

# 隠蔽領域での人間の事後存在確率を考慮した 移動ロボットの安全な経路生成と動的障害物回避

東京大学 ○ 河野 通隆, 池 勇勲, 山下 淳, 浅間 一

Safe Path Generation and Dynamic Obstacle Avoidance for Mobile Robot  
Considering Posterior Existence Probabilities of Humans in Occluded Area

The University of Tokyo ○ Michitaka KAWANO, Yonghoon JI, Atsushi YAMASITA, Hajime HAJIME

This paper proposes a safe path generation based on a gradient method, and obstacle avoidance in an occluded area which is invisible area the mobile robot. If sensors installed in the robot are only used, occluded area exists. Therefore, in this paper, occluded humans can be detected using sensor installed in the environment and posterior existence probabilities of humans are calculated to redefine the cost function of a gradient method. By using the redefined cost function, safe path taking into account dynamic obstacles' posterior behaviors to the current states is generated. Experimental results with real robot show that the proposed scheme works successfully in the real environment.

## 1. 序論

近年, 人間との共存下において, 移動ロボットを運用することが期待されている<sup>1)</sup>. 人間とロボットが共存する環境では, 工場などのように, 人間とロボットの存在する領域が明確に分けられてる場合と異なり, ロボットと人が衝突するなどの問題が生じる. 人とロボットの共存下において, 衝突などの問題が生じないように環境を整え, かつロボットの移動効率を向上させることは重要である.

これまでに, ロボットに搭載したセンサを利用して障害物との衝突を回避する手法はさまざまなものが提案されてきた<sup>2,4)</sup>. 現在のロボットの位置から目的地までの回避経路を生成する研究として Konolige が提案した勾配法 (gradient method) が現在幅広く使用されている<sup>3)</sup>. この方法は, ロボットの位置から目的地までのコストを計算し, そのコストが最小になるような経路を選択することによって, 障害物と衝突しない最適な経路をリアルタイムで計算することができ, 局部最小の問題も生じない利点を持っている.

Fig. 1 で, 緑で示す領域は, ロボットに設置したセンサで検出可能な領域で, 灰色の領域はロボットに設置したセンサからは検出できない領域である. 橙色の領域は, 障害物により生じた隠蔽領域 (オクルージョン領域) である. また, 濃い緑で示された線は生成された経路である. 従来の勾配法では, 人の移動速度を考慮せず, 瞬間瞬間でのセンサ情報のみを利用するため, 人間とロボットの位置が近い場合には, Fig. 1 の右の図のように, 衝突する危険がある. また, オクルージョン領域が存在した場合, さらに衝突の危険が増す.

以上のような問題を踏まえ, 本研究では, 環境側にセンサを設置することで, まずオクルージョン領域を解消する. また, 従来の勾配法に動的障害物に対するコストを追加することで, 人間の移動速度による予測を反映した安全な回避経路生成手法を提案する.

## 2. 提案手法

本研究で新しく提案する勾配法を Fig. 2 に示す. 従来の勾配法では, 与えられた格子地図に基づいて障害物に対して計算さ

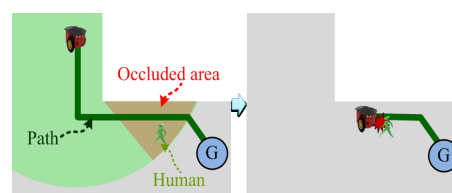


Fig. 1 Collision risk of occlusion area

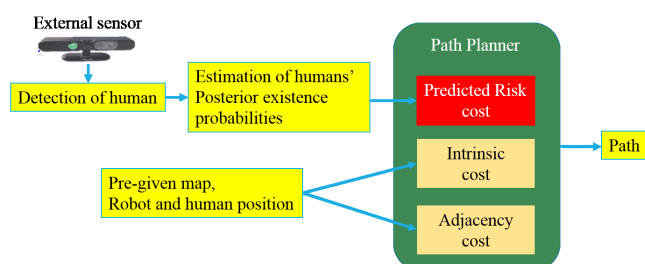


Fig. 2 Proposed method

れる固有コスト (intrinsic cost) と目的地からの距離に対して計算される近接コスト (adjacency cost) を考慮する. このコストに加えて, 本研究では, 外部センサの情報に基づき, 人間の速度ベクトルを算出し, 人間の事後存在確率を反映した危険予測コスト (predicted risk cost) を計算し, これら3つのコストに基づき経路が生成される.

危険予測コストの計算のために, まず環境に設置したセンサからの人間の位置を検出した後, 検出された人間の位置ベクトルの差分を取ることによって, 人間の速度ベクトルを検出する.

外部センサから検出された人間の速度ベクトルが与えられた際,  $\Delta t$  後に予測される人間の位置とその分散は, Fig. 3 および次式の通りである.

$$\mathbf{x}_{t+\Delta t}^h = \mathbf{x}_t^h + \mathbf{v}_t \Delta t \quad (1)$$

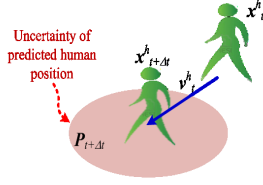


Fig. 3 Uncertainty of predicted human position

$$\mathbf{P}_{t+\Delta t} = \begin{pmatrix} k(v_{x,t})^2 & 0 \\ 0 & k(v_{y,t})^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{x}_t^h$  は、検出された人間の位置ベクトル ( $\mathbf{x}_{x,t}^h, \mathbf{x}_{y,t}^h$ ) であり、 $\mathbf{v}_t^h$  は、位置ベクトルの差分で求められた人間の速度ベクトル ( $\mathbf{v}_{x,t}, \mathbf{v}_{y,t}$ ) である。そして  $\mathbf{P}_{t+\Delta t}$  は、人間の事後位置の不確かさを示す共分散行列である。つまり、危険予測コストは、以下に示すように、 $\Delta t$  後に予測された二変量正規分布に基づいて計算される。

$$E(\mathbf{x}^{ij}) = \frac{\alpha \exp(-\frac{1}{2}(\mathbf{x}^{ij} - \mathbf{x}_{t+\Delta t}^h)^T \mathbf{P}_{t+\Delta t}^{-1} (\mathbf{x}^{ij} - \mathbf{x}_{t+\Delta t}^h))}{2\pi \mathbf{P}_{t+\Delta t}} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x}^{ij}$  は危険予測コストを計算する対象となる格子の位置であり、 $\alpha$  は二変量正規分布を危険予測コストに変換するための定数で、この値が高いほど、危険予測コストが生成される経路に与える影響が高くなる。3つのコストの和に基づいて最適な経路を生成するための関数を次式に示す。

$$N(\mathbf{x}) = \sum_i I(\mathbf{x}^i) + \sum_i A(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^{i+1}) + \sum_i E(\mathbf{x}^i) \quad (4)$$

ここで、 $I(\mathbf{x}^i)$  は固有コストで、静的障害物の位置に従い、格子に与えられるコストである。そして、 $A(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^{i+1})$  は、隣接コストで格子  $\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^{i+1}$  間の距離に対して与えられるコストである。 $E(\mathbf{x}^i)$  は、式 (3) の危険予測コストである。関数  $N(x)$  は、ロボットの位置から目標の位置まで移動する際に、必要な総コストの和であり、最も小さいコストを持つ経路が、最適な経路として選択される。危険予測コストを追加することで、Fig. 4 のように、ロボットに搭載されたセンサのみを用いた場合、灰色の領域や橙色のオクルージョン領域はできないが、提案手法では、環境側にもセンサを設置することで検出可能である。また従来の勾配法では、濃い緑色の点線で示される経路のように、人間の移動後の存在領域を考慮していないため、人間と衝突する可能性が高いが、提案手法では、赤い線で示される経路のように、人間を事前に回避することができる経路が生成され、Fig. 4 の右の図のように人間を回避することができる。

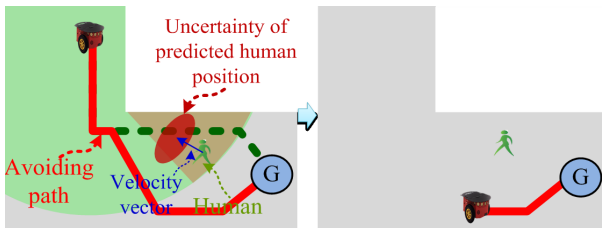


Fig. 4 Collision risk of occlusion area

### 3. 実験結果

東京大学工学部 14 号館 826 号室において、実験を行った。外部センサには、ASUS 社の Xtion Pro Live センサを使用した。

実環境の様子を Fig. 5 (a) に示す。青い領域は、環境の壁などの静的障害物を示し、白い領域は障害物の存在しない領域を示す。Fig. 5 (b) は、従来の勾配法により生成された経路である。従来の勾配法では、人間の将来の存在領域を考慮していないため、ロボットと人間の距離が近い場合、生成された経路上に人間が移動すると衝突が発生しうる。これに対して、提案手法では、Fig. 5(c) に示すように、紫色で示される領域を人間が将来存在する可能性の高い領域として予測し、回避経路を生成するため、衝突を回避することが可能である。

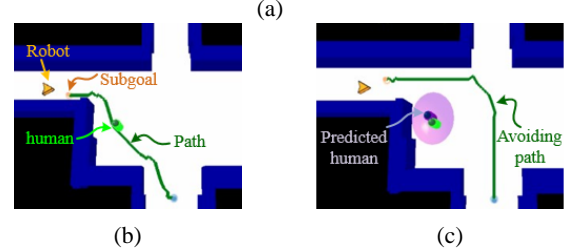


Fig. 5 Experiment results

### 4. 結論

本研究では、危険予測コストを導入することで、勾配経路計画法に人間の移動予測を反映する手法を提案した。またその有効性を実験により示した。提案した方法は、危険予測コストを経路生成の構成要素として追加し、ロボットの安定性を考慮した最適な経路を生成することを可能とした。この手法を用いることで、オクルージョン領域に動的障害物が存在するような環境でも安全な経路を生成することが可能である。

本研究においては、人間の移動を線形であるとして、存在領域を予測しているが、今後は環境からの影響なども考慮した非線形な人間の移動予測まで含めた手法へと発展させてゆく予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、栢森情報科学振興財団の援助を受けた。

### 参考文献

- 1) 浅間一: “サービス工学とサービスロボティクス.” 精密工学会誌, Vol.78, No.3, pp.196-200, 2012.
- 2) D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun: “The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.” IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol 4, No. 1, pp. 23-33, 1997.
- 3) K. Konokige: “A Gradient Method for Realtime Robot Control.” Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 639-646, 2000.
- 4) I. Ulrich and J. Borenstein: “VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots.” Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1572-1577, 1998.