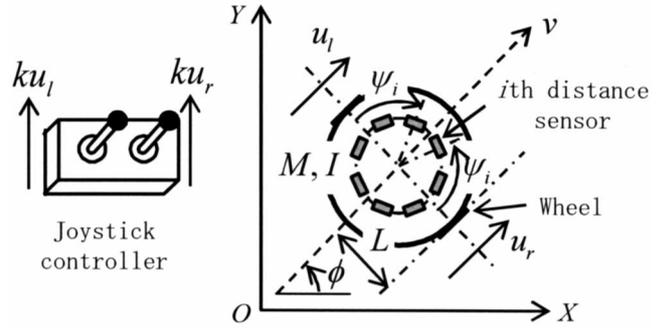


Fig.1 Mobile robot system

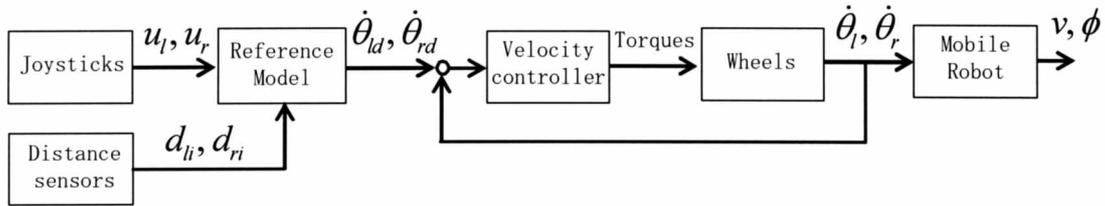


Fig.2 Block diagram of the proposed control system

この制御法のブロック線図を示す。参照モデルを用いて計算された車輪の目標角速度 $\dot{\theta}_{ld}, \dot{\theta}_{rd}$ に追従するように, 車輪角速度 $\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r$ が制御される。

式 (4) の質量係数 $M(t)$ 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, $M(t)$ を利用してロボットの加速度を調整し, 搬送物のすべりと転倒を回避する方法を提案する。すなわち, 式 (4) で求めたロボットの目標加速度が搬送物のすべり・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抑制し搬送物のすべり・転倒を防ぐ。本研究ではすべり・転倒が主に移動ロボットの並進加速度によって発生することを仮定し, 式 (4) の \dot{v} のみの調整を行う。

すべりが発生しないための条件は以下のように記述できる。

$$M_o |\dot{v}| \leq \mu M_o g \quad (5)$$

ただし, M_o は搬送物質量, μ は搬送物とロボットの接触面の最大静止摩擦係数, g は重力加速度である。この式より, すべりが生じない限界加速度 \dot{v}_s をつぎのように定める。

$$\dot{v}_s = \mu g \quad (6)$$

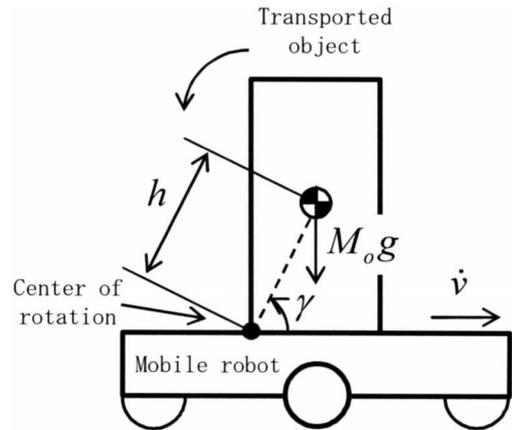


Fig.3 Acceleration limit estimation for tumble avoidance

つぎに搬送物が転倒しないための限界加速度を求める方法を図3のモデルにより説明する。図3において h は搬送物回転軸から重心までの距離， γ は搬送物搭載面から重心までの角度を意味する。ここで，転倒は接触面の一端を中心とする回転運動として発生することを仮定している。図3より転倒が生じないための条件をつぎのように記述できる。

$$M_o |\dot{v}| h \sin \gamma \leq M_o g h \cos \gamma \quad (7)$$

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

$$\dot{v}_i = g \cot \gamma \quad (8)$$

すべりと転倒が共に発生しない限界加速度 \dot{v}_{\max} をつぎのように選ぶ。

$$\dot{v}_{\max} = \min\{\dot{v}_s, \dot{v}_i\} \quad (9)$$

このようにして求めた限界加速度 \dot{v}_{\max} より式(4)を用いて得られた目標加速度が大きいとき，式(4)の $M(t)$ をつぎのように変更する。

$$M(t) = \left| -C_v v + u_r + u_l - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt{d_{ri}}} - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\sqrt{d_{li}}} \right| / \dot{v}_{\max} \quad (10)$$

以上の制御を行った場合の制御系の安定性については，式(3)，(4)の線形化モデルに基づき確認している。

4. 実験結果

提案法の有効性を確認するために図4(a)のような通路の通過実験を行った。実験装置および式(3)，(4)のモデルのパラメータを表1に示す。実験ではロボットに搬送物 ($\gamma=78.9[\text{deg}]$) を積載した状態で，5人の操作者が通路を通過させ，障害物との衝突，搬送物の転倒の有無，ロボットの加速度等を調べた。実験結果をまとめたものを表2に示す。制御を行わない場合には，ロボットの衝突や搬送物の転倒が一人を除いて発生している。本研究で提案した制御法を応用した場合には，全ての操作者に対して衝突および転倒が回避されており有効性が確認できる。

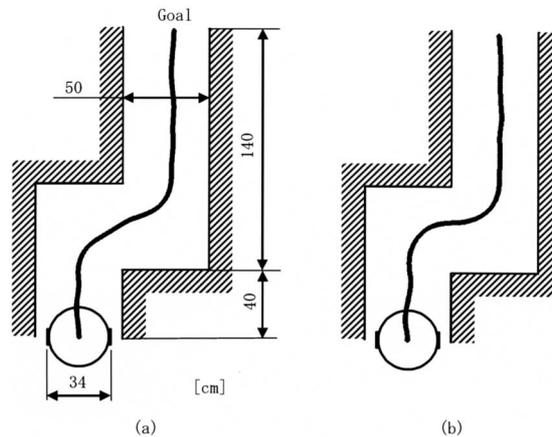


Fig.4 Experimental results (Robot trajectories)

Table 1 Parameter values of the experimental system

I	0.064 [kg · m ²]	C_ϕ	3 [Nm/(rad/s)]
M	4.4 [kg]	C_v	1 [Nm/s]
L	0.17 [m]	k	0.05 [deg/N]
Ψ_1	22.5 [deg]	α_i, β_i	60
Ψ_2	67.5 [deg]	n	4

Table 2 Summary of experimental results

Operator No.	w/o obstacle avoidance nor acceleration adjustment		w/ obstacle avoidance and acceleration adjustment	
	Collision	Tumble	Collision	Tumble
1	×	×	○	○
2	○	○	○	○
3	×	×	○	○
4	×	×	○	○
5	○	×	○	○

× : Occur ○ : Not occur

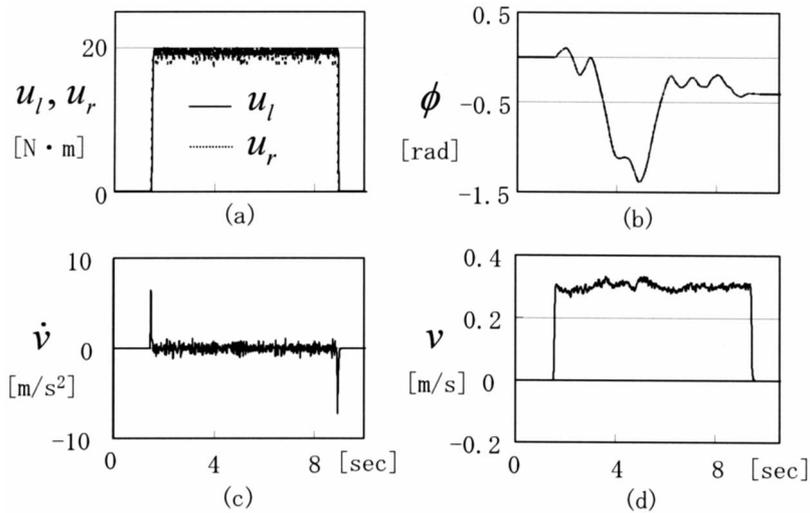


Fig.5 Experimental results (w/o acceleration adjustment)

図4(a)は障害物回避機能のみを付加した場合のある操作者によるロボットの移動軌跡である。この時のロボットの駆動力（操作者の入力に比例）、姿勢、加速度、速度を図5に示す。図5(a)のように、操作者の入力は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。

図4(b)は障害物回避機能に加えて搬送物のすべりと転倒を回避するための加速度調整機能を付加し、図4(a)の実験と同じ操作者がロボットを移動したときの軌跡である。ロボットの軌跡は図4(a)とほぼ等しく、加速度調整を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。図6にこの実験におけるロボットの加速度等の結果を示す。ロボットの目標加速度が予め設定された限界加速度を超えた時、式(4)の質量係数が増加され、図6(c)のように加速度が抑制されている。また、このことにより搬送物の転倒を防ぐことができた。

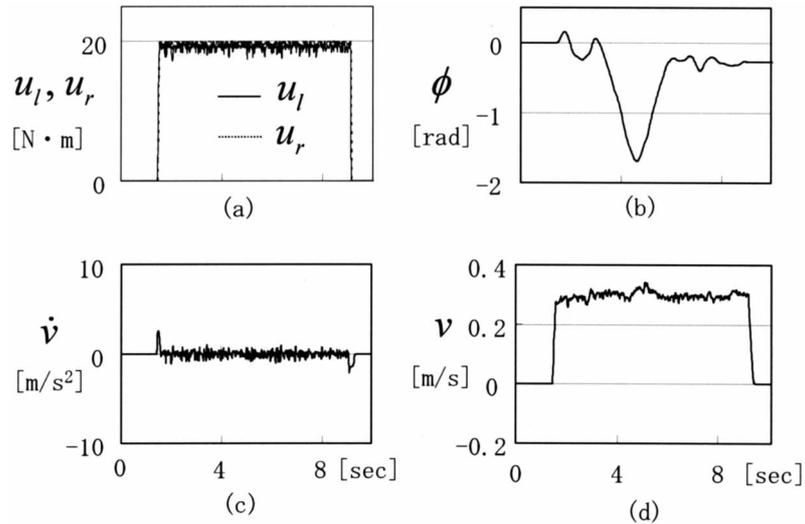


Fig.6 Experimental results (w/ acceleration adjustment)

5. 結言

本研究では物体搬送を行う人間操作型移動ロボットの制御方法について検討した。操作者による状況判断が困難な遠隔操作型ロボットにおいては、人間による操作ミスを補償する機能が必要であると考え、本研究では、操作ミスによるロボットの衝突および搬送物のすべり・転倒を回避するための制御方法を提案した。また、複数の操作者による実験により有効性を確認した。

謝辞

本研究は財団法人日比科学技術振興財団研究開発助成を受けて行われたことを付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- [1] H. Kazerooni, "Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 2, pp. 450-463, 1990.
- [2] H. Kazerooni and R. Steger, "The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton," ASME J. Dyn. Syst. Meas., Control, vol. 128, no. 1, pp. 14-25, 2006.
- [3] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphprasit, C. A. Moore, B. Gillespie and P. Akella "Cobot Architecture," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 17, no. 4, pp. 377-390, 2001.
- [4] A. Bettini, P. Marayong, S. Lang, A. M. Okamura and G. D. Hager, "Vison-Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 20, no. 6, pp. 953-966, 2001.
- [5] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [7] J. C. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991.

- [8] D. Fox, W. Burgard and S. Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 4, pp. 22-23, 1997.
- [9] A. Chakravarthy and D. Ghose, "Obstacle Avoidance in a Dynamic Environment: A Collision Cone Approach," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 28, no. 5, pp. 562-574, 1998.
- [10] F. Lamiraux, D. Bonnafous and O. Lefebvre, "Reactive Path Deformation for Nonholonomic Mobile Robots," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 20 no. 6 pp. 967-977, 2004