

自律移動ロボットの環境地図とセンサ情報に基づく 隠れ領域を考慮したリアルタイム速度制御 Real Time Speed Control for Autonomous Mobile Robots Considering Occluded Regions Based on Map and Sensor Data

○萬 礼応 (慶應義塾大学大学院)
森口 智規 (村田機械株式会社)
高橋 正樹 (慶應義塾大学)

* Ayanori YOROZU(Keio Univ.), Toshiki MORIGUCHI(Murata Machinery Co., Ltd.),
Masaki TAKAHASHI(Keio Univ.)

ayanoriyorozu@a5.keio.jp, toshiki.moriguchi@drw.muratec.co.jp, takahashi@sd.keio.ac.jp

Abstract—This paper describes a real time speed control method for autonomous mobile robots considering safety in the coexistence space of human and the robots. Recently various autonomous mobile robots are developed for practical use. In a real environment, there are occluded regions of sensor, such as corners and crossroads. In order to ensure the safety for humans and moving objects appear from these occluded regions, it is necessary to perform the real time speed control method. In addition, in the narrow environment, it is necessary to limit the speed for safety. In this paper, the novel real time speed control method considering occluded regions and movable area based on map and sensor data is presented. To verify the effectiveness of the proposed method, several numerical simulations are carried out.

1. 緒言

近年、案内や荷物の搬送など、人間の生活空間での稼働を目的とした自律移動ロボットの研究・開発が行われ、公共施設などへの導入例も報告されている[1]-[3]。著者らも、Fig. 1に示すような病院内搬送ロボット MKR-003(Muratec Keio Robot)を開発し、実環境での実験・検証を行っている。これらの自律移動ロボットが実環境で稼働する際に必要な要素技術としては、環境地図の作成、経路計画、自己位置推定、障害物回避などが挙げられる。特に、人間の生活空間で稼働する場合には、レーザレンジファインダ(LRF: Laser Range Finder)などの測域センサの情報に基づいてリアルタイムに安全な行動生成を行う必要がある。しかし、実環境には十字路や曲がり角などセンサの隠れ領域が生じる状況がある。そこで、Fig. 1(b)に示すように、隠れ領域から現れる人間や移動物体などに対して安全性を確保するために、ロボットの速度制御を行う必要がある。また、病院内での実機検証の際に、狭い通路など移動可能な領域が小さい環境で、広い環境と同様の速度で移動を行った場合に、ロボットに対して恐怖心を感じるというアンケート結果を得た。そこで、移動領域の大きさに応じて、移動速度を調整する必要がある。

このような速度制御に関しては、未知環境においてセンサで検出した障害物や未観測領域への移動時

にその距離に応じて移動速度の制御を行う手法が提案されている[4]。しかし、ロボットの隠れ領域に対する危険度は、距離だけではなく隠れ領域の大きさに依存する。そのため、距離に加えて隠れ領域の大きさ、つまり、ロボットと隠れ領域の位置関係を考慮した速度制御が必要である。また、事前に取得した環境地図を用いて、障害物の近傍に仮想的な領域を付加することで安全性の向上を図るオフラインでの経路計画が提案されている[5][6]。しかし、事前情報に基づく速度制御であるため、事前情報にない障害物など環境が変化した場合に対応できないといった問題がある。

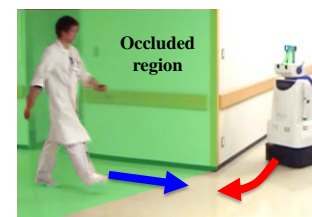
そこで本研究では、事前に取得した環境地図（占有格子地図）とセンサ情報に基づいて、以下の二点を考慮したリアルタイムな速度制御手法を提案する。

- ① 隠れ領域の大きさ
- ② 移動領域の幅

隠れ領域の大きさに応じて速度制御を行うことで、曲がり角などでは隠れ領域が大きくなる手前で減速を行い、曲がり角に差し掛かりセンサ視界が開けて隠れ領域が小さくなると加速を行うといった人間の動きに近い速度制御を行うことが可能になる。また、事前に取得した環境地図とセンサ情報を逐次比較することで、曲がり角などにおける隠れ領域に加え、事前情報にない障害物による隠れ領域にも対応することが可能になる。さらに、センサによって移動領域の幅を測定し、移動領域幅に応じて速度を制限することで、狭い通路などで安全かつ人間に恐怖心を与えない移動を実現する。



(a) MKR-003



(b) An example of situation that require speed control.

Fig. 1 MKR-003: a mobile robot for transport applications in hospital domain.

2. 隠れ領域の大きさに基づく速度制御

本章では、ロボットが十字路や曲がり角などセンサの隠れ領域が生じる環境へ進行する場合に、隠れ領域から現れる人間や移動物体に対して安全性を確保するためのリアルタイムな速度制御の設計法①について述べる。

ロボットは事前に作成した環境地図（占有格子地図）を所有し、LRFなどの測域センサを搭載していると仮定する。ここで占有格子地図とは、環境を小さな格子（グリッド）毎に分割し、グリッド毎に障害物の存在確率を保有するものである。この事前取得した環境地図と自己位置、現在のセンサに基づく周囲環境までの距離情報を比較する。そして、Fig. 2に示すようにリアルタイムな行動制御手法で決定した移動方向から $\pm\theta$ の範囲に存在する隠れ領域の大きさに応じて、ロボットの最大速度指令値 v_{max}^{ref} を以下のように決定する。

$$v_{max}^{ref} = v_{max} \times \frac{R_{recognize}(\theta)}{R_{map_free} \cap R_{sensor}(\theta)} \quad (1)$$

ここで、 R_{map_free} は占有格子地図上で障害物が存在しない、すなわちロボットが移動可能な領域、 $R_{sensor}(\theta)$ 、 $R_{recognize}(\theta)$ はそれぞれ進行方向から $\pm\theta$ の範囲のセンサ領域と実際にセンサで取得している領域である。また、 v_{max} はロボットの最大移動速度である。

このように、事前取得した環境地図とセンサ情報を比較することで、曲がり角などにおける隠れ領域に加え、事前情報にない障害物による隠れ領域にも対応することが可能になる。また、距離に基づいた速度制御ではなく、隠れ領域の大きさ、つまり、ロボットと隠れ領域の位置関係に応じて速度制御を行うことで、曲がり角などの手前で減速を行い、曲がり角に差し掛かり隠れ領域が小さくなると加速を行うといった人間の動きに近い速度制御を実現可能となる。

3. 移動領域幅に基づく速度制御

狭い通路など移動領域が狭い場合に、接近した物体に対して過敏な回避行動を行うと人間に対して恐怖感を与える場合がある。そこで、本章では通路幅や移動領域の大きさに応じた速度制御を行うための設計法②について述べる。

まず、センサ情報から移動領域の幅 w をFig. 3(a)に示すように、ロボットの進行方向に対して検出した障害物間の垂直方向の距離として求める。そして、 w に基づく関数 $f(w)$ からロボットの最大速度指令値を以下のように決定する。

$$v_{max}^{ref} = v_{max} \times f(w) \quad (2)$$

ここで、 $f(w)$ はFig. 3(b)に示すような以下のシグモイド関数として定義する。

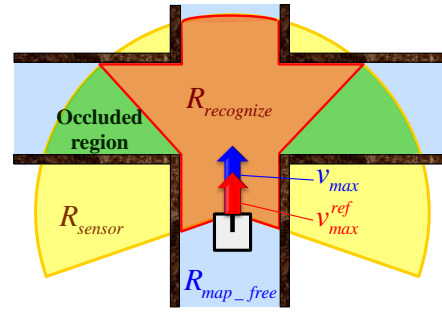


Fig. 2 An example situation of speed control considering occluded regions based on map and sensor.

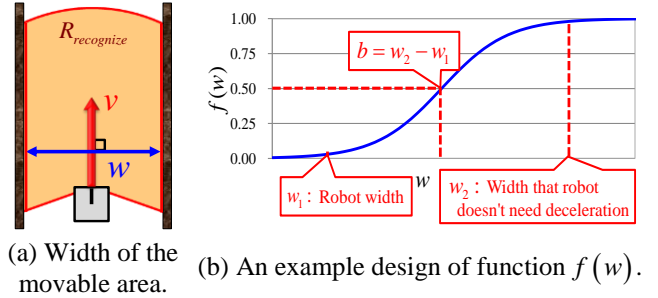


Fig. 3 An example situation of speed control considering movable area.

$$f(w) = \frac{1}{1 - \exp(-a(w-b))}, b = w_2 - w_1 \quad (3)$$

このとき、 w_1 をロボットの幅、 w_2 をロボットが減速不要な移動領域の幅として設定する。

また、本研究では最終的に前章で述べた隠れ領域も考慮し、以下の式によって環境地図とセンサ情報に基づくリアルタイムな速度制御①+②を実現する。

$$v_{max}^{ref} = v_{max} \times \frac{R_{recognize}(\theta)}{R_{map_free} \cap R_{sensor}(\theta)} \times f(w) \quad (4)$$

4. シミュレーション

本章では数値シミュレーションにより、提案手法の有効性の検証を行う。本研究では病院内搬送ロボットMKR-003を想定し、ロボットは全方位移動機構を搭載し、最大移動速度 $v_{max} = 0.5\text{m/s}$ 、最大加速度 0.5m/s^2 で移動可能であるとする。また、機体前方にLRFを搭載し、前方を 0deg として、 100ms 毎に $\pm 120\text{deg}$ 、 4.0m までの距離情報を取得可能であるとする。ロボットは事前に環境の占有格子地図（今回はグリッドサイズを 5cm とした）を取得しているものとする。手法①の進行方向に対して隠れ領域を考慮する角度幅 θ を 90deg とし、進行方向の決定等はファジィポテンシャル法(FPM: Fuzzy Potential Method)[7]を用いて行い、その最大速度指令値 v_{max}^{ref} を

本提案手法により決定を行うものとする。また、手法②の移動領域幅に対して速度制御を行うためのパラメータはロボットサイズ等を考慮してそれぞれ、 $w_1 = 0.70\text{ m}$ 、 $w_2 = 2.0\text{ m}$ 、 $a = 4.9$ とする。

4.1 ロボットと隠れ領域の位置関係に基づく最大速度指令値の検証

本節では、Fig. 4(a)に示すように、ロボットと隠れ領域までの距離をすべて1.5 mとし、その位置関係が異なる状況における隠れ領域の見え方の違いや、提案手法①による最大速度指令値 v_{max}^{ref} を検証する。そこで、ロボットをFig. 4(a)における φ を0から60 degまで5 deg毎変化させた際の各位置で、提案手法による最大速度指令値を算出する。ただし、各位置でのロボットの進行方向はすべてロボット正面方向(y軸正方向)であるとする。

Fig. 4(b)に各位置での提案手法①による最大速度指令値 v_{max}^{ref} を示す。また、 $\varphi = 20\text{ deg}$ 、 60 deg におけるロボットから見た隠れ領域の範囲をそれぞれFig. 4(c)、Fig. 4(d)に示す。Fig. 4(c)とFig. 4(d)を比較して分かるように、ロボットと隠れ領域までの距離は同じであっても、位置関係が異なるとロボットから見る隠れ領域の範囲も異なるため、それに応じた速度制御が必要である。これに対して、提案手法①では、隠れ領域の大きさを考慮することで、Fig. 4(b)に示すように、状況に応じて最大速度を決定することが可能であることが確認できる。

4.2 十字路における速度指令値の検証

まず、Situation 1としてFig. 5に示すような通路幅2.3 mの十字路をロボットが直進する際の速度指令値に関する検証を行う。次に、Situation 2として、事前情報にない幅0.60 m、奥行0.80 mの障害物が(-1.45 m, 4.5 m)の位置に存在する場合、最後にSituation 3として、通路幅が1.5 mであった場合の提案手法②による速度指令値の検証を行う。

Situation 1の結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)、5(c)より、隠れ領域を考慮して速度制御を行わない場合には、十字路を最大速度のまま通過している。これに対して、Fig. 5(b)、5(c)より、提案手法①を適用することで、十字路に侵入する前で減速を行い、十字路侵入後は隠れ領域や障害物がないため、加速するという移動が実現できることが確認できる。

Situation 2の結果をFig. 6に示す。事前に取得した環境地図を用いて、オフラインで速度制限領域を設定する手法[5][6]では、事前情報のない障害物によって生じる隠れ領域を考慮した速度制御を行うことはできない。これに対して、本提案手法①では事前に取得した環境地図とセンサ情報を比較することで、リアルタイムに隠れ領域を検出することが可能である。このため、Fig. 6に示すように、事前情報にない障害物による隠れ領域に対しても減速を行った移動を実現できることが確認できる。

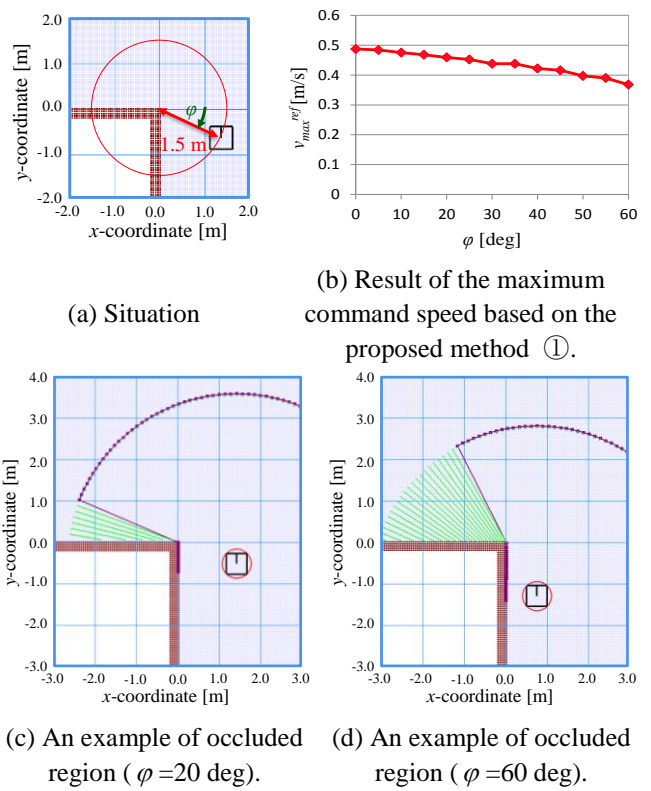


Fig. 4 Verification of the speed control considering occluded regions based on map and sensor in several situations.

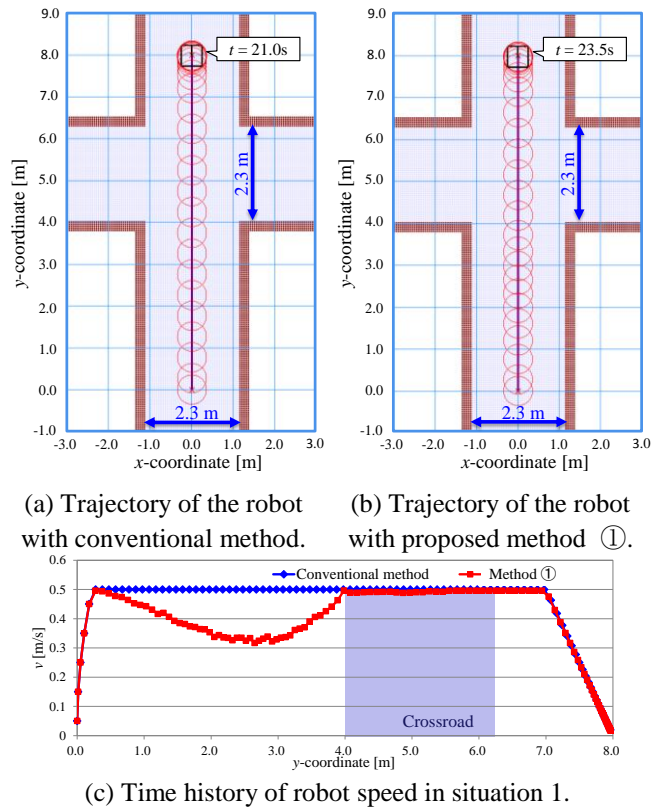
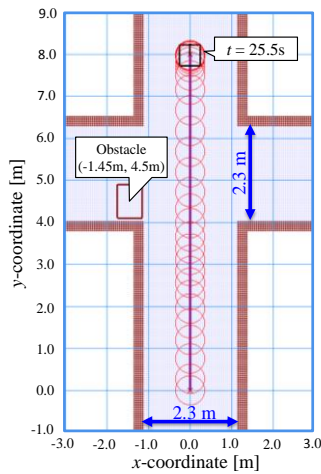
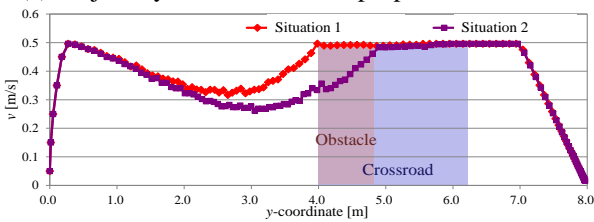


Fig. 5 Verification of the speed control considering occluded regions based on map and sensor at crossroad (Situation 1).



(a) Trajectory of the robot with proposed method ①.



(b) Time history of the robot speed in situation 2.

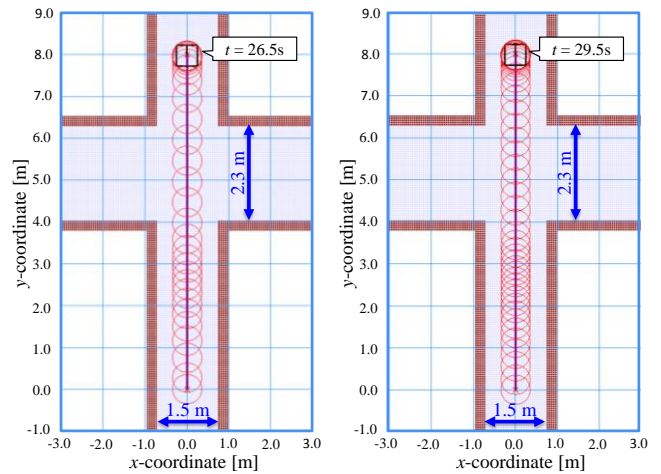
Fig. 6 Verification of the proposed method ① for the obstacle that the robot has no priori information (Situation 2).

最後に、Situation 3の結果をFig. 7に示す。ここでは、移動領域の幅を用いて速度制御を行う手法②を統合することで、Fig. 7(b), (c)に示すように、ロボットが幅の狭い通路などを移動する際に、移動速度を抑えた移動が実現できることを確認した。

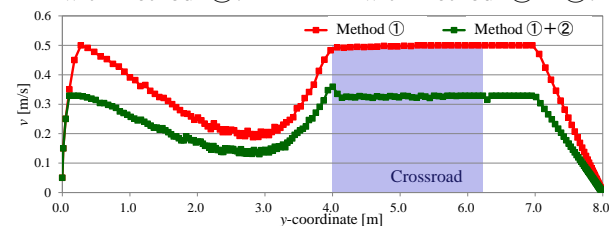
以上より、数値シミュレーションにおいて、隠れ領域の大きさや移動領域の幅を考慮したリアルタイムな速度制御手法の検証を行った。隠れ領域の大きさを考慮した速度制御を行うことで、ロボットから隠れ領域までの距離ではなく、それらの位置関係によって速度を決定することができることを確認した。また、事前に取得した環境地図とセンサ情報から隠れ領域を検出することで、事前情報にない障害物による隠れ領域なども考慮した速度制御が実現できることを確認した。さらに、移動領域幅に基づいた速度制御を加えることで、狭い通路など移動可能な領域が小さい場合に、最大移動速度を抑制することが可能であることを示した。

結言

本研究では、RoboCup サッカー中型リーグから派生し、現在病院内など実環境での稼働を目的とした自律移動ロボットの安全性向上のために、環境地図とセンサ情報に基づく隠れ領域を考慮したリアルタイムな速度制御手法を提案した。ロボットの隠れ領



(a) Trajectory of the robot with method ①. (b) Trajectory of the robot with method ①+②.



(c) Time history of robot speed in situation 3.

Fig. 7 Verification of the speed control considering the movable area at the narrow passage (Situation 3).

域に対する危険度は、距離だけではなく隠れ領域の大きさ、つまり、ロボットと隠れ領域の位置関係に依存する。そこで、隠れ領域の大きさを考慮した速度制御を行うことにより、曲がり角などでは隠れ領域が大きくなる手前で減速を行い、曲がり角へ進行してセンサ視界が開けて隠れ領域が小さくなると加速するといった、人間の動きに近い速度制御が実現できることを確認した。また、事前に取得した環境地図と現在のセンサ情報を用いることで、事前情報に無い障害物などによる隠れ領域も考慮した速度制御が可能であることを確認した。さらに、移動領域幅に基づく速度制御を統合することで、狭い通路など移動可能な領域が小さい場合に、移動速度を抑制した移動が実現できることを確認した。

本稿では静的環境において、隠れ領域と移動領域を考慮した速度制御を行った。今後は、本速度制御に基づく障害物回避手法の検討と移動物体の存在する動的環境への拡張を行い、実機実験によって検証・評価することを課題とする。

参考文献

- [1] Zhao Tiejun, Tan Dalong and Zhao Mingyang, "The Development of a Mobile Humanoid Robot with Varying Joint Stiffness Waist," Proceedings of the IEEE International Conference Mechatronics and Automation, Vol. 3, pp. 1402-1407, 2005.
- [2] B. Krishnamurthy and J. Evans, "HelpMate: A Robotic Courier for Hospital Use," IEEE International Conference

on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 2, pp. 1630-1634, 1992.

- [3] J. M. Evans, "HelpMate: An Autonomous Mobile Robot Courier for Hospitals," Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, pp. 1695-1700, 1994.
- [4] 三浦純, 根岸善朗, 白井良明, "地図と移動の不確かさを考慮した未知環境における移動ロボットの適応的速度制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 47-55, 2006.
- [5] Woojin Chung, Seokgyu Kim, Minki Choi, Jaesik Choi, Hoyeon Kim, Chang-bae Moon and Jae-Bok Song, "Safe Navigation of a Mobile Robot Considering Visibility of Environment," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 10, 2009.
- [6] 後藤清宏, 根和幸, 松野文俊, "速度制約領域を考慮した自律移動ロボットの行動計画," 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 8, pp. 930-937, 2010.
- [7] 津崎良一, 吉田和夫, "ファジィポテンシャル法に基づく全方位視覚を用いた自律移動ロボットの行動制御," 日本ロボット学会, Vol. 21, No. 6, pp. 656-662, 2003.