

ポテンシャル法を用いた全方位移動ロボットによる障害物回避 Obstacle Avoidance by Omnidirectional Mobile Robot using Potential Method

曹 梅芬¹
Meifen CAO

土屋 穂高²
Hodaka Tsuchiya

Abstract – An omnidirectional mobile robot equipped with LiDAR (Light Detection And Ranging) was developed in this research. The rotating, 360°-measurable LiDAR was mounted to measure the relative position and velocity information between obstacles and the robot in real-time. This robot has a 4-wheel independent drive system and omnidirectional mobility. The potential method, which is one of the path-planning methods with excellent real-time performance, is adopted in this research. Since the repulsive potential proposed in previous research cannot be applied to obstacles with width, a new repulsive potential function with an elliptical distribution whose major axis length varies with the width of the obstacle was proposed in this research. Simulation and experiments were conducted to confirm the effectiveness of the proposed method. In this paper, the omnidirectional mobile robot developed in this research is introduced, and simulation and experimental verification results of the proposed method are reported.

Key Words: potential method, obstacle avoidance, omnidirectional mobile robot, LiDAR

1. はじめに

工場などの産業分野や病院などの施設、家庭内、オフィスなどの人間が活動する環境でロボットの活躍が期待されている。このような各種環境下でロボットが環境の変化に適応しながら目的地まで確実に到達できることが求められる。自律移動ロボットの経路計画には環境推定、自己位置推定、経路生成の3つの技術要素がある。未知環境において自己位置を認識し、マップを作成するSLAM (Simultaneous Localization and Mapping)が研究されてきた[1]。この方法は画像処理などの計算コストが高い、動的環境への適応が難しいなどの課題がある。一方、リアルタイム性に優れた経路計画法の一つである人工ポテンシャル場を利用したポテンシャル法[2][3]がある。この方法はFig. 1に示すように、障害物の座標に山、ゴールの座標に谷があると仮想し、その山や谷の形を斥力ポテンシャル(山の場合)と引力ポテンシャル(谷の場合)関数で定義する。複数の斥力ポテンシャルと引力ポテンシャルを重ね合わせて合成ポテンシャル場を生成する。ロボットは現在地の座標において、その合成ポテンシャル場の勾配ベクトルが負の方向に進めば、障害物を回避しつつゴールに向かって移動することができる。この方法は計算コストが低い、動的環境にも適応でき、リアルタイム性が求められる自律移動ロボットの経路生成には優れていると思われる。しかし、ポテンシャル関数により生成されたロボットの移動軌道の時間的な挙動やローカルミニマによりゴールに到達できない(いわゆる停留点が生じる)などの課題がある。ま

た、Kimらが提案したポテンシャル関数[2]では障害物の大きさが非常に小さく、点障害物として仮定されている。さらに、動的障害物を回避できない場合がある。

本研究では、これまでに停留点の対策や動的障害物に関する斥力ポテンシャル関数の提案及びシミュレーション検証を行ってきた[4]。また、ゴール付近に障害物が存在する場合は斥力ポテンシャルと引力ポテンシャルが打ち消されるため、ゴールに到達できない課題に対し、引力ポテンシャル関数を再定義し、シミュレーション検証を行った。しかし、環境推定や自己位置推定を含めての実機検証が行われていなかった。

本研究では、LiDAR (Light Detection And Ranging) を搭載した全方位移動ロボットを開発した。回転式で360°

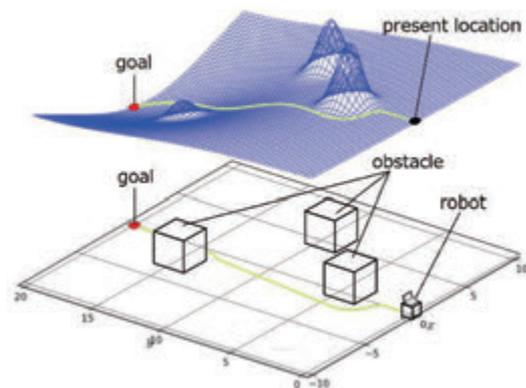


Fig. 1 Example of path-planning by potential method

¹ 東京都立産業技術高等専門学校 電気電子工学コース

² 新潟大学工学部知能情報システムプログラム

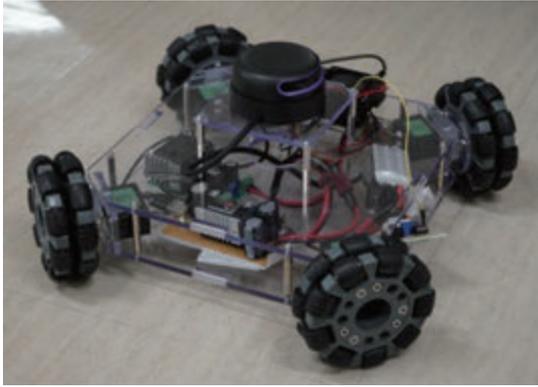


Fig. 2 Appearance of the omnidirectional mobile robot developed in this research

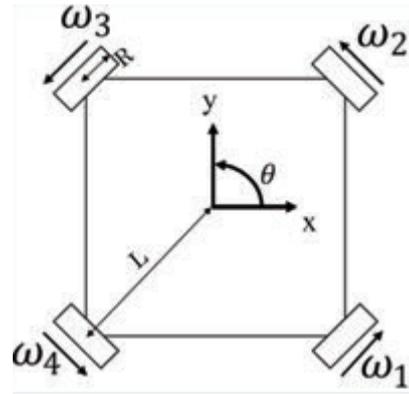


Fig. 3 Kinematic model of omni-wheel

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE DEVELOPED ROBOT

Mass[kg]	3.5 (with battery)
Body Radius [mm]	183.84 (L in Fig. 3)
Wheel Radius[mm]	50
Drive system	4-Wheel Independent Drive
Actuators	KRS-2572HV ICS (Kondo [5])
Sensors	LiDAR: RPLIDAR A3M1 (SLAMTEC [6])
	WT901: 9-axis accelerometer gyro module (Wit-motion [7])
Battery	Li-Po 22.2V 0.4A

測定可能な LiDAR を障害物などの環境測定のために搭載した。このロボットはオムニホイール 4 輪独立駆動型で全方位移動が実現できる。

また、障害物の幅によって長軸の長さが増減する楕円形分布の斥力ポテンシャル関数を提案し、シミュレーション及び開発したロボットを用いた実機検証を行った。

本論文では、本研究で開発した全方位移動ロボットを紹介し、提案法の有効性のシミュレーション及び実験検証結果について報告する。

2. LiDAR とジャイロセンサを搭載した 4 輪駆動型全方位移動ロボットの概要

2.1. 開発したロボットの概要

本研究で開発した全方位移動ロボットの外観図を Fig. 2 に示す。その主な仕様を Table I に示す。このロボットはオムニホイールを持つ 4 輪独立駆動型で、車体の向きを変えずに全方位に移動できるロボットであり、環境や障害物の計測センサとして回転式の 360° LiDAR[6]が搭載されている。また、加速度・ジャイロセンサ[7]により車体の移動距離・回転量を検出する。駆動用アクチュエータには近藤科学のサーボモータ[5]を採用した。このサーボモータは、無限回転可能であり、シリアル通信と PWM のどちらでも制御可能で、速度制御も可能であるなどの特徴を持つ。この特徴により、4 輪の回転方向と回転速度を独立に制御することができ、オムニホイールの制御が可能となる。

2.2. 4 輪オムニホイールの運動学

オムニホイールは本体部分の主動回転部（モータ駆動）と本体外円上に配置されたローラーの受動回転部によって構成される車輪である[8]。通常は 3 輪を 1 セットまたは 4 輪を 1 セットとして用いて、その場での旋回や全方位移動を実現できる。本研究では、高い直進性のある 4 輪構成を採用した。Fig. 3 に 4 輪オムニホイールの運動学モデルを示す。但し、 (x, y, θ) はロボット本体の移動量([m], [m], [°]), $(\omega_i, i = 1, 2, 3, 4)$ は各ホイールの回転角速度[rad/s], L は車体中心からホイール中心までの距離[m], R はホイールの半径[m]である。また、各ホイールは車体に 45° の角度で対称に設置されている。ロボットの運動学式を式(1)と式(2)に示す。式(2)を用いてロボット本体の必要な移動量から各駆動モータの回転速度を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

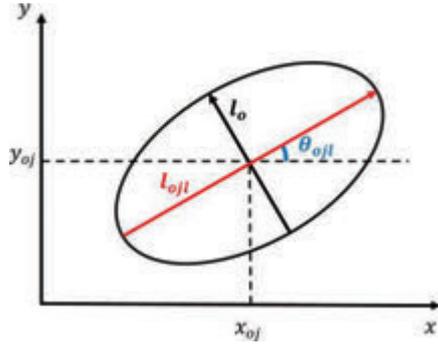


Fig. 4 Elliptical distribution of repulsive potential on the x-y plane

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & L \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & L \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & L \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 本研究で提案するポテンシャル関数

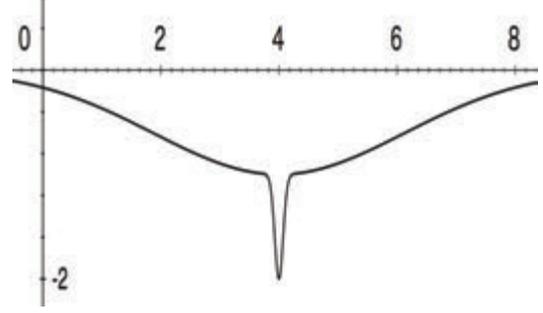
先行研究[2]で提案された斥力ポテンシャル関数を式(3)に、引力ポテンシャル関数を式(4)に、合成ポテンシャルを式(5)に示す。ただし、 (x, y) はロボットの位置座標[m]、 (x_{oj}, y_{oj}) はj番目の障害物の位置座標[m]、 (x_g, y_g) はゴールの位置座標[m]、 (c_g, l_g) は引力ポテンシャルの大きさと分布を定めるパラメータ、 (c_o, l_o) は斥力ポテンシャルの大きさと分布を定めるパラメータ、 N は障害物の数である。式(3)を用いて生成した斥力ポテンシャル場はxy平面で障害物を中心に円状に分布する。

$$U_o(x, y) = c_o \sum_{j=1}^N e^{\left\{ -\frac{(x-x_{oj})^2 + (y-y_{oj})^2}{l_o^2} \right\}} \quad (3)$$

$$U_g(x, y) = c_g \left[1 - e^{\left\{ -\frac{(x-x_g)^2 + (y-y_g)^2}{l_g^2} \right\}} \right] \quad (4)$$

$$U(x, y) = \left\{ \frac{1}{c_g} U_o(x, y) + 1 \right\} U_g(x, y) \quad (5)$$

実環境での検証実験では、障害物の大きさを考慮する必要がある。本研究では、大きさをもつ障害物の斥力ポテンシャル関数を式(6)のように定義する。式(6)を用いて生成した斥力ポテンシャル場はxy平面で障害物を中心に楕円状に分布する。Fig. 4に示すように、 l_{ojl} は楕円の長軸長さを定めるパラメータ[m]、 θ_{ojl} は障害物の角度[°]である。



$$U_g(x, y) = U_{g1}(x, y) + U_{g2}(x, y)$$

Fig. 5 Attractive potential after combining U_{g1} and U_{g2}

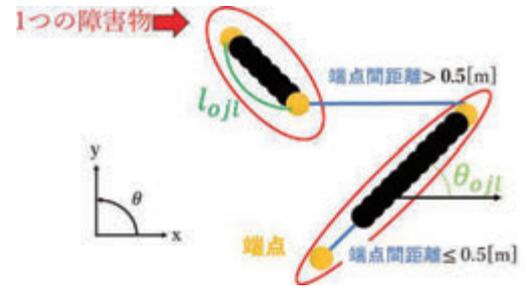


Fig. 6 Determination method of l_{ojl} , θ_{ojl} using LiDAR's measured data

実験では、これらの値はLiDARの測定値から求められる。また、引力ポテンシャル関数は式(7)に定義したもの以外に、もう一つ分布が小さく、大きさが大きいもの(式(8)に示す)を追加する。この二つ引力ポテンシャル合成後のイメージをFig. 5に示す。これはゴール付近に障害物が存在する時にゴールに到達できない課題を解決するためである。ポテンシャルの合成式を式(9)に示す。結果として、ゴール付近に障害物があっても、引力ポテンシャルが斥力ポテンシャルにより打ち消されることなく、合成場の極小点がゴールと重なり、ゴールできるようになる。

$$U_o(x, y) = c_o \sum_{j=1}^N e^{\left\{ -\frac{(x_c+y_s)^2}{\left(\frac{l_{ojl}}{2}\right)^2} - \frac{(x_s+y_c)^2}{l_o^2} \right\}} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} x_c &= (x - x_{oj}) \cos \theta_{ojl} & y_c &= (y - y_{oj}) \cos \theta_{ojl} \\ x_s &= (x - x_{oj}) \sin \theta_{ojl} & y_s &= (y - y_{oj}) \sin \theta_{ojl} \end{aligned}$$

$$U_{g1}(x, y) = -c_{g1} e^{\left\{ -\frac{(x-x_g)^2 + (y-y_g)^2}{l_{g1}^2} \right\}} \quad (7)$$

$$U_{g2}(x, y) = -c_{g2} e^{\left\{ -\frac{(x-x_g)^2 + (y-y_g)^2}{l_{g2}^2} \right\}} \quad (8)$$

$$U = U_o + U_{g1} + U_{g2} \quad (9)$$

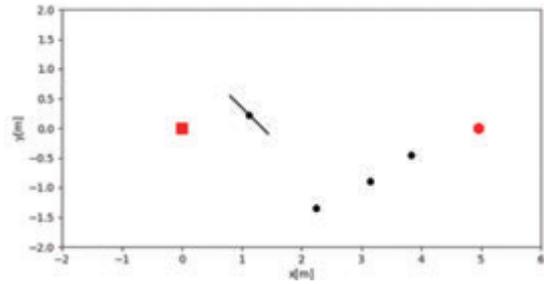


Fig. 7 Layout map of robot, obstacles, and goal



Fig. 8 Experiment scene of obstacles and robot

TABLE II
PLACEMENT COORDINATES OF ROBOT, OBSTACLES AND GOAL

	(x, y) [m]	l_{ojl} [m]	θ_{ojl} [°]
Start (robot)	(0.00, 0.00)		
Obstacles	(1.13, 0.23)	0.9	135
	(2.25, -1.35)	0.1	90
	(3.15, -0.90)	0.1	90
	(3.83, -0.45)	0.1	90
Goal	(4.95, 0.00)		

TABLE III
PARAMETERS FOR POTENTIAL GENERATION

c_o	l_o	c_{g1}, c_{g2}	l_{g1}	l_{g2}
2.5	0.3	5.0	8.0	0.4

4. シミュレーション及び実験検証

4.1. LiDAR の測定値を用いた l_{ojl} , θ_{ojl} の決定方法

LiDAR から障害物との距離と角度データ (x, y, θ) が得られる。大きさのある障害物の場合、多数の (x, y, θ) が得られる。こちらのデータを用いて、Fig. 6 に示すように障害物の l_{ojl} , θ_{ojl} を下記のように決定する。

1. 測定点間の距離が 0.5[m]以上の場所を端点とし、端点間の測定点を一つの障害物として定義する。
2. 一つの障害物の二つ端点を結ぶ直線の長さ l と x 軸を基準としたときの傾きを求める。
3. 求めた長さ、傾きをそれぞれ l_{ojl} , θ_{ojl} とする。

4.2. シミュレーション及び実験検証の環境設定

複数の環境を設定して、シミュレーション及び実験検証を行った。本論文では静止障害物が複数設置されている環

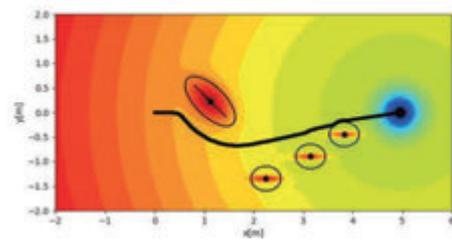


Fig. 9 Simulation result

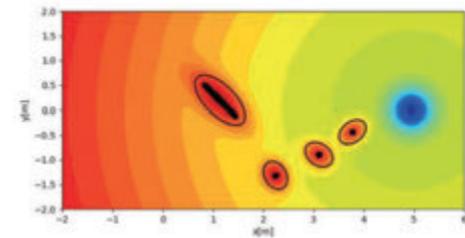


Fig. 10 Potential field generated from measured values of LiDAR

境での結果のみを報告する。この場合のロボットや障害物、ゴールの配置を Fig. 7 に示す。四角形はロボットの初期位置、六角形はゴール、丸い点と線は障害物を示す。各座標を Table II に示す。障害物の (x, y) 座標は、障害物の幅に対する中心とする。

4.3. シミュレーション及び実験結果

シミュレーション及び実験検証において、ポテンシャル場を生成する時に用いる各パラメータを Table III に示す。実験風景を Fig. 8 に示す。シミュレーション結果を Fig. 9 に示す。黒の実線がロボットの走行経路である。Fig. 9 からロボットが各種の幅をもつ障害物を回避しながらゴールに到達可能であることが分かった。また、幅 0.1[m]程度の小さな障害物では、本来楕円分布の長軸になるはずの障害物の幅がポテンシャル分布の広がりよりも小さいため、短軸になっていることが分かる。同じ条件で実機検証を行った。Fig. 10 にロボットに搭載した LiDAR で測定した障害物の座標とゴールの座標で生成したポテンシャル場を

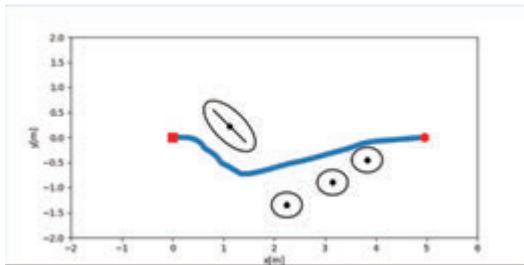


Fig. 11 Experimental result

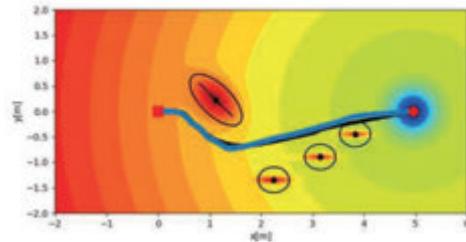


Fig. 12 Comparison of simulation and experimental results

示す。Fig. 9と比較すると、ほぼ同じ場が生成されていることが分かる。またロボット視点から見た障害物の幅は見る角度によって変化することが原因で、Fig. 10に示すように小さな障害物の楕円の向きが一致しなくなる。Fig. 11に実験結果を示す。青線がロボットの走行経路である。Fig. 12はシミュレーション結果と実験結果を同じグラフに示したものである。Fig. 12から開発したロボットがシミュレーション同様に各種の幅をもつ障害物を回避しながらゴールに到達可能であることが分かった。

5. おわりに

本研究では、回転式で360°測定可能なLiDARを搭載したオムニホイール4輪独立駆動型全方位移動ロボットを開発し、ポテンシャル法を用いて障害物回避について、これまでに停留点の対策や動的障害物に関する斥力ポテンシャル関数の提案及びシミュレーション検証を行ってきた。本論文では、障害物の幅によって長軸の長さが増減する楕円形分布の斥力ポテンシャル関数を新たに提案し、シミュレーション及び実機実験により提案法の有効性検証結果について報告した。今後は動的障害物回避についてこれまでに提案した斥力ポテンシャル関数を用いた方法の有効性を実機実験により検証し、その結果を報告する予定である。

参考文献

- [1] 友納正裕, “移動ロボットの環境認識”, システム/制御/情報, Vol. 60, No. 12, pp. 509-514, 2016
- [2] Dong Hun Kim, Seiichi Shin, “Local path planning using a new artificial potential function composition and its analytical design guidelines”, Advanced Robotics 20 (1), pp.115-135, 2006
- [3] 彌城祐亮, 江口和樹, 岩崎聡, 山内由章, 中田昌宏, “ポテンシャル法によるロボット製品の障害物回避技術の開発”, 三菱重工技法, Vol.51, No.1, pp.40-45, (2014)
- [4] 皆川凌, 曹梅芬, “ポテンシャル法を用いた動的障害物との衝突回避”, 電気学会全国大会講演論文集 (CD-ROM), 3-130, 2018
- [5] Kondo Kagaku Co., Ltd., <https://kondo-robot.com/product/krs-2572hv-ics>
- [6] Shanghai Slamtec Co., Ltd., <https://www.slamtec.com/en/Lidar/A3>
- [7] WitMotion Shenzhen Co., Ltd., http://www.wit-motion.com/english.php?m=goods&a=details&content_id=87
- [8] 朱雀技研, “オムニホイールとメカナムホイール” <https://note.suzakugiken.jp/omni-mecanum-wheel-difference-ref-a/>