

指導教員印

2025年度卒業論文

加速度推定機能を組み込んだ ポテンシャル法による動的障害物回避手法 の構築

Dynamic Obstacle Avoidance Using a Potential Field Method
Incorporating Acceleration Estimation

2025年11月20日

東京都市大学 情報工学部
情報科学科
自動制御研究室

大屋 英稔 教授
星 義克 講師

2221103 矢口 雄大

概要

近年、自動走行ロボットの研究が盛んに行われている。特に物流業界では自動配送ロボットの実用化に向けた開発や法律の改正が進められており、トラック運転手の長時間労働是正や物流分野の人手不足の緩和が期待される。

自動配送ロボットの社会実装には未知環境における安全な経路生成が不可欠である。大局的経路計画やニューラルネットワークを用いた方法があるが、大局的経路計画では曲がり角付近で障害物に接近しすぎる問題がある。また、ニューラルネットワークは学習に多くのデータと時間を要する。そのため、これらの手法は未知環境下でのリアルタイムな経路生成には不向きである。一方、ポテンシャル法は計算量が少なくリアルタイム性に優れた手法である。

本研究では、加速度推定機能を組み込んだポテンシャル法による動的障害物回避手法の構築を目的とする。加速度推定を導入することで、障害物の将来的な運動をより高精度に予測し、動的環境下においてより滑らかで安全な経路生成を実現する手法を提案し、最後にシミュレーションによって提案する手法の有効性を検証する。

In recent years, research on autonomous mobile robots has been actively conducted. In particular, in the logistics industry, the development and legal reforms toward the practical use of autonomous delivery robots have been progressing, which are expected to help reduce the long working hours of truck drivers and alleviate labor shortages.

For the social implementation of autonomous delivery robots, safe path generation in unknown environments is essential. Although methods such as global path planning and neural networks have been proposed, global path planning tends to cause robots to approach obstacles too closely at corners, and neural networks require a large amount of training data and time. Therefore, these methods are not suitable for real-time path generation in unknown environments. On the other hand, the potential field method is a lightweight algorithm with low computational cost and excellent real-time performance.

This study aims to construct a dynamic obstacle avoidance method based on the potential field approach incorporating acceleration estimation. By introducing acceleration estimation, the robot can predict the future motion of obstacles more accurately, enabling smoother and safer path generation in dynamic environments. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation.

目次

1	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
2	従来研究	3
2.1	ポテンシャル場の勾配	3
2.2	従来研究 [5]	5
2.2.1	制御対象のロボット	5
2.2.2	障害物の予測と壁沿い走行	6
2.2.3	障害物の裏側への回り込み走行	7
2.3	従来研究 [6]	8
2.3.1	障害物のパラメータの設定	8
3	提案する手法	9
3.1	センサ距離の設定	9
3.2	動的障害物の将来位置予測	10
3.3	提案手法アルゴリズム	11
	参考文献	13

1 はじめに

1.1 研究背景

近年、自動走行ロボットの研究が盛んに行われている．特に物流業界では、自動配送ロボットの実用化に向けた開発や法律の改正が進められている [1]．これにより、トラック運転手の長時間労働の是正や物流分野の人手不足の緩和が期待される．このような背景から、物流業界では労働力不足を補う手段として、自動配送ロボットの社会実装が強く期待されている．そこで社会実装を実現するために、未知環境下や未知障害物の存在下において、安全かつ安定した経路を生成する必要がある．特に、動的障害物を考慮した経路生成を行う場合は、障害物の検出を行い、その移動を適切に予測することが重要となる．

移動ロボットにおける障害物回避のための経路生成手法として、大局的経路計画やニューラルネットワーク、ポテンシャル法を用いた方法がある．大局的経路計画では、ロボットが地図全体などの環境情報をすでに把握している場合において、スタートからゴールまでの最適な経路をあらかじめ計算して求める手法である．この手法では、静的環境下では非常に有効だが、動的障害物が存在する場合には、障害物の移動のたびに経路を再計算する必要があり、計算コストが高くなるという欠点がある [2]．また、ニューラルネットワークは学習に多くのデータと時間を要する [3]．これに対し、ポテンシャル法 [4] は、目的地からの引力および障害物からの斥力によって構成されるポテンシャル場を生成し、ロボットがそのポテンシャル場の勾配に従って移動することで、目的地への経路を導出する手法である．図 1 にポテンシャル場の例を示す．ポテンシャル法は計算量が少ないシンプルなアルゴリズムのためリアルタイム性が優れている手法である．しかし、ポテンシャル法には「停留問題」がある．「停留問題」とは障害物の斥力と目的地の引力が釣り合い、勾配が限りなく 0 に近い状態に陥り目的地にたどり着けなくなる問題である [4]．

従来研究 [5]～[8] では、ポテンシャル場の勾配ベクトルに沿ってロボットを移動させることが考えられている．従来研究 [5] では、センサが 2 点同時に障害物を検出した場合にその 2 点を結ぶ直線の傾きを算出し、その延長線を障害物の進行方向の予測線分として用いることで、その予測線分に沿った壁沿い走行を行わせる手法を示している．また、予測線分と目的地方向との角度関係を用いて方向決定をしている．一方、従来研究 [6] では、壁沿い

走行後に斥力ポテンシャルの影響で大きく膨らんだ経路が生成される問題に着目し、障害物の裏側へ回り込む円弧状の走行を組み合わせることでより効率的な経路を得る手法を提案している。さらに、回避後も障害物を過度に認識し続けることによる遠回りを抑制するために、障害物の重要度を示す重みパラメータを状況に応じて調整する手法を示し、適切な重み設定により安全性を損なわずに経路効率を改善できている。従来研究 [7] では、停留した際に障害物の向こう側に仮ゴールを A*探索法を用いて設定することで、「停留問題」を解決することに成功しており、静的障害物の回避に有効であることが示されている。さらに、壁沿い走行に加えて回り込み走行を組み込むことで、より柔軟に停留を回避する手法も提案されている。一方、従来研究 [8] では、ポテンシャル法に速度推定機能を組み込むことで、動的障害物の回避に成功している。この手法では、動的障害物の回避においてその速度情報を基に仮ゴールの設定を行っている。そのため、障害物の速度や進行方向を考慮した経路生成が可能となり、従来研究 [7] の静的障害物に対する回避手法を組み合わせ、静的または動的環境下における自律移動を実現している。しかし、加速度をもつ障害物に対しては、速度のみを基にした仮ゴールの設定では適切な回避が困難となるという問題がある。その結果、生成される経路が遠回りになったり、目標地点までの最短経路で進行できない場合がある。また、急加速や急減速を行う障害物の挙動を十分に反映できず、スムーズな回避動作を実現することが難しい。

1.2 研究目的

本研究では、従来研究 [6] を基に、ポテンシャル法に障害物の加速度予測機能を組み込んだ動的障害物回避手法を提案する。提案手法では、障害物の位置変化から速度および加速度を算出し、障害物の将来位置を予測する。これにより、障害物の将来位置を考慮したより精度の高い回避行動を実現することを目的とする。また、障害物の将来位置を複数ステップ先まで予測し、それらを斥力ポテンシャル場に反映させることで、ロボットが障害物の進行経路に侵入することを防ぎ、より安全かつ安定した経路の生成を実現する。最後に従来研究 [8]、センサ情報のみを用いたポテンシャル法と提案する手法を比較し、その有効性を検証する。

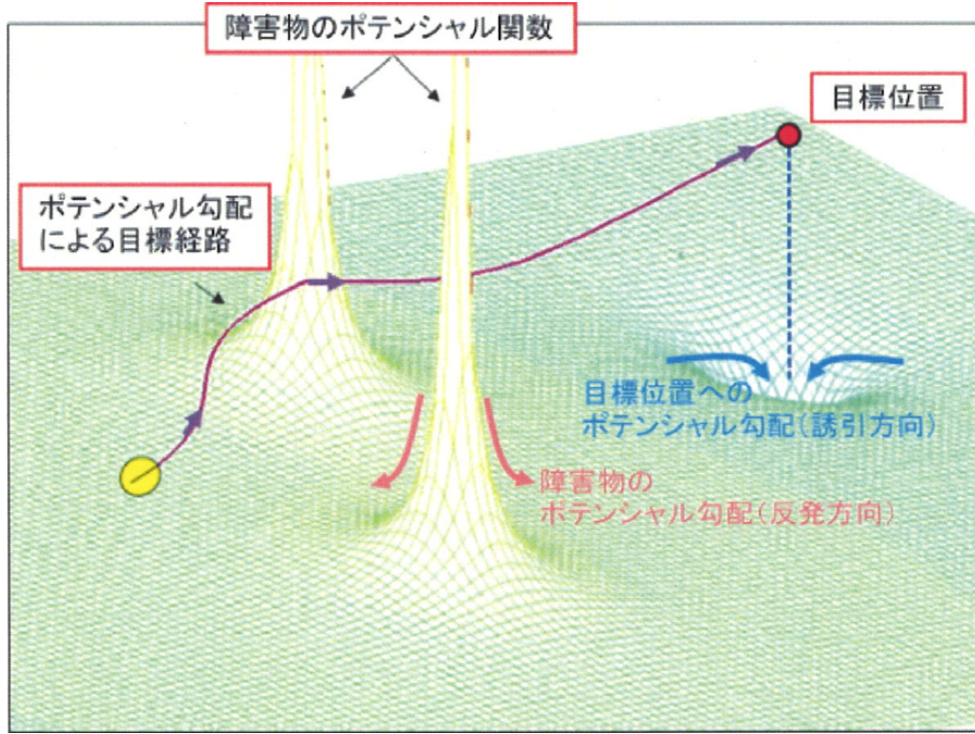


図 1: ポテンシャル場の例 [9]

2 従来研究

2.1 ポテンシャル場の勾配

従来研究 [8] では、障害物から発生する斥力ポテンシャル場、目的地から発生する引力ポテンシャル場、および全体のポテンシャル場を次式のように定めている。

- 障害物座標の斥力ポテンシャル関数 $P_{ob}(x_r, y_r)$

$$P_{ob}(x_r, y_r) \triangleq \frac{1}{\sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (1)$$

- 目的地座標の引力ポテンシャル関数 $P_{ds}(x_r, y_r)$

$$P_{ds}(x_r, y_r) \triangleq -\frac{1}{\sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (2)$$

- 全体のポテンシャル場 $P(x_r, y_r)$

$$P(x_r, y_r) \triangleq \sum \omega_{ob} P_{ob} + \omega_{ds} P_{ds} \quad (3)$$

(x_r, y_r) ロボットの座標

(x_{ob}, y_{ob}) 障害物の座標

(x_{ds}, y_{ds}) 目的地の座標

$P_d(x_r, y_r)$ 引力ポテンシャル関数の重み

$P_o(x_r, y_r)$ 斥力ポテンシャル関数の重み

ここで、 (x_r, y_r) はロボットの座標を示し、 (x_{ob}, y_{ob}) 、 (x_{ds}, y_{ds}) はそれぞれ障害物の座標と目的地の座標を表している。また、(3) 式の ω_{ob} 、 ω_{ds} はどちらも正の実数の重み付けパラメータであり、それぞれ引力ポテンシャル関数 $P_d(x_r, y_r)$ と斥力ポテンシャル関数 $P_o(x_r, y_r)$ の重みとなっている。ただし、 ω_{ob} を大きくしてしまうと障害物の斥力から受ける影響が強まり、目的地への到着が難しくなる可能性があるため $\omega_{ob} < \omega_{ds}$ とする。ロボットの動く方向は、ポテンシャル場の勾配によって決められ、 x 方向、 y 方向における勾配は次式のように求められる。

x 方向の勾配

$$\frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial x} = - \frac{x_r - x_{ob}}{\{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2\} \sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial x} = \frac{x_r - x_{ds}}{\{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2\} \sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial x} = \sum \omega_o \frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial x} + \omega_d \frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial x} \quad (6)$$

y 方向の勾配

$$\frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial y} = -\frac{y_r - y_{ob}}{\{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial y} = \frac{y_r - y_{ds}}{\{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial y} = \sum \omega_o \frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial y} + \omega_d \frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial y} \quad (9)$$

よって、ポテンシャル場内のロボット位置 (x_r, y_r) における勾配 $\nabla p(x_r, y_r)$ は、次式のように表される。

$$\nabla p(x_r, y_r) \triangleq \left(\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial x}, \frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial y} \right) \quad (10)$$

地点 (x_r, y_r) にいるロボットは、式 (10) で表される勾配ベクトルに従って移動することで、目的地へと向かう。

2.2 従来研究 [5]

2.2.1 制御対象のロボット

従来研究 [5] で使用する制御対象は、図 2 に示すようなロボットである。センサは前、左斜め前、右斜め前、左、右の合計 5 つを搭載しており、障害物を検知するとその位置座標を取得できる。センサの検知距離は 70[cm] としている。一方、従来研究 [8] では、検知対象が動的障害物である場合に、センサの検知距離を 200[cm] に拡張している。しかし、同研究で想定されている障害物は等速運動を行うものであり、加速度運動を行う障害物は考慮されていない。本研究では、加速度を持つ動的障害物を対象とするため、センサの検知距離を 300[cm] に設定した。これによって、障害物をより遠距離で検知することが可能となる。すなわち、障害物が加速して接近する場合においても、その加速度を推定し、将来位置をより正確に予測するための時間的余裕を確保できる。

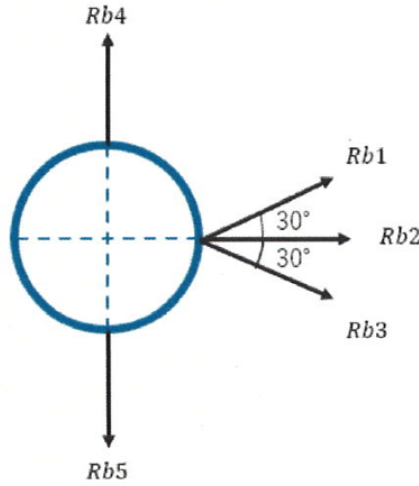


図 2: 制御対象のロボット

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a - b}{1 + ab} \quad (11)$$

2.2.2 障害物の予測と壁沿い走行

ロボットに搭載された5つのセンサのうち、2つが同時に障害物を検出した場合、その2点を結ぶ直線の傾きを算出し、その傾きを基に障害物の進行方向を示す予測線分を生成する。この予測線分に沿うようにして、ロボットは壁沿いの走行を行う。一方で、1つのセンサのみが障害物を検知した場合には、ロボットを10[cm] ずつ、合計 30[cm] 前進させる処理を行う。前進した後も2つのセンサによって障害物が捉えられない場合には、ポテンシャル法に基づき目標地点へ向けた走行に切り替える。また、壁沿い走行を行う際の進行方向は、障害物の予測線分とロボットの現在地点から目標地点へ向かう線分の角度関係を用いて決定する。図3では、障害物の予測線分を Ob 、現在地点と目標地点を結ぶ線分を Ta として表している。これら2つが成す角度 θ は、 Ob の傾き a と Ta の傾き b を用いて次式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a - b}{1 + ab} \quad (12)$$

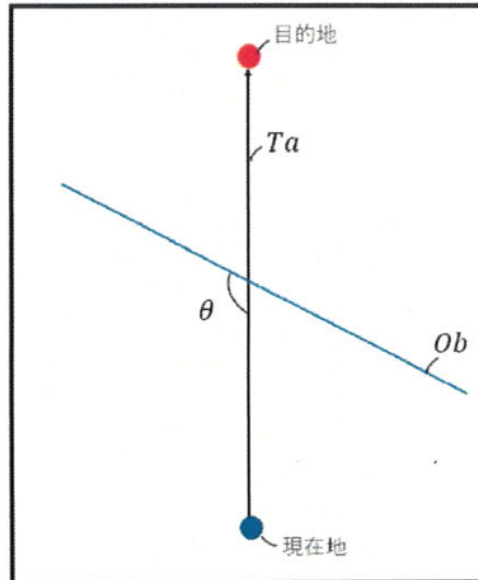


図 3: 予測線分

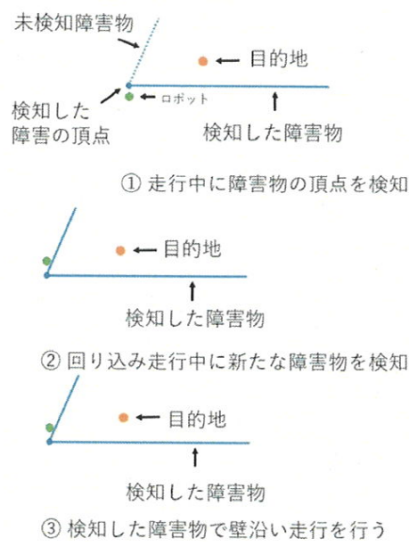


図 4: 回り込み走行中に障害物を検知した場合

2.2.3 障害物の裏側への回り込み走行

従来研究 [5] では，壁沿い走行を行った後，斥力ポテンシャル場の影響によって障害物に対して大きく膨らんだ軌道が形成されてしまう場合がある．これに対し，従来研究 [6] では障害物の後方へ回り込むような走行を取り入れることで，より効率的な経路生成が可能となった．図 4 に示すように，この回り込み走行は，壁沿い走行を終えたロボットが障害物との一定距離を保ちながら円弧状に移動することで実現される．その後，ロボットは目的

地へ向けてポテンシャル法に基づいた走行を行い、回り込んだ先で再び障害物を検知した場合には、図4のように再度壁沿い走行へ移行し、障害物回避を継続する仕組みとなっている。

2.3 従来研究 [6]

2.3.1 障害物のパラメータの設定

従来研究 [5] では、ロボットが壁沿い走行によって障害物を回避した後であっても、依然としてその障害物を認識し続けてしまうため、斥力ポテンシャル場が更新されず、結果として大きく回り道となる経路を辿ってしまうことがある。図5に示すように、重みパラメータ調整前の経路では、ロボットが障害物の背後へ回り込んだ後、すでに目的地方向に向いている状況であっても、障害物からの影響を受け続けてしまっている。こうした問題に対し、従来研究 [6] では、障害物の重要度を表す重みパラメータを調整することで、より安全かつ効率的な経路生成を実現する手法を提案している。図5, 6では、前、右斜め前、右センサが障害物を検知した際の様子をそれぞれ \times , \square , $*$ として示している。図6の結果からも分かるように、回避後の障害物に対する重みを適切に下げることによって、より効率的な経路へと改善できることが確認されている。一方で、重みを下げすぎると障害物の斥力が弱まり、衝突リスクが高まる可能性もある。そのため、安全性を損なわずに経路効率を向上させるためには、障害物の回避動作に支障が出ない範囲で重みパラメータを慎重に調整することが重要となる。

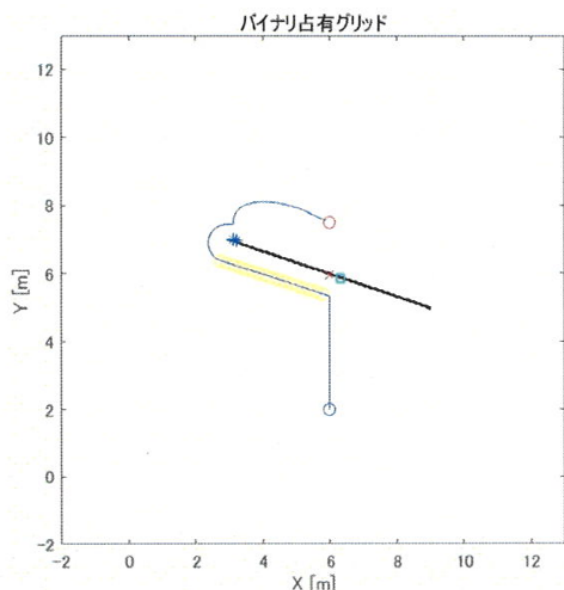


図 5: 重みパラメータ変更前の経路 [6]

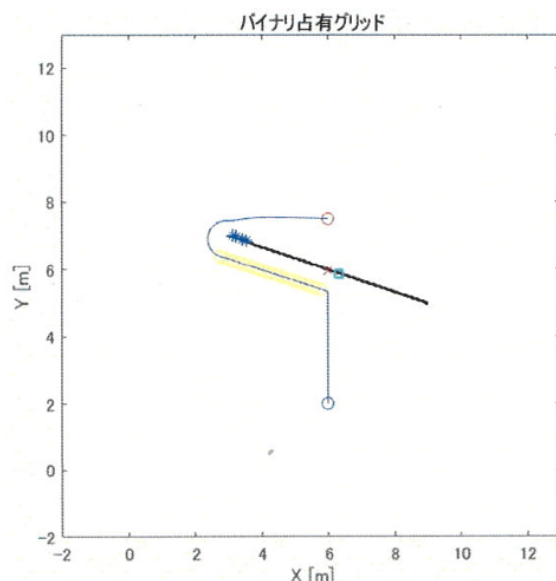


図 6: 重みパラメータ変更後の経路 [6]

3 提案する手法

従来研究 [5]～[7] では、静的障害物のみを対象としており、動的に移動する障害物については十分に考慮されていない。また、従来研究 [8] では動的障害物の回避を扱っているものの、対象としているのは等速運動を行う障害物であり、加速度を伴う障害物に対しては適切な経路生成が困難であるという課題が残っている。そこで本研究では、センサにより検知した動的障害物の情報からその速度および加速度を推定し、複数秒先の将来位置を予測する手法を提案する。具体的には、予測した将来位置をポテンシャル場に反映させることで、加速度を持つ動的障害物に対しても、ポテンシャル法に基づくスムーズで効率的な回避挙動を実現することを目指す。加えて、本研究の手法を従来研究 [5] の静的障害物回避アルゴリズムへ組み込むことにより、動的障害物と静的障害物の双方に対応可能な回避手法を構築する。また、前述したように 300[cm] のセンサを 5 つ持つロボットを使用し、動的障害物をセンサが検知した場合には、その四隅の位置情報を取得できるものとする。

3.1 センサ距離の設定

従来研究 [8] では、動的障害物に対する検知距離を 200[cm] に設定している。しかし、想定している障害物は等速運動を前提としており、速度変化を伴う動的障害物には十分に対

応できないという問題がある．特に，加速度を有する障害物は短時間で接近速度が大きく変化するため，200[cm] 程度の検知距離では回避動作の開始が遅れる可能性が高い．本研究ではこの課題を解消するため，センサの検知距離を 300[cm] に設定した．検知範囲を拡大することで障害物をより早期に捉え，その速度および加速度を推定するために必要な複数回の観測データを安定して取得できる．これにより，障害物が加速しながら接近する場合でも将来位置の予測精度を維持でき，衝突リスクを低減しつつ適切な回避経路を生成するための十分な時間的余裕を確保できる．

3.2 動的障害物の将来位置予測

本研究では，動的障害物 ob_m の将来位置を推定するために，センサで取得した障害物の四隅の位置情報を用いて重心位置をその時刻における代表位置とする．続いて，連続する観測データから速度および加速度を推定し，等加速度運動の運動方程式に基づいて複数秒先の位置を予測する．以下に，動的障害物の将来位置予測の手順を示す．

1. センサによって動的障害物 ob_m の四隅の座標を取得し，その重心位置 \mathbf{p}_t を次式のよう求める．

$$\mathbf{p}_t = (x_1, y_1), \quad \mathbf{p}_{t-\Delta t} = (x_2, y_2) \quad (13)$$

2. 重心位置の変化量から速度ベクトル \mathbf{v} を推定する．

$$\mathbf{v} = (x_v, y_v) = \frac{\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (14)$$

3. さらに速度の変化量に基づき，加速度ベクトル \mathbf{a} を推定する．

$$\mathbf{a} = (x_a, y_a) = \frac{\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (15)$$

4. 推定した速度・加速度と現在位置 \mathbf{p}_t を用いて，等加速度運動の運動方程式

$$\mathbf{p}(T) = \mathbf{p}_t + \mathbf{v}T + \frac{1}{2}\mathbf{a}T^2 \quad (16)$$

により，予測ステップ数 T を変化させながら複数秒先の将来位置を逐次算出する．

5. 加速度が閾値を上回る場合には $T = 20$ ，等速運動に近い場合には $T = 50$ ステップの予測区間を採用する．このように T を動的に切り替えることで，障害物の運動特性に応じた将来位置推定を行う．
6. 推定した将来位置群をポテンシャル場に反映し，ロボットはこれらを基に動的障害物を考慮した回避軌道を生成する．

3.3 提案手法アルゴリズム

提案手法の全体フローを以下に示す．

Algorithm 1 目的地までの経路生成アルゴリズム

```
while 目的地に到達していない do
  センサで周囲の障害物を検出する
  for 各検出対象  $ob_m$  do
    四隅の座標から重心位置  $p_t$  を算出する
    if  $ob_m$  が動的障害物である場合 then
      連続する観測から速度  $v$  と加速度  $a$  を推定する
      for  $\tau = 1 \dots T$  do
        等加速度運動の運動方程式（式 16）により将来位置を算出する
      end for
      予測位置群を斥力ポテンシャルとしてポテンシャル場へ反映する
    else if  $ob_m$  が静的障害物である場合 then
      従来手法 [5] の静的障害物回避アルゴリズムを適用する
    end if
  end for
  ポテンシャル場（目的地からの引力＋障害物の斥力（予測位置含む））を構築する
  ポテンシャル場の勾配に基づき，ロボットを移動させる
end while
```

本手法では，ロボットが目的地へ到達するまでの各ステップで，センサ情報に基づいてポテンシャル法により移動方向を逐次決定する．まず，ロボットは搭載センサを用いて周囲の障害物を検出する．検出された各障害物に対して，その四隅の座標から重心位置を算出し，対象が動的障害物か静的障害物かを判別する．動的障害物に対しては，連続した観測から速

度および加速度を推定し，等加速度運動の運動方程式を用いて将来位置を時刻 $\tau = 1 \dots T$ まで予測する．これらの将来位置群を斥力ポテンシャルとしてポテンシャル場に反映させる．一方，静的障害物に対しては，従来手法 [5] に基づく静的障害物回避アルゴリズムを適用する．すべての障害物処理が完了すると，目的地に対する引力ポテンシャルと，静的または動的障害物から生じる斥力ポテンシャルを統合し，全体のポテンシャル場を構築する．ロボットは，このポテンシャル場の勾配方向に沿って逐次移動し，最終的に目的地へ到達する．

参考文献

- [1] 経済産業省, 自動配送ロボットの将来像を取りまとめました, <https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250226002/20250226002.html>
- [2] 青柳 誠司, 佐藤 伸仁, 山本 恭輝, 高橋 智一, 鈴木 昌人, ”移動ロボットの移動障害物回避に関するファジィルールの学習 ポテンシャル法, 強化学習法との比較, ” システム制御情報学会論文誌, Vol. 34, No. 8, pp. 209–218, 2021.
- [3] Ngangbam Herojit Singh and Khelchandra Thongam, ”Neural network-based approaches for mobile robot navigation in static and moving obstacles environments,” Intelligent Service Robotics 12.1 (2019): 55–67. Web. <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0260-2>.
- [4] Xing. Yang, Wei. Yang, Huijuan. Zhang, Hao. Chang, Chin-Yin. Chen, and Shuangchi. Zhang, ”A new method for robot path planning based artificial potential field,” 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1294–1299, 2016.
- [5] 粕山 剛輝, ”壁沿い走行を組み込んだ仮想ゴールポイントに基づくポテンシャル法による停留と障害物回避, ” 東京都市大学 2021 年度卒業論文 (2021)
- [6] 平岡 翔, ”ポテンシャル法における停留問題の回避, および効率的な経路生成手法, ” 東京都市大学 2022 年度卒業論文 (2022)
- [7] 小池 基也, ”A*探索法を組み込んだ静止障害物に対するポテンシャル法の回避方法, ” 東京都市大学 2023 年度卒業論文 (2023)
- [8] 榎田 日和, ”速度推定機能を組み込んだポテンシャル法による動的障害物の回避, ” 東京都市大学 2024 年度卒業論文 (2024)
- [9] 瑠城 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, ” 新製品・新技術特集 三菱重工技法, Vol.51, No.1, pp.40–45, 2014.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙にも関わらず丁寧にご指導，ご鞭撻のほどをいただきました大屋 英稔 教授，星 義克 講師に深く感謝申し上げます．また，悩んでいるところを見逃さず声をかけていただいた大学院生の先輩方，日頃から同じ研究室の仲間として相談に応じてくださった自動制御研究室の皆様にもお礼を申し上げます．この1年間での研究生生活を通じて，様々な経験を積むことができ大きく成長することができました．今後の人生でもこの経験を活かしていきたいと思います．ありがとうございました．