

人工ポテンシャル法を用いた未知環境での移動ロボットナビゲーションにおける停留回避

久保, 亮太
九州大学

山本, 薫
九州大学

<https://hdl.handle.net/2324/6632465>

出版情報 : Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference. 65, pp.8-13, 2022. 自動
制御連合講演会
バージョン :
権利関係 :



人工ポテンシャル法を用いた未知環境での移動ロボットナビゲーションにおける停留回避

○久保亮太 山本薫 セメリスアンドレアス (九州大学)

Deadlock avoidance for robot navigation with potential field method in an unknown environment

*R. Kubo, K. Yamamoto, and A. Themelis (Kyushu Univ.)

Abstract: We propose an efficient obstacle and deadlock avoidance strategy for mobile robots in an unknown environment using a potential field method. A well-known downside of potential field methods is their tendency to get stuck in deadlock positions, originating because of the balancing between the attractive force to the destination and the repulsive forces from the obstacle. To account for this shortcoming, we modify the way the robot receives repulsion forces by introducing virtual constraints that fill in hollow obstacles, and design a strategy for generating temporary intermediate destinations. Numerical simulations confirm the effectiveness of the proposed methodology.

Keywords: deadlock avoidance, obstacle avoidance, mobile robots, potential field methods

1 はじめに

近年、自律移動ロボットは、飲食店での配膳サービスや災害現場での探索活動等で利用されている。ロボットの自律化により、人が行う作業を一部または完全に代行することで、危険作業の回避および人間の長時間操作による疲労やミスの低減が見込まれる。ロボットの導入が期待される環境では、災害等の想定外の事態により、事前情報にない障害物や移動する物体が存在することが考えられる [1]。そのような未知の環境において、自律移動ロボットを制御し、障害物回避を実現させる一手法として人工ポテンシャル法 [2] が挙げられる。本手法では、障害物回避のための斥力や目的地到達のための引力を発生させることにより、目的地までのロボットナビゲーションを実現する。この方法は、計算量が少なく、またリアルタイムに経路を変化させることができるため、未知の障害物を回避することも可能である [1]。しかし、人工ポテンシャル法には、障害物からの斥力と目的地からの引力がつりあい、ロボットが動かなくなる停留問題がある [3]。また、障害物回避についても改善点があると考えられる。

そこで本研究では、人工ポテンシャル法を用いたロボットナビゲーションにおける障害物回避の効率化および停留回避手法の開発を目的とする。文献 [4] では、人工ポテンシャル法のひとつである wavefront 法を用いて未知障害物を回避する手法が提案されているが、障害物は凸体に限定されている。そこで本稿では、凹凸のある未知障害物に対応する障害物回避手法を提案する。また文献 [5][6] では、仮想障害物を用いた停留回避手法や障害物回避のためのロボット誘導法が示されて

いる。この仮想障害物を停留の要因となる障害物の窪みを塞ぐために用いることで、停留回避の一助とすることを考える。本稿では、障害物回避手法および停留回避手法をそれぞれ 2 つ提案し、その有効性をシミュレーションにより検証する。

2 問題設定

本稿では、移動ロボットモデルとして、全方位に移動可能な質点モデルを採用する。ダイナミクスは以下の 2 次系を仮定する：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \\ \dot{v}(t) = u(t). \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $x(t), v(t), u(t) \in \mathbb{R}^d$ はそれぞれ、 d 次元空間を移動するロボットの時刻 t における位置、速度、ロボットへの加速度制御入力である。本稿では、これをサンプル時間 Δt で離散化した以下のモデルを用いる：

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k \Delta t + \frac{1}{2} u_k \Delta t^2 \\ v_{k+1} = v_k + u_k \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

加速度制御入力 u は次式により与えられるものとする：

$$u = \frac{1}{m} (F_g + \sum_{o \in \mathcal{A}} F_o) = u_g + \sum_{o \in \mathcal{A}} u_o. \quad (3)$$

ここで、 m はロボットの質量、 F_g, u_g はそれぞれロボットに働く目的地方向への引力と対応する加速度制御入力、 F_o, u_o はロボットに働く障害物からの斥力と対応する加速度制御入力である。 F_g, F_o は目的地や障害物とロボットとの距離およびロボットの速度により決定される。 $\mathcal{A} := \mathcal{A}(t)$ は時刻 t において回避の必要がある

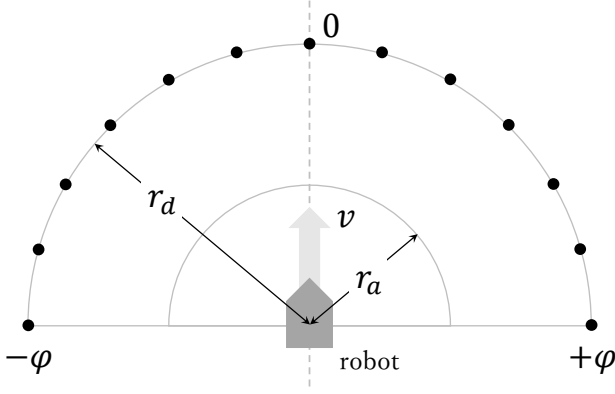


Fig. 1: Detection and avoidance range.

「有効障害物点」の集合を表す．詳細な定義は3.1節で述べる．さらに，ロボットの最大加速度 $a_{\max}$ および最大速度 $v_{\max}$ を考慮し，各時刻での制御入力 u_k に対し以下の制約を課す：

$$\|u_k\| \leq a_{\max} \quad \text{かつ} \quad \|v_k + u_k \Delta t\| \leq v_{\max}. \quad (4)$$

この他，移動ロボットが満たす性質として，以下を仮定する．

- 仮定 1. ロボットは目標地点の位置を常に認識できる．
- 仮定 2. ロボットはセンサにより自身の速度および加速度を正確に取得できる．
- 仮定 3. ロボットは搭載する LiDAR センサ等により，自身から距離 r_d 内にある物体を点群で認識し，その相対位置を計測できる．

3 障害物回避の効率化と停留回避

本節では，本研究で提案する障害物回避手法および停留回避手法について述べる．外界センサは，Fig. 1 に示すように，進行方向から $\pm\varphi$ ，半径 r_d の範囲内を計測するものとする（図は $\varphi = \frac{\pi}{2}$ の場合）．以降では，ロボットから距離 r_d の扇内を検知範囲，距離 $r_a (< r_d)$ の扇内を回避範囲と呼ぶ．なお，Fig. 1 のドットは計測点を表す．

3.1 障害物回避手法

静止障害物に対しては，ロボットの進行方向にない障害物は無視してもよいと考えられる．そこで，進行方向 $\pm\varphi$ の回避範囲内にある障害物のうち，衝突の危険がある障害物と危険のない無視してもよい障害物を判別する手法を用いることにより障害物回避の効率化を

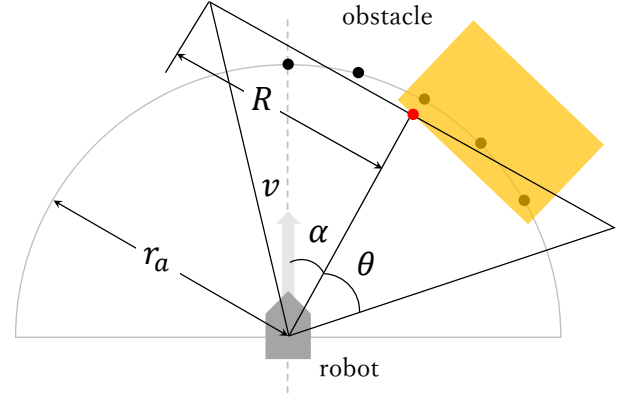


Fig. 2: An active obstacle point (r_a).

図る．(3) 式の斥力項は，衝突の危険がある点 $o \in \mathcal{A}(t)$ のみから斥力を受けることを表している．さらに，本研究では，センサによる計測点が十分に密にとれない状況を考慮し，連続する点群データを用いて障害物の形状に応じた斥力 [1] がロボットに働くように処理を加える．

以下，3.1.1 節では，衝突危険性の判別手法について，3.1.2 節では，障害物形状を考慮する計測データ処理手法について述べる．

3.1.1 障害物点群データの判別

障害物回避の効率化のため，衝突の危険がある障害物とそうでない障害物をそれぞれロボットへの斥力生成に関与する「有効障害物」および斥力項から除外する「無効障害物」に分類することを考える．障害物認識では，Fig. 2, Fig. 3 に示すように，二等辺三角形を用いて有効障害物点か無効障害物点かを判断する．ここで， v はロボットの速度ベクトル， R は三角形の底辺の半分の長さ， α, θ はそれぞれ三角形の垂直二等分線と速度ベクトルのなす角および頂角の半角である．図中の三角形は，ロボットの現在地と障害物点を結んだ距離を高さ，障害物点を底辺の midpoint とする二等辺三角形である．

危険性の判別は，Fig. 2 に示すように，速度ベクトルが三角形の中に存在する，つまり $\alpha \leq \theta$ の場合は有効，Fig. 3 に示すように， $\alpha > \theta$ の場合は無効とする．また， R を変更することで，有効障害物点の個数を変化させ，ロボットに働く斥力を調整することができる．

3.1.2 障害物の形状を考慮した回避

3.1.1 節で有効障害物と判断された点群データ 1 点 1 点から斥力を受ける場合，障害物の形状によっては意

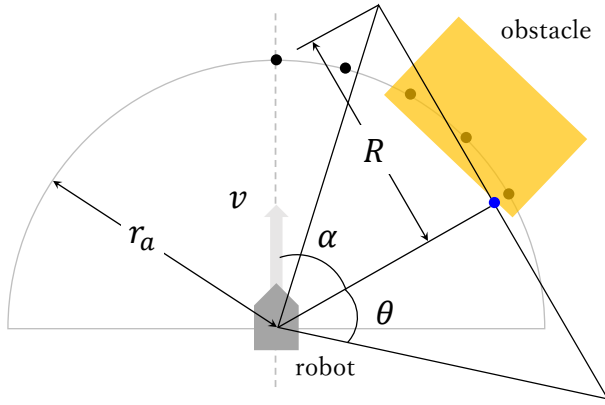


Fig. 3: An inactive obstacle point (r_a).

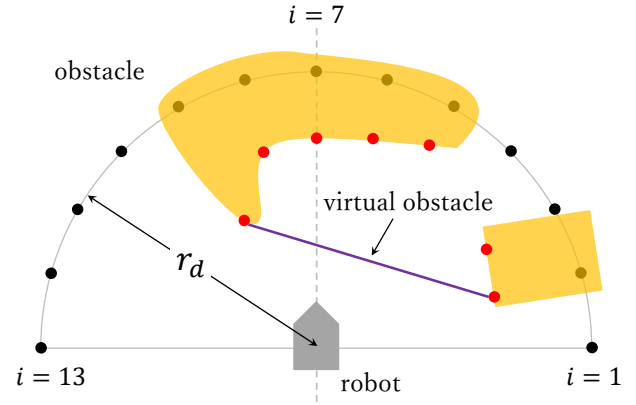


Fig. 5: Virtual obstacles blocking the depression (r_d).

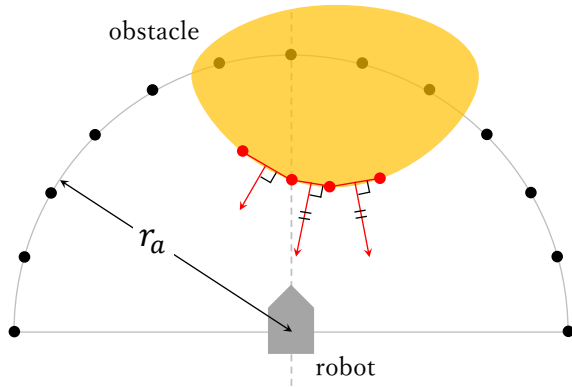


Fig. 4: Repulsion according to obstacle shape (r_a).

図しない向きに斥力が働くことで、目的地到達が妨げられる。そこで、Fig. 4 に示すように、連続する点群データを2点毎に結びその直線に対し垂直に斥力を受けるようにすることで、障害物の形状を考慮する。斥力項のうち、距離により決まる成分は、2点のうちロボットに近い点の距離を用いて計算する。

3.2 停留回避手法

人工ポテンシャル法には、ロボットに働く斥力および引力がつりあうことで動かなくなる停留問題がある。停留に陥る状況としては以下の2つが考えられる。

- a) 窪みに侵入してしまい、抜け出すことができない場合。
- b) 目的地方向に障害物があり力がつりあう場合。

そこで、a) の場合は、仮想的な直線状の障害物 [6] を用いて窪みを塞ぐ手法を提案する。また、b) の場合は、

一時的に目的地を変更することで、停留から抜け出す。

本研究では、ロボットの直近5タイムステップの位置の分散がある微小値 ε 以下であれば、停留が発生していると判断する。

3.2.1 窪みを塞ぐ仮想障害物の生成

停留を生じさせる典型的な事例の1つとして、障害物群の窪みに侵入してしまう場合が挙げられる。そこで、あらかじめそのような窪みを仮想的な障害物により塞ぐことを提案する。窪みは、検知範囲内にある障害物点群とロボット間の距離により判定する。

以下では、Fig. 5 に示すような状況を例にあげて説明する。まず、検知範囲内の計測点に図のように番号をつける。そして、最初の障害物検知点 (図では $i = 2$) を基準点とする。次に、この基準点とロボットとの距離と、次の計測点 ($i = 3$) とロボットとの距離を比較し、小さい距離を与える点を基準点に設定する。この操作を順番に繰り返し、基準点の更新が起こった時点で始めの基準点とその基準点を直線で結び窪みを塞ぐ。ただし、隣り合う計測点で更新が起こった場合は、基準点の変更のみを行うものとする。なお、例では計測点 $i = 4$ はスキップされている。これは、 $i = 4$ では障害物が検知されていないが、計測点 $i = 3$ と $i = 5$ の間の距離がロボットよりも小さいため通過不可能であるとして処理するためである。一方、通過可能である場合は、上記の処理を一旦終了し基準点を $i = 5$ として同様の操作を繰り返す。同様に、隣り合う計測点間の距離がロボットよりも大きい場合は、通過可能な隙間があると判断し、基準点の変更を行うものとする。

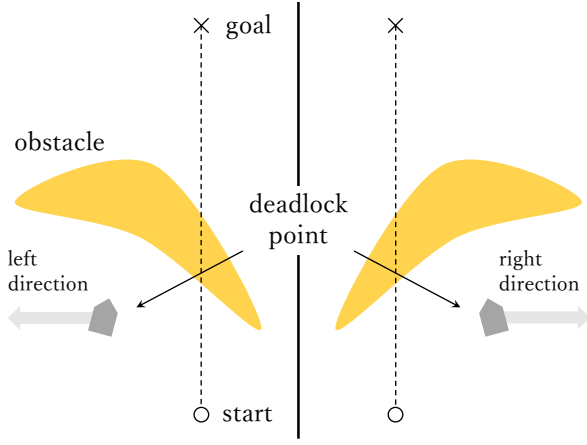


Fig. 6: Direction of travel in deadlock.

3.2.2 停留時の一時的な目的地生成

次に、目的地方向に障害物があり停留する場合の回避方法を述べる。この場合は、一時的に目的地を変更し停留状態から抜け出す手法を提案する。なお、本手法においては、ロボットは自身と出発地点との相対位置を取得できるものとする。停留が発生した場合は、Fig. 6に示すように、まず、出発位置と目標位置を結んだ点線で二分される平面上のどちらにロボットが存在するかによって進行方向を決定する。右半平面に存在する場合は右方向へ、左半平面の場合は左方向へ進む。

以下では、Fig. 7に示すように、進行方向が右に決定された場合について述べる。一時的な目的地は、ロボットの現在地と真の目的地を結んだ直線に対して半径 r_d の右半円上の検知点のうち障害物を検知していない点でかつ、真の目的地に最も近い点 (図では赤 $\times$) とする。なお、右半円の検知点全てが障害物を検知した場合は、進行方向を左に変更する。その後、一時的な目的地にある距離 e_r より近づいた場合、真の目的地方向に障害物があれば上記の方法と同様に一時目的地を生成し、障害物がなければ真の目的地方向へ進む (図では障害物を検知)。

4 シミュレーションによる検討・考察

本節では、提案手法の有効性を検証するため数値シミュレーションにより検証する。4.1 節では、障害物回避手法について、4.2 節では、停留回避手法についてそれぞれ MATLAB シミュレーションの結果を示す。以下では、3.1.1 節、3.1.2 節、3.2.1 節、3.2.2 節の提案手法をそれぞれ①、②、③、④と記述する。数値例題におけるパラメータは、Table 1 に示す。

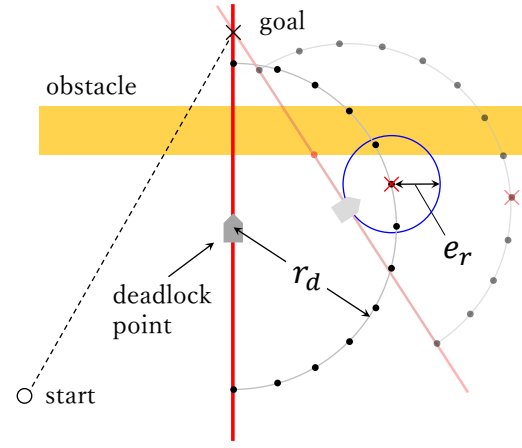


Fig. 7: Temporary destination in the case the direction of travel in deadlock is determined right.

Table 1: Parameters in the simulation.

Maximum velocity of the robot	1.0 m/s
Maximum acceleration of the robot	1.0 m/s ²
Mass of the robot	1.0 kg
Size of the robot	0.21 m
Size margins of the robot	0.59 m
Detection range of the robot	3.5 m
Avoidance range of the robot	1.0 m
Number of measurement points	20
φ	$\frac{\pi}{2}$
R	$\frac{1}{\sqrt{15}}$ m
ε	3.0×10^{-4}
e_r	2.5 m

4.1 障害物回避手法の検証結果

ここでは、Fig. 8に示すような簡単な障害物回避を行う場合において、提案手法①②の導入により効率性が向上するかの検証を行う。図中の黄緑色の線は、手法①②の両方を採用した場合の、ロボットが通過した軌跡である。同様のシミュレーションを、手法①のみを採用する場合、手法①②の両方を採用する場合のそれぞれにおいて、10回ずつ行った。それぞれの場合において、出発地点から目的地到達までに要した時間および総移動距離について、10回分の結果の平均値をTable 2に示す。

Table 2において、総移動距離はどちらもほぼ変わらないが、手法①②を組み合わせることで所要時間を大幅に短縮できている。これは、提案手法②により障害物の面から垂直に力を受けることで、目的地への到達を妨げる力が小さくなるためである。

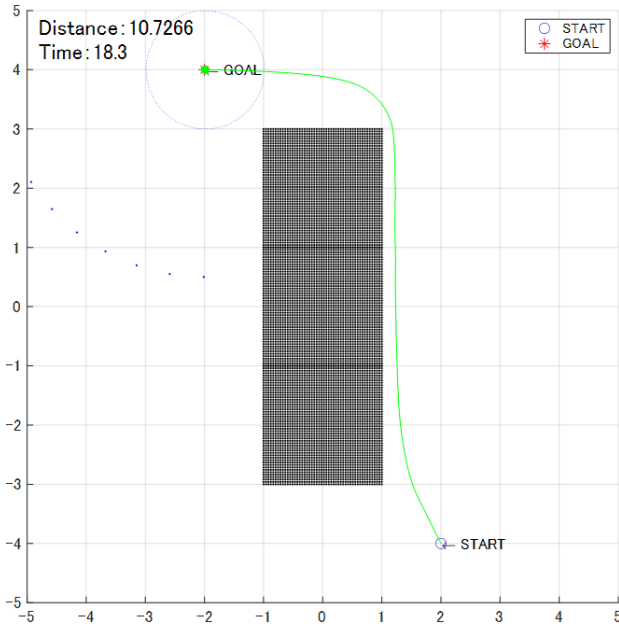


Fig. 8: Path with ①+②.

Table 2: Average time and distance over 10 simulations obtained by changing goal and obstacle positions in the configuration of Fig. 8.

Methods	Average time (s)	Average distance (m)
①	25.32	9.25
①+②	17.61	9.30

4.2 停留回避手法の検証結果

ここでは、本停留回避手法の有効性を示すため、Fig. 9 および Fig. 10 に示すような複雑な障害物配置 2 パターンについて検証する。図中の DL1, TEMP DL1 はそれぞれ停留発生地点および停留発生時の一時目的地、TEMP はそれ以降の一時目的地、水色とピンク色の直線は仮想障害物を表す。また、各シミュレーションにおける出発地点から目的地到達までに要した時間および距離をそれぞれ Table 3 と Table 4 に示す。

Fig. 9 では、停留発生時に提案手法④により右方向に一時目的地を生成することで、停留回避を実現し、目的地に到達することができている。Fig. 10 では、停留発生時に右方向に一時目的地を生成したが、一時目的地に近づいた後、右方向の検知点全てで障害物を検知し一時目的地の決定ができなくなったため、進行方向を左へと変更することで目的地到達を実現している。

しかし、現状の課題として、提案手法③では、ロボットの大きさが小さく、かつ計測点が少ない場合は、隣り合う計測点間の距離がロボットより大きくなるため、障害物に接近するまで窪みを塞ぐことができないとい

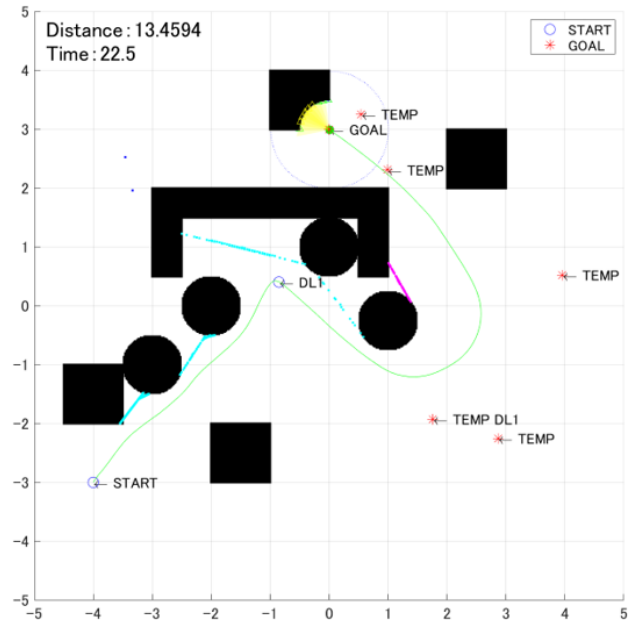


Fig. 9: Path with ①+②+③+④ in situation 1.

Table 3: Time and distance in situation 1.

Methods	Time (s)	Distance (m)
①+②	uncompleted	uncompleted
①+②+③	uncompleted	uncompleted
①+②+④	23.2	13.80
①+②+③+④	22.5	13.46

う問題点がある。

5 おわりに

本研究では、人工ポテンシャル法を用いた未知環境でのロボットナビゲーションにおいて、ロボットが効率的な障害物回避を行い、かつ停留から抜け出す手法を提案した。シミュレーション結果により、提案手法を用いることで、障害物回避における時間および距離を短縮し、停留回避を実現できることを示した。今後は、車輪型移動ロボットの運動学モデルの導入、また、動的障害物回避への拡張に取り組みたい。

参考文献

- [1] 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, 新製品・新技術特集, Vol. 51, No. 1 (2014)
- [2] B.K. Patle, Ganesh Babu L, Anish Pandey, D.R.K. Parhi, A. Jagadeesh: On path planning

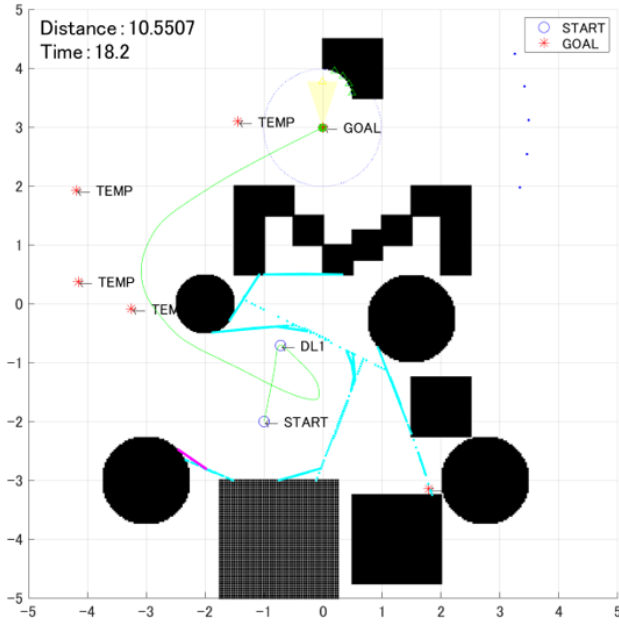


Fig. 10: Path with ①+②+③+④ in situation 2.

Table 4: Time and distance in situation 2.

Methods	Time (s)	Distance (m)
①+②	uncompleted	uncompleted
①+②+③	uncompleted	uncompleted
①+②+④	uncompleted	uncompleted
①+②+③+④	18.2	10.55

strategies for navigation of mobile robot; Defence Technology, Vol. 15, Issue 4, pp. 582–606 (2019)

- [3] Hermans, Ben: Penalty and Augmented Lagrangian Methods for Model Predictive Control; Ph.D. thesis, KU Leuven (2021)
- [4] 塩野谷潔, 新田益大, 加藤清敬: 未知の障害物を考慮した移動ロボットの動作計画; 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 970–971 (2011)
- [5] 杉山正治, 秋下貞夫: 流体力学的ポテンシャルを用いた自律移動ロボットの経路計画～十字路における障害物回避～; 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 839–844 (1998)
- [6] 植野健太郎, 小林一行: 自律移動ロボットにおけるポテンシャル法を用いた安定した経路生成法の開発; 法政大学大学院理工学・工学研究科紀要, Vol. 56 (2015)