

Pure pursuit 法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案

築城, 大知
九州大学

坂口, 聡範
九州大学

越智, 亮太
九州大学

山本, 薫
九州大学

<https://hdl.handle.net/2324/6791124>

出版情報：自動制御連合講演会講演論文集. 第64回自動制御連合講演会, pp.746-750, 2021. The Japan Joint Automatic Control Conference

バージョン：

権利関係：

Pure pursuit 法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案

○築城大知, 坂口聡範, 越智亮太, 山本薫 (九州大学)

Smooth obstacle avoidance for mobile robots using pure-pursuit algorithms

*T. Tsuiki, A. Sakaguchi, R. Ochi, and K. Yamamoto (Kyushu University)

Abstract: This paper studies the problem of obstacle avoidance for mobile robots using pure pursuit path tracking algorithms. A conventional approach such as artificial potential field methods often leads to sudden changes in the robot's motion. This is because the repelling force is applied to the robot itself. In this paper, we propose a method to achieve smooth obstacle avoidance by shifting the "lookahead point" for the robot to pursue when detecting an obstacle. We introduce two ways for moving the lookahead point. Numerical examples show that the proposed method effectively suppresses the robot's angular acceleration.

Keywords: pure pursuit, obstacle avoidance, mobile robots

1 はじめに

人や荷物の運搬に対して, 地図上のある地点から別の地点まで自律移動するロボットの利活用が期待されている. そして, その自律移動ロボットの実現に必要な機構の一つに, 未知障害物をリアルタイムで回避する障害物回避機構がある. 一般的な障害物回避機構として, 人工ポテンシャル法 [1] がある. この手法ではロボットが, 自身の移動する環境についてポテンシャル場を生成し, そのポテンシャル場から力を受けることにより, 障害物の回避を実現している. しかし, ロボットが直接ポテンシャル場から力を受けていることから, 回避動作の際に急な姿勢角の変化が起こることがあるという問題点がある.

そこで, 本研究では, 自律移動ロボットの姿勢角の急な変化を防ぐ障害物回避手法を提案することを目的とする. 特に, 代表的な経路追従手法である Pure pursuit 法 [2] に適した障害物回避手法として, 「前方注視点移動法」を提案する. Pure pursuit 法とは, 予め設定された経路に対し, ロボットの現在位置から一定距離先の点を逐次目標点と定め, 追従する手法であり, この目標点を前方注視点とよぶ. 本提案手法は, Pure pursuit 法による経路追従を行う自律移動ロボットが障害物を検知した際に, 前方注視点の位置を適切に移動させることで, 滑らかな回避を実現するものである. 本稿では, 前方注視点移動法として 2 つの手法を提案し, その有効性について検証する.

2 問題設定

本節では, 本研究において自律移動ロボットのモデルの一例として用いる, 差動駆動型ロボットのモデル

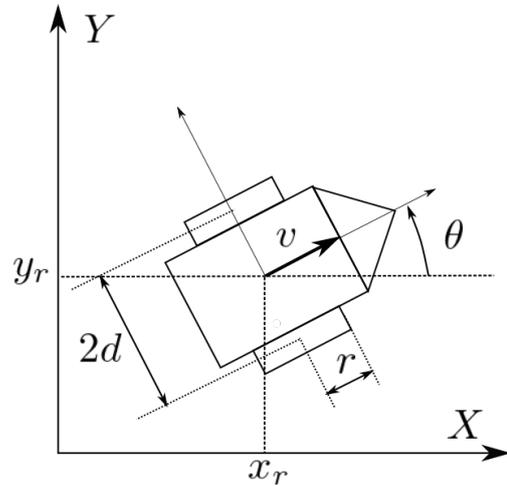


Fig. 1: Robot model

および, 経路追従手法として用いる, Pure pursuit 法について説明する.

2.1 制御対象のモデル

本研究で提案する障害物回避手法は, あらゆる車輪型ロボットに適用が可能であるが, 一例として, 本節では, 一般的な車輪型ロボットのの一つである差動駆動型ロボット [3] の運動学モデルについて述べる. 差動駆動型ロボットは, Fig. 1 に示すように, 二輪の回転速度の差によって操舵される. 本研究においては, ロボットの車輪は滑らないと仮定し, 車軸に対して垂直方向にのみ移動することとする. このとき, 差動駆動型ロボットの数理モデルは以下のとおりである.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

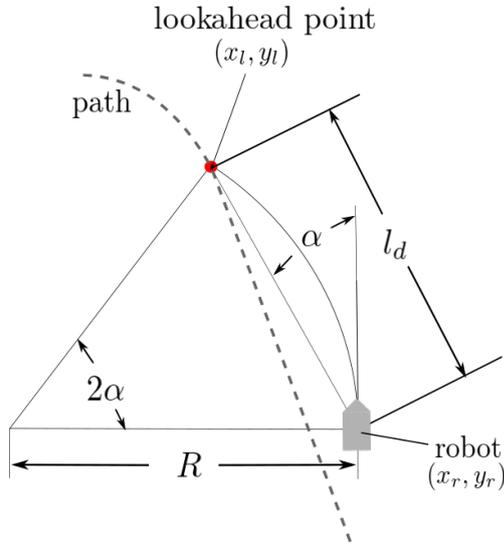


Fig. 2: Pure pursuit geometry

ここで、 (x_r, y_r) はロボットの二輪の中心の座標、 θ は姿勢角、 v は速度、 ω は角速度である。ワールド座標系において、システムの状態方程式は上記で表されるが、ロボットの操作量は、一般に車輪の角速度である。左右の車輪の角速度 ω_L, ω_R は以下の式で表される。

$$\begin{cases} \omega_L = \frac{v - d\omega}{r} \\ \omega_R = \frac{v + d\omega}{r} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r は車輪の半径、 d はロボットの中心から車輪までの距離である。この ω_L, ω_R に左右の車輪の回転速度が追従するよう制御する。

2.2 Pure pursuit 法

本研究で提案する障害物回避手法において、ロボットは Pure pursuit 法を用いて経路追従を行う。Fig. 2 に示すように、Pure pursuit 法とは、あらかじめ与えられた並進速度 v_r および距離 l_d に対し、並進速度 v_r で、ロボットの現在位置 (x_r, y_r) から l_d 先の経路上の点 (x_l, y_l) へ向かうための旋回制御手法である [1]。ここで、 (x_l, y_l) を前方注視点、 l_d を前方注視距離と呼ぶ。ロボットが前進すると、逐次前方注視点を更新することで、経路への追従を達成する。Pure pursuit 法を用いて、制御入力 v, ω と旋回半径 R をつぎのように与える。

$$v = v_r \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2v \sin \alpha}{l_d} \quad (4)$$

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{l_d}{2 \sin \alpha} \quad (5)$$

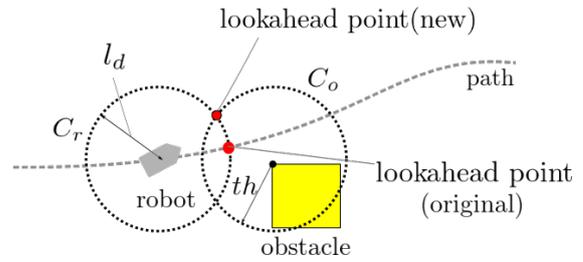


Fig. 3: Proposed method A (the lookahead point is moved to an intersection of circle C_r and circle C_o)

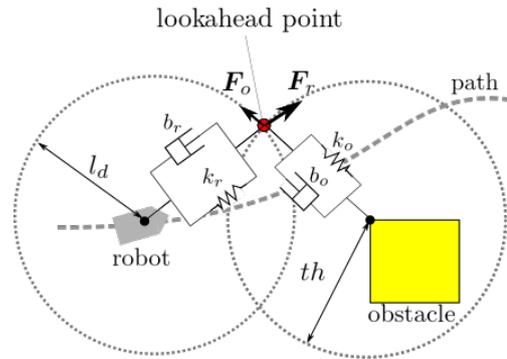


Fig. 4: Proposed method B (the lookahead point is moved away from the obstacle based on the virtual spring and damper force)

ここで、 α は次のような、目標方向ベクトルと現在の方向ベクトルのなす角である。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_l - y_r}{x_l - x_r} \right) - \theta \quad (6)$$

3 前方注視点移動法

本節では、本研究において提案する Pure pursuit 法による経路追従ロボットの障害物回避手法について述べる。2.1 節、2.2 節より、経路追従機構として Pure pursuit 法を採用しているロボットは、前方注視点の座標 (x_l, y_l) と、ロボットの状態 $[x_r \ y_r \ \theta]^T$ がわかれば予め設計された経路に追従することができる。しかし、経路設計の段階では存在しなかった障害物が経路上に存在する場合には、何らかの障害物回避機構により経路を変更する必要がある。人工ポテンシャル法等、ロボット自身へ仮想的な斥力を働かせる手法が一般的であるが、本研究では、Pure pursuit 法における前方注視点を障害物から離れる方向に移動させる手法を提案し（前方注視点移動法とする）、ロボットの急峻な動作を防ぎつつ、障害物の回避を実現する。前方注視点の移動の仕方には以下の二通りを検討する。

3.1 障害物中心円移動 (提案手法 A)

本手法は Fig. 3 に示すように、中心が障害物の位置 (x_o, y_o) で半径が th の円 C_o の円周上に前方注視点を移動させる方法である。なお、 th は予め設定しておく障害物回避機構発動閾値である。前方注視点 (x_l, y_l) の決定方法は、中心がロボットの位置 (x_r, y_r) 、半径が前方注視距離 l_d の円 C_r と円 C_o の交点で、1 サンプリング時間前の前方注視点との距離が近い側の点を前方注視点と定める。この手法を以下、提案手法 A とする。

再定義される前方注視点の座標 (x_l, y_l) は以下の式で求められる。

$$y_l = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$x_l = \frac{y_r - y_o}{x_o - x_r} \cdot y_l + \frac{l_d^2 + x_o^2 + y_o^2 - th^2 - x_r^2 - y_r^2}{2x_o - 2x_r}$$

ここで、 A, B, C はそれぞれ、以下のとおりである。

$$A = 1 + \left(\frac{y_r - y_o}{x_o - x_r} \right)^2$$

$$B = -2y_r - 2x_r \frac{y_r - y_o}{x_o - x_r} + \frac{y_r - y_o}{x_o - x_r} \cdot \frac{l_d^2 + x_o^2 + y_o^2 - th^2 - x_r^2 - y_r^2}{x_o - x_r}$$

$$C = x_r^2 + y_r^2 - l_d^2 + \left(\frac{l_d^2 + x_o^2 + y_o^2 - th^2 - x_r^2 - y_r^2}{2x_o - 2x_r} \right)^2 - x_r \cdot \frac{l_d^2 + x_o^2 + y_o^2 - th^2 - x_r^2 - y_r^2}{x_o - x_r}$$

3.2 前方注視点へ障害物からの斥力を加えた移動 (提案手法 B)

提案手法 A においては、前方注視点を円周上へ移動し、局所的に経路を変更しているため、Pure pursuit 法の経路追従性能の高さから、ロボットは障害物を回避することができる。しかし、元の経路から円周上へ移す際に、多少急な姿勢角の変化が起ってしまうという問題がある。これを抑制するため、Fig. 4 に示すように、前方注視点に対し、障害物からの斥力を働かせる手法を提案する。また、障害物からの斥力を前方注視点に働かせるだけでは、ロボットの速度に合わせて設定した前方注視距離を保つことができないため、ロボットから前方注視点への斥力も働かせることにした。この手法を以下、提案手法 B とする。

提案手法 B における、回避動作中の前方注視点の移動法について述べる。前方注視点のロボット方向、障害物方向の速度ベクトルを v_{lr}, v_{lo} 、前方注視点からロボット、障害物への方向ベクトルのなす角を θ_r, θ_o 、前

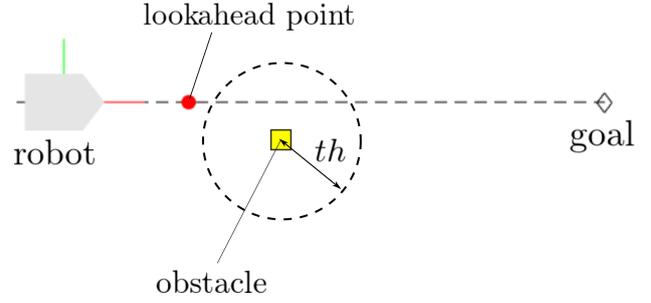


Fig. 5: Simulation settings

方注視点とロボット、障害物との距離を d_{lr}, d_{lo} とすると、ロボット、障害物から前方注視点が受ける力 F_r, F_o 、合力 F は、

$$F_r = -k_r(l_d - d_{lr}) \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix} - b_r v_{lr} \quad (7)$$

$$F_o = -k_o(th - d_{lo}) \begin{bmatrix} \cos \theta_o \\ \sin \theta_o \end{bmatrix} - b_o v_{lo} \quad (8)$$

$$F = F_r + F_o \quad (9)$$

で表される。 k_r, k_o, b_r, b_o はそれぞれ、前方注視点とロボット、障害物間に存在する仮想ばねのばね定数、およびダンパの減衰係数である。合力および速度から逐次前方注視点の位置を算出している。

4 シミュレーションでの検討・考察

本節では、提案する障害物回避手法によってロボットの姿勢角の変化がどのように抑えられるのか、MATLAB シミュレーションによって従来手法と比較する。従来手法には、人工ポテンシャル法的一种である仮想インピーダンス法を用いる。仮想インピーダンス法とは、障害物とロボットとの間、目標点とロボットとの間に仮想的なばねとダンパが存在すると考え、それぞれから斥力と引力を発生させることで、障害物を回避しつつ、目標点へ向かうという手法である [1]。また、今回のシミュレーションでは、2.1 節で述べた差動駆動型ロボットを制御対象としている。

シミュレーションでは、Fig. 5 に示すように、直線経路を追従するロボットの経路付近に障害物が存在する場合を検証した。このとき、ロボットの目標速度 $v_r = 0.3$ [m/s]、前方注視距離 $l_d = 0.8$ [m]、障害物回避機構の動作閾値 $th = 0.6$ [m] と与えて、それぞれの回避手法を比較した。なお、仮想インピーダンス法、提案手法 B にて用いるばね、ダンパの比例定数については、最適レギュレータによる重みづけのチューニングによって定めており [4]、比較のために従来手法と提案手法 B の各定数は等しく設定した ($k_r = k_o = 1, b_r = b_o = \sqrt{3}$)。

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 は、それぞれ仮想インピーダ

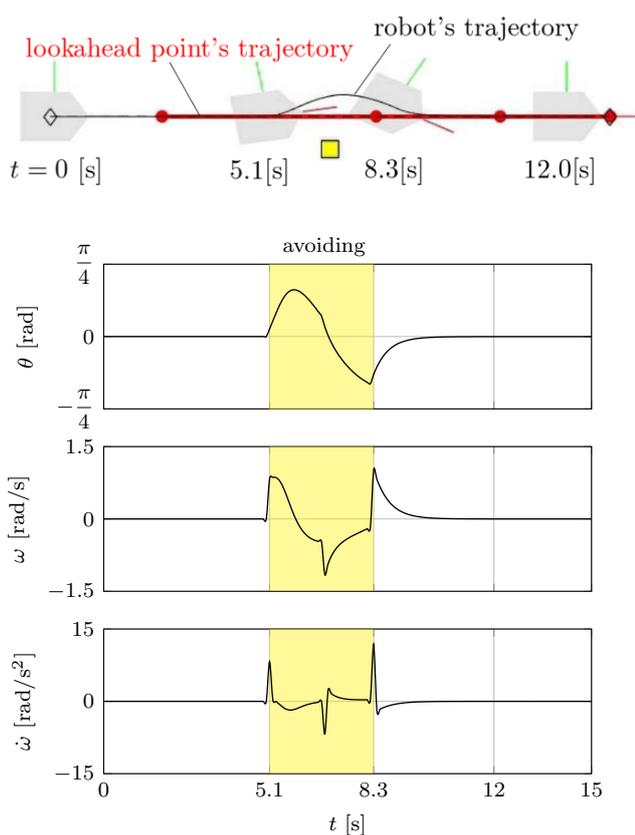


Fig. 6: Time variation of robot's angle, angular velocity, and angular acceleration (Virtual impedance method)

ンス法, 提案手法 A, 提案手法 B を用いて障害物を回避したときの姿勢角, 角速度, 角加速度の時間変化である。また, 回避動作を行っている区間を黄色で示す。

Fig. 6 より, 仮想インピーダンス法では, ロボットは $t = 5.1$ [s] で回避動作を開始し, 8.3 [s] で回避動作を終了し, 元の経路追従に戻っている。この手法の場合, 回避動作開始時点と回避動作終了時点で大きく角速度が変化しており, それぞれのピークでの角加速度は, 8.23 [rad/s²], 11.8 [rad/s²] である。さらに, 回避動作中の $t = 7.3$ [s] でも, 大きな角速度の変化が起きており, 角加速度は, -6.79 [rad/s²] である。

Fig. 7 より, 提案手法 A では, ロボットは $t = 2.4$ [s] で回避動作を開始し, 6.0 [s] で回避動作を終了し, 元の経路追従に戻っている。この手法の場合, 回避動作開始時, 終了時での角加速度のピーク値は, 1.16 [rad/s²], 0.89 [rad/s²] である。提案手法 A においては回避動作中における大きな角速度の変化は見られない。

Fig. 8 より, 提案手法 B では, ロボットは $t = 2.2$ [s] で回避動作を開始し, 5.9 [s] で回避動作を終

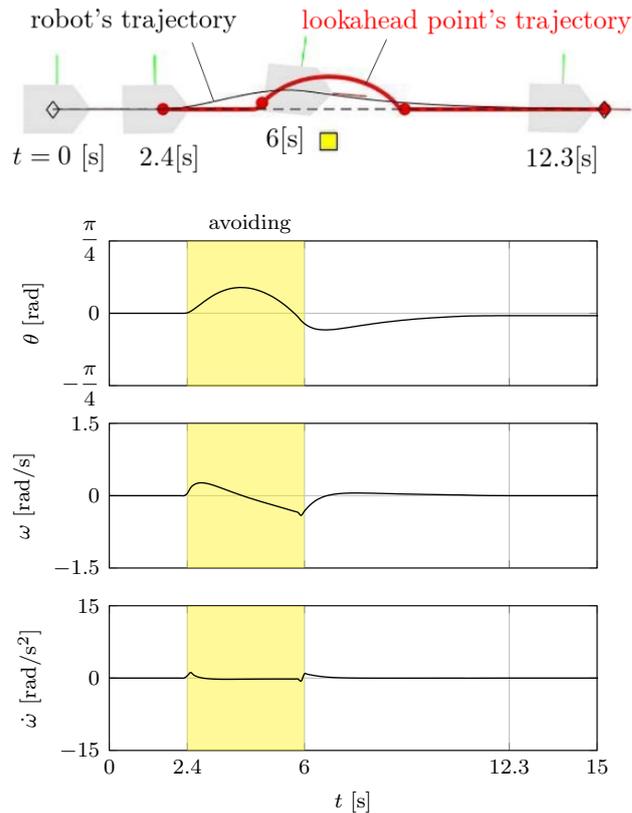


Fig. 7: Time variation of robot's angle, angular velocity, and angular acceleration (Proposed method A)

了し, 元の経路追従に戻っている。この手法の場合, 回避動作開始時, 終了時での角加速度のピーク値は, 0.11 [rad/s²], -9.56 [rad/s²] である。提案手法 B の場合, 回避動作開始時の角速度の変化は非常に小さく抑えられているが, 元の経路追従に戻る際に比較的大きな変化が起きていることが分かる。なお, 回避動作中の大きな角速度の変化は見られない。

以上より, 提案手法 A, B はともに, 従来手法と比較して, 角加速度を大きく抑えることができていることから, 姿勢角の急峻な変化を抑えるという点で有効であるといえる。これは, 従来手法と比較して, 本提案手法はより早めに回避動作を開始していることが要因であると考えられる。さらに, 従来手法では, 回避動作中にも大きな角速度の変化が起きていたが, 提案手法では見られないため, より滑らかな回避動作が可能であるといえる。また, 提案手法 A と提案手法 B を比較すると, 回避動作開始時点での角加速度を抑えられている点では提案手法 B が優れているが, 回避動作終了時点での角加速度の大きさに関しては提案手法 A が優れている。これは, 提案手法 B において, 前方注視点が目標点から引力を受けていないことにより, 回避動作終了後に前方注視点の不連続な移動が起こって

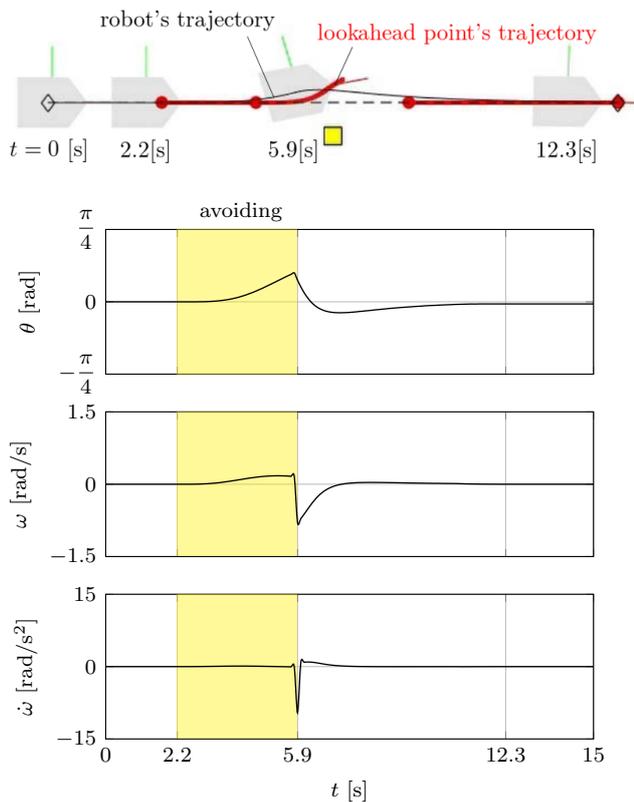


Fig. 8: Time variation of robot's angle, angular velocity, and angular acceleration (Proposed method B)

いるためであると考えられる。

5 おわりに

本研究では、Pure pursuit 法を用いて経路追従を行う自律移動ロボットが、未知障害物を回避する際の姿勢角の急峻な変化を防ぐ回避手法を提案した。数値シミュレーションによる従来手法との比較から、提案手法を用いることで、障害物を回避しつつ、急峻な姿勢角の変化を抑制できることを示した。しかしながら、提案手法では、Pure pursuit 法の経路追従性能によっては障害物との衝突を回避できない場合があるため、前方注視距離、障害物回避動作発動閾値などのパラメータを適切に設定する必要がある。各パラメータの設定方法や、より複雑な環境における有用性の検証については、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K14766 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 新井民夫, 太田順: 仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 1039-1046 (1993)
- [2] J. M. Snider: Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking, Tech. Rep. CMU-RI-TR-09-08 (2009)
- [3] 宮崎文夫, 升谷保博, 西川敦: ロボティクス入門, pp. 90-92, 共立出版 (2000)
- [4] 佐藤和也, 下元陽一, 熊澤典良: はじめての現代制御理論, pp. 194-210, 講談社 (2012)