

(様式 CS-G1)

指導教員印



年度

卒業論文

東京都市大学 情報工学部  
情報科学科

指導教員

学籍番号

概要 (600文字以上)

キーワード：

(3～5単語)

Abstract (At least 200 words)

Keywords:

(3～5words)

# 目 次

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>1 はじめに</b>                    | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景 . . . . .               | 1         |
| 1.2 研究目的 . . . . .               | 3         |
| <b>2 従来研究</b>                    | <b>4</b>  |
| 2.1 ポテンシャル場の勾配 . . . . .         | 4         |
| 2.2 制御対象のロボット . . . . .          | 5         |
| 2.3 従来研究の手法 . . . . .            | 6         |
| <b>3 提案手法</b>                    | <b>11</b> |
| 3.1 ロボットのセンサ距離の設定 . . . . .      | 11        |
| 3.2 動的障害物の加速度推定と将来位置予測 . . . . . | 12        |
| 3.3 提案手法の経路生成アルゴリズム . . . . .    | 13        |
| <b>4 シミュレーション</b>                | <b>15</b> |
| 4.1 シミュレーション設定 . . . . .         | 15        |
| 4.2 シミュレーション結果と考察 . . . . .      | 15        |
| <b>5 結論</b>                      | <b>25</b> |
| <b>参考文献</b>                      | <b>26</b> |

# 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。このようなロボットの社会実装を実現するためには，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，時空間 RRT，ポテンシャル法を用いた方法がある。大局的経路計画は，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。ただし，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度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]。次にニューラルネットワークを用いた方法では，多層パーセプトロン（MLP）などのモデルを使用し，静的および動的障害物のある環境下で，ロボットの経路と速度を効率的に生成する手法が提案されている [3]。このアプローチは，一度ネットワークの学習が完了すれば動的な環境においても少ない計算時間で経路を生成できるという利点を持つ。しかし，ニューラルネットワークの一般的な欠点として，学習に多くのデータと時間を要するという課題がある。この他にも，RRT（Rapidly-exploring Random Tree）を二次元平面から時間軸を含む空間へ拡張した時空間 RRT が提案されている [4]。これは位置だけでなく時間情報を考慮して探索を行うため，他ロボットとの衝突回避や譲り合いといった動的状況に対応した軌道生成が可能である。しかし，サンプリングベース手法の一般的な課題として探索空間が高次元になるにつれて計算量が増大し，リアルタイム処理が難しい場面も存在する。一方，ポテンシャル法 [5] では，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したが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

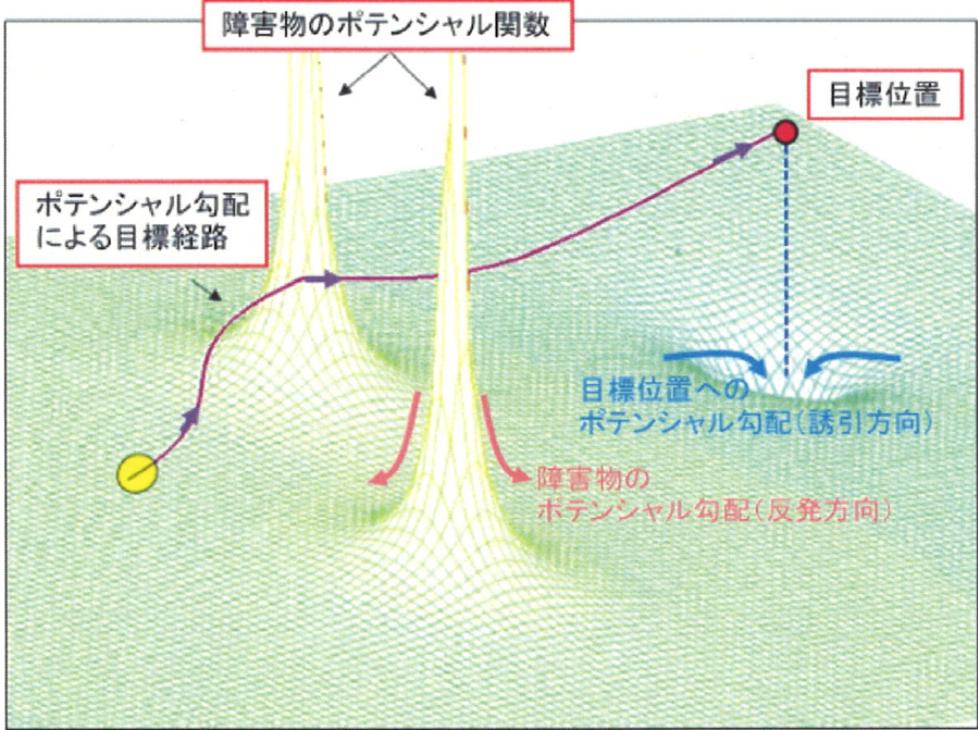


図 1: ポテンシャル場の例 [10]

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 [5]。

従来研究 [6]～[9] 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 [6] 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提案している。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 [7] 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で発生する冗長な経路を抑制するために、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提案し、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している。従来研究 [8] 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。加えて、文献[8]では壁沿い走行に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[9]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[8]の静的障害物に対する回避手法を組み合わせることによって、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、障害物が加速や減速を伴って移動する場合には障害物の速度のみを用いた仮ゴール設定では将来位置を正確に推定できない場合がある。速度情報はその時点におけるサンプリングした運動状態を表すに過ぎず、加速度による変化を考慮していない。その結果、障害物が減速して向きを変えたり、障害物が加速して接近する状況では経路が冗長になる。この誤差により、ロボットは障害物の進行方向を誤って解釈し、生成される経路が冗長になり目標地点まで効率的に移動できなくなる場合がある。

## 1.2 研究目的

本研究では、従来研究[7]を基に、ポテンシャル法に障害物の加速度推定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秒先まで予測し、それらを斥力ポテンシャル場に反映させることによって、ロボットが障害物の進行経路に侵入することを回避し、より安全かつ効率的な経路の生成を実現する。最後に従来研究[9]と通常のポテンシャル法と提案する手法を到達時間および経路長の観点から比較し、その有効性を検証する。

## 2 従来研究

### 2.1 ポテンシャル場の勾配

従来研究 [9] 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

$P_{ds}(x_r, y_r)$  引力ポテンシャル関数の重み

$P_{ob}(x_r, y_r)$  斥力ポテンシャル関数の重み

ここで、 $(x_r, y_r)$  はロボットの現時点の位置座標を表す。また、 $(x_{ob}, y_{ob})$  および  $(x_{ds}, y_{ds})$  はそれぞれ障害物と目的地の位置を表す。式 (3) の  $\omega_{ob}$  と  $\omega_{ds}$  は、いずれも正の実数として設定する重み付け係数であり、それぞれ斥力ポテンシャル関数  $P_{ob}(x_r, y_r)$  と引力ポテンシャル関数  $P_{ds}(x_r, y_r)$  に対する重みとして機能する。ただし、 $\omega_{ob}$  を必要以上に大きくすると障害物からの回避動作が過剰となり、結果として目的地へ近づきにくくなる可能性があるため、 $\omega_{ob} < \omega_{ds}$  に設定する必要がある。ロボットの進行方向はポテンシャル場の勾配ベクトルに基づいて決定され、その  $x$  方向成分および  $y$  方向成分は次式で与えられる。

## 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 制御対象のロボット

従来研究 [6, 7] 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 ( $Rb_2$ )、左斜め前 ( $Rb_1$ )、右斜め前 ( $Rb_3$ )、左 ( $Rb_4$ )、右 ( $Rb_5$ ) の合計 5 つを搭載しており、障

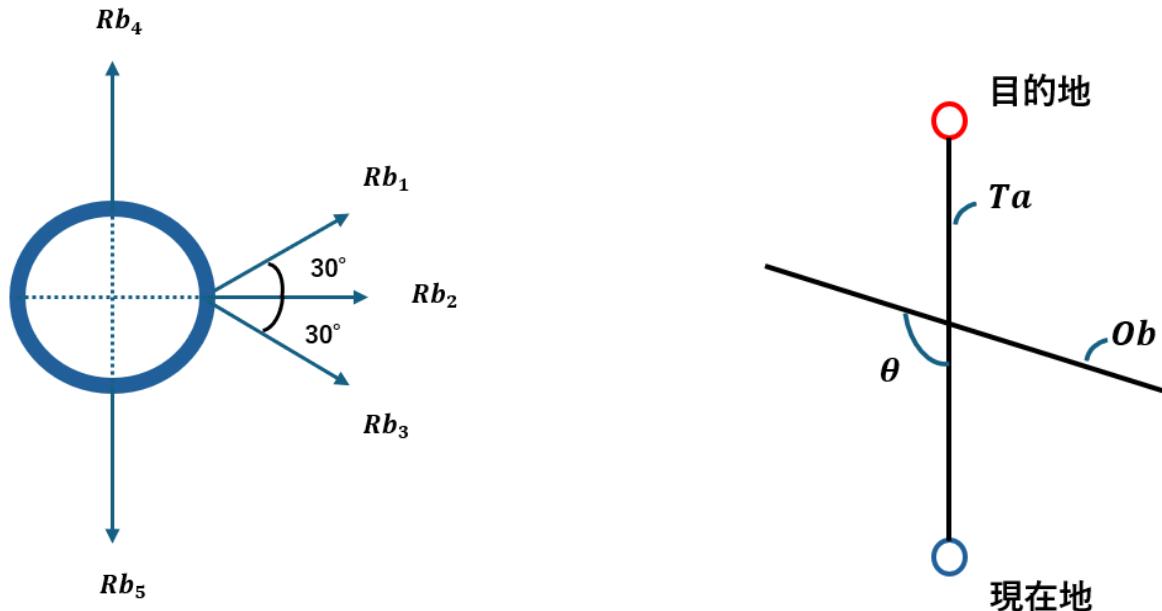


図 2: 制御対象のロボット

図 3: 予測線分

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 [9] 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。

### 2.3 従来研究の手法

#### 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  $\theta$  は、 $Ob$  の傾き  $a$  と  $Ta$  の傾き  $b$  を用いて次式で求められる。

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

## 障害物の裏側への回り込み走行

従来研究[6]においては、ロボットが壁沿い走行を実行した後に、斥力ポテンシャル場が作用することにより、障害物周辺で過度に外側へ迂回するような軌道が生成されるという課題が存在する。この問題点を解決するため、従来研究[7]では、ロボットが障害物の背後側へ回り込む動作を組み込むアプローチを採用している。その結果として、より短距離かつ効率的な経路を生成することが可能となっている。具体的には、図4に示されている通り、壁沿い走行を完了したロボットは、障害物との間隔を一定に維持した状態で、円弧を描くような軌跡で移動することにより、回り込み走行を実現している。回り込み走行が完了した後は、ロボットはポテンシャル法の原理に基づいて目的地方向への走行を開始する。しかし、回り込んだ先の位置において再度障害物が検出された際には、図4に示す処理フローに従って壁沿い走行モードへと再び切り替えを行い、この動作を繰り返すことで継続的な障害物回避を実現する。

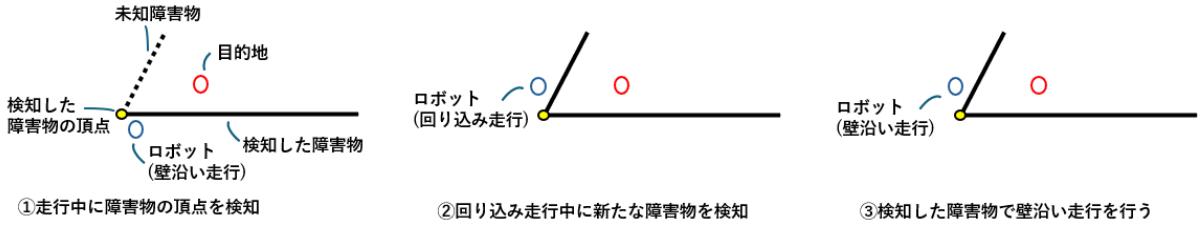


図4: 回り込み走行の際に障害物を検知した場合

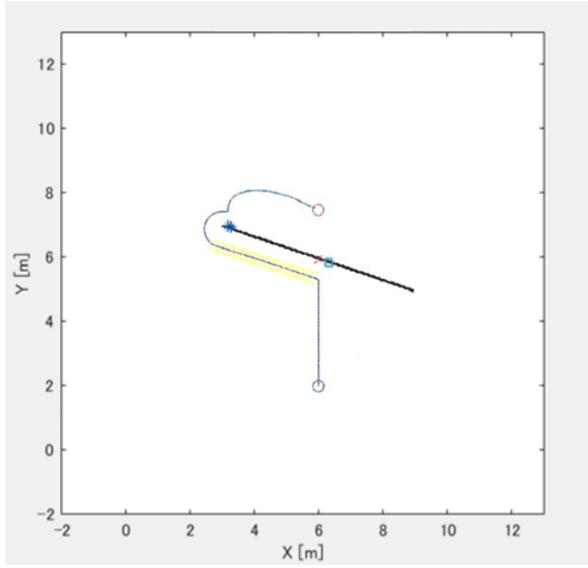


図 5: パラメータ調整前における生成経路

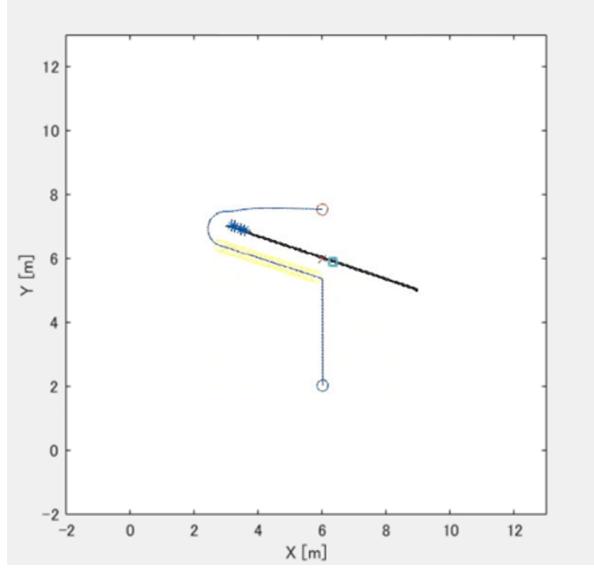


図 6: パラメータ調整後における生成経路

## 障害物に対する斥力場の再設定

壁沿い走行を用いた障害物回避手法を提案している文献 [6] では、ロボットが一度障害物を回避した後であっても、当該障害物を継続的に認識してしまう場合がある。結果として斥力ポテンシャル場が適切に更新されず、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に移動し、すでに目標地点へ進行可能な状態であるにもかかわらず、障害物からの斥力の影響を受け続けている様子が確認できる。こうした問題に対し、従来研究 [7] では、障害物の重要度を表す重みパラメータを状況に応じて変更することで、安全性を確保しつつ経路の冗長性を低減する手法が提案されている。図 5 および図 6 では、前、右斜め前、右の各センサが障害物を検知した状態を、それぞれ  $\times$ ,  $\square$ ,  $*$  の記号で表している。図 6 に示す結果から、障害物回避後における重みを適切に低減することで、より効率的な経路生成が可能となることが確認できる。ただし、重みパラメータを過度に小さく設定した場合には、斥力が十分に作用せず、障害物との衝突危険性が増大するおそれがある。したがって、経路効率の向上と安全性の両立を図るために、回避性能を維持できる範囲内で重みパラメータを調整することが重要である。

## 速度推定と動的障害物の予測

ポテンシャル法に速度推定機能を組み込むことで、動的障害物の回避手法を提案している。以下に、従来研究 [9] で採用されている速度推定アルゴリズムを示す。ここで、動的障害物を  $ob_m$  とし、 $x$  軸方向および  $y$  軸方向の速度成分をそれぞれ  $(x_v, y_v)$  と定義する。また、障害物の観測時刻  $k$  および  $k+1$  における位置座標を  $(x_k, y_k)$ ,  $(x_{k+1}, y_{k+1})$  とする。

1. センサ情報により動的障害物  $ob_m$  を検出する。
2. 検出時点における障害物の位置  $(x_k, y_k)$  を取得する。
3. 1秒後に再度観測された位置  $(x_{k+1}, y_{k+1})$  を取得する。
4. 2時刻間の位置差から、障害物の速度ベクトル  $ob_v$  を次式により算出する。

$$ob_v = (x_{k+1} - x_k, y_{k+1} - y_k) \quad (12)$$

5. 得られた速度情報を用いて、20秒後における障害物の推定位置  $ob_{m2}$  を算出する。
6. 推定された  $ob_{m2}$  をポテンシャル場に反映させる。
7. 仮ゴールを設定し、そこに向かってポテンシャル法で進行する。
8. 仮ゴールへの到達、または30秒経過後に障害物がセンサ範囲外となるまで、手順2～6を繰り返す。
9. 本来の目的地へ向けてポテンシャル法による移動を再開する。

取得した障害物の座標および速度情報を基に、100秒後における障害物の位置を推定し、その推定位置を中心として仮ゴールを配置する(図7)。ロボットの現在位置と目的地を結ぶ線分を  $T_a$ 、障害物の現在位置  $ob_m$  と推定位置  $ob_{m2}$  を結ぶ線分を  $O_p$  とし、これらのなす角を  $\theta$  とする。なす角  $\theta$  が極めて小さい場合や障害物の進行方向が直進に近い場合には障害物の進行方向に対して  $90^\circ$  回転させた方向へ仮ゴールを設定する(図8)。

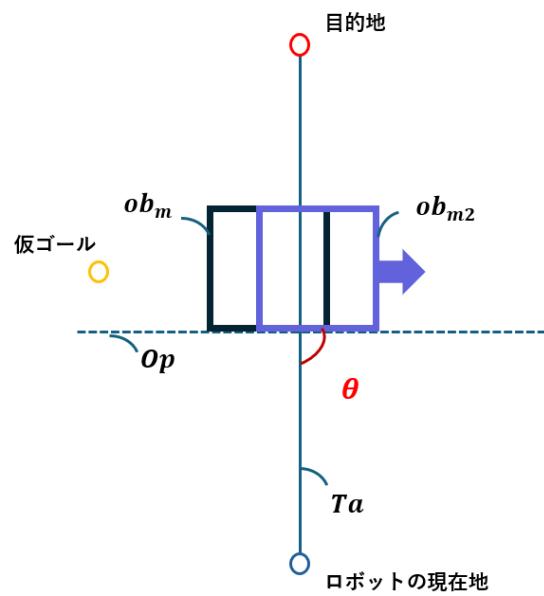


図 7: 通常の仮ゴール設定箇所

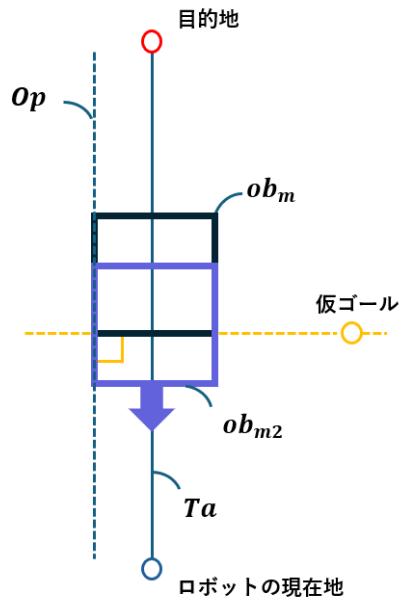


図 8:  $Ta$  と  $Op$  のなす角が 0 の場合の仮ゴールの設定箇所

### 3 提案手法

従来研究 [6]～[8] 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 [9] 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、加速度を有する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速度および加速度を推定し、その将来位置をポテンシャル場に反映することにより、加速度を伴う動的障害物に対してもスムーズで効率的な回避行動を可能とする手法を提案する。加えて、本研究の手法に従来研究 [7] の静的障害物回避アルゴリズムを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、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 ロボットのセンサ距離の設定

従来研究 [9] 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。加速する障害物は短時間で速度が大きく変化するため、200[cm]



図 9: LiDAR センサ [11]

表 1: SICK TiM150-3010300 LiDAR センサの主な仕様

| 項目          | 仕様          |
|-------------|-------------|
| スキャン周波数     | 14.5 Hz     |
| 作業エリア       | 0.05 m~10 m |
| 応答時間 (Typ.) | 70 ms       |

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。本研究ではこれらの課題を踏まえ、ロボットに搭載するセンサとしてSICK社製のレーザスキャナ TiM1xx シリーズ（型番：TiM150-3010300）を想定する。外観を図9に示し、主な仕様を表1に示す。本センサは測定範囲 0.05~10[m] を有するセンサである。このセンサの性能を踏まえ、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する。

### 3.2 動的障害物の加速度推定と将来位置予測

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から重心を算出し、その重心を当該時刻における障害物の代表位置として用いる。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。想定するレーザスキャナのスキャン周波数は 14.5 [Hz] であるが、実環境でのセンサノイズを考慮し、速度および加速度推定の安定化を目的としてサンプリング間隔を  $\Delta t = 0.1$  [s] と設定する。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、そこから算出した代表位置を次式のように定義する。

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

2. 重心位置の変化量から速度ベクトル  $\mathbf{v}$  を推定する.

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

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.

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

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、  $T$  秒先の将来位置を逐次算出する.

5. 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 提案手法の経路生成アルゴリズム

提案する経路生成アルゴリズムの処理手順を Algorithm 1 に示す. 本手法では、 ロボットが目的地へ到達するまで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. 検出された障害物に対して、 その四隅の座標から代表位置を算出し、 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 1 秒間隔で時刻  $\tau = 1 \dots T$  まで予測する. 本研究では予測秒数を  $T = 20$  と設定し、 20 秒先までの将来位置を算出する. 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 [7] 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から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、

---

**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
    if 障害物  $ob_m$  を検出したとき then
        四隅の座標から代表位置  $p_t$  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 [7] の静的障害物回避アルゴリズムを適用する
        end if
    end if
end while
```

---

最終的に目的地へ到達する。

## 4 シミュレーション

### 4.1 シミュレーション設定

加速度推定機能を組み込んだ提案手法、従来研究 [9] の速度推定機能を用いた手法、および通常のポテンシャル法の3つの手法についてシミュレーションを実施し、それぞれを比較する。本シミュレーションでは、センサで障害物を検知したとき四隅の位置情報を取得可能であると仮定する。通常のポテンシャル法では、ロボットに搭載されたセンサがその時点で検知した障害物の位置座標のみを用いてポテンシャル場を生成し、そのポテンシャル場の勾配に基づいてロボットを移動させる。シミュレーションでは、動的障害物として縦2[m]×横2[m]の大きさを有する障害物を設定し、人や移動体を模擬した移動障害物を想定する。また、ロボットの位置は青色の円、目標位置は赤色の円、ロボットの軌跡を青の実線で示す。

### 4.2 シミュレーション結果と考察

5つの異なる場面におけるシミュレーション結果を示す。各場面について、提案手法、従来研究 [9]、および通常のポテンシャル法の3手法の性能を比較する。評価指標には、目的地到達までに要した秒数(到達時間[s])およびロボットが移動した総距離(経路長[m])を用いる。また、①～④は時間経過を示している。

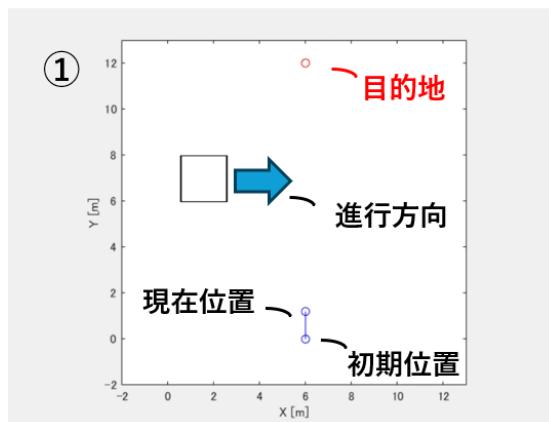


図 10: 横方向に等加速で進行する障害物の回避における初期位置

## Case 1) : 横方向に等加速で進行する障害物の回避

横方向に等加速で進行する障害物の回避シミュレーションを実施した。図 10 にその初期位置を示し、図 11 に得られた回避結果を示す。また、表 2 に各手法の到達時間および経路長の比較結果を示す。ここでは、障害物の初期速度は  $(0.035, 0.000)[\text{m/s}]$ 、加速度は  $(0.004, 0.000)[\text{m/s}^2]$  に設定した。

図 11 に示すシミュレーション結果では、いずれの手法においても動的障害物の回避自体は成功している。図 11(b) の従来研究 [9] においては、ロボットは障害物から大きく離れた経路を選択し、軌道が大きく膨らむ様子が確認できる。通常のポテンシャル法ではロボッ

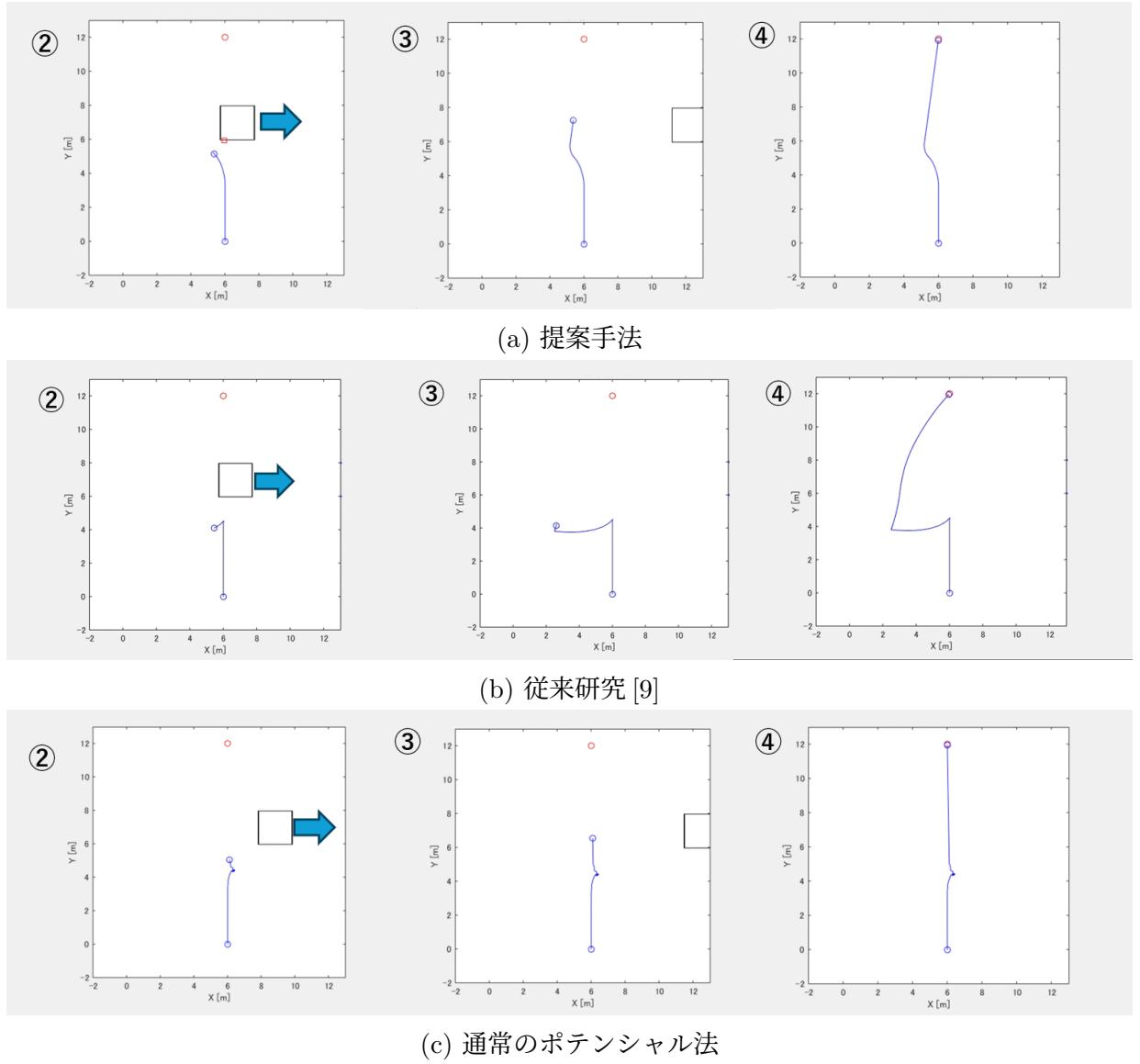


図 11: 横方向に等加速で進行する障害物の回避

表 2: 横方向に等加速で進行する障害物の回避性能比較

| 手法         | 到達時間 [s] | 経路長 [m] |
|------------|----------|---------|
| 提案手法       | 113      | 13.56   |
| 従来研究 [9]   | 144      | 17.28   |
| 通常のポテンシャル法 | 120      | 14.40   |

トが障害物の進行方向前方へ進入しようとする挙動が見られる(図 11(c)). その結果, ロボットは障害物の動きに影響され回避中に進行方向を複数回切り替える非効率な軌道を形成している. 一方, 図 11(a)に示すように, 提案手法では障害物の進行方向前方への進入を回避しつつスムーズな軌道で回避行動を行っている. 定量的な比較結果としては, 提案手法は到達時間が 113[s], 経路長が 13.56[m] となり, 従来研究 [9] と比較して到達時間が 31[s] 短縮され, 経路長も 3.72[m] 短くなった. 通常のポテンシャル法と比較しても, 到達時間が 7[s], 経路長が 0.84[m] とそれぞれ改善されている.

### Case 2) : 斜め方向に等加速で進行する障害物の回避

図 12 はシミュレーションにおける初期位置を示す. また, 図 13 は横方向に等速で進行する障害物に対する回避結果を示している. 表 3 に各手法の到達時間および経路長の比較結果を示す. ここでは, 障害物の初期速度は  $(-0.035, -0.035)[\text{m}/\text{s}]$ , 加速度は  $(-0.0030, -0.0015)[\text{m}/\text{s}^2]$  に設定した.

本シミュレーションにおいても各手法は動的障害物の回避に成功しており, その回避挙

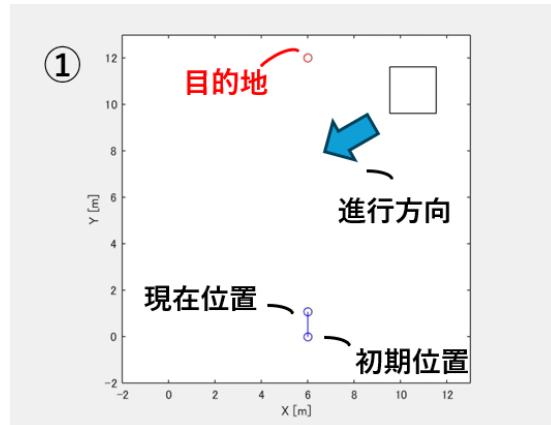
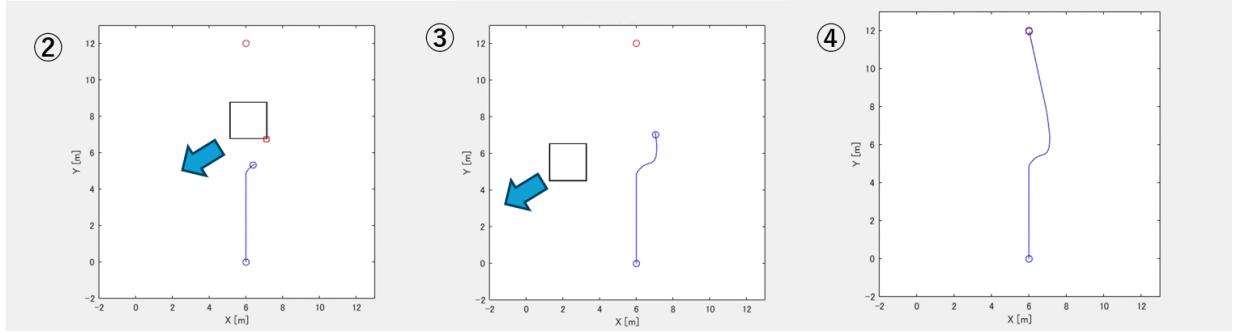
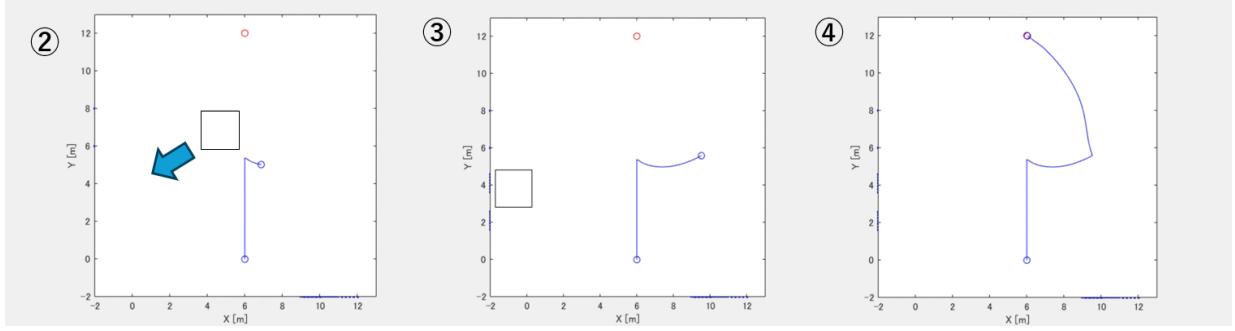


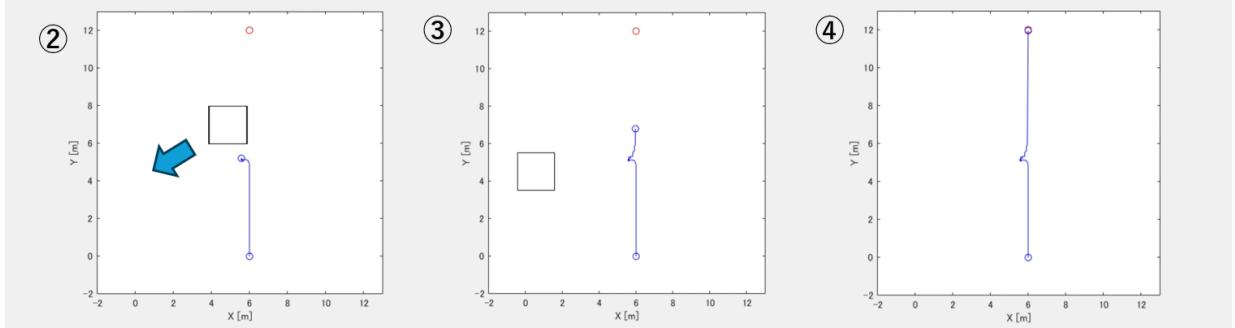
図 12: 斜め方向に等加速で進行する障害物の回避における初期位置



(a) 提案手法



(b) 従来研究 [9]



(c) 通常のポテンシャル法

図 13: 斜め方向に等加速で進行する障害物の回避

動は Case 1) と同じような結果となっている。具体的には、従来研究 [9](図 13(b))による回避軌道は障害物から大きく迂回し、冗長な経路となっている。また図 13(c)に示している通常のポテンシャル法は障害物の進行方向前方へ進入しようとする挙動が見られる。こ

表 3: 斜め方向に等加速で進行する障害物の回避性能比較

| 手法         | 到達時間 [s] | 経路長 [m] |
|------------|----------|---------|
| 提案手法       | 106      | 12.72   |
| 従来研究 [9]   | 139      | 16.68   |
| 通常のポテンシャル法 | 115      | 13.80   |

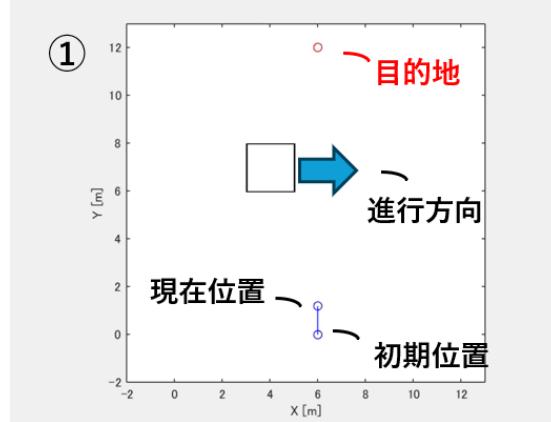


図 14: 横方向の往復移動をする障害物の回避における初期位置

れにより回避中に大きく進路変更が生じ、非効率な軌道を形成する結果となっている。一方、提案手法は障害物の進行方向前方への不用意な進入を回避し、常にスムーズで効率的な回避軌道を生成している(図 13(a))。提案手法は到達時間 106[s]、経路長 12.72[m] で目的地に到着した。従来研究 [9] に対しては、到達時間 33[s]、経路長 3.96[m] と短縮されており、通常のポテンシャル法に対しても、到達時間が 9[s]、経路長は 1.08[m] の改善を示した。

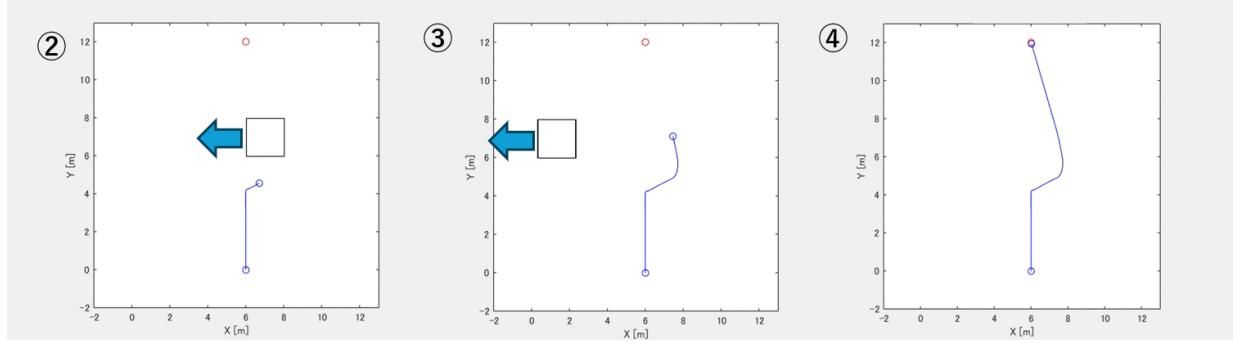
### Case 3) : 横方向の往復移動をする障害物の回避

図 14 に初期位置、図 15 に横方向の往復移動をする障害物の回避シミュレーション結果を示す。また、表 4 に各手法の到達時間および経路長の比較結果を示す。ここでは、障害物の初期速度は  $(0.35, 0.00)[\text{m}/\text{s}]$ 、加速度は  $(-0.01, 0.00)[\text{m}/\text{s}^2]$  に設定した。

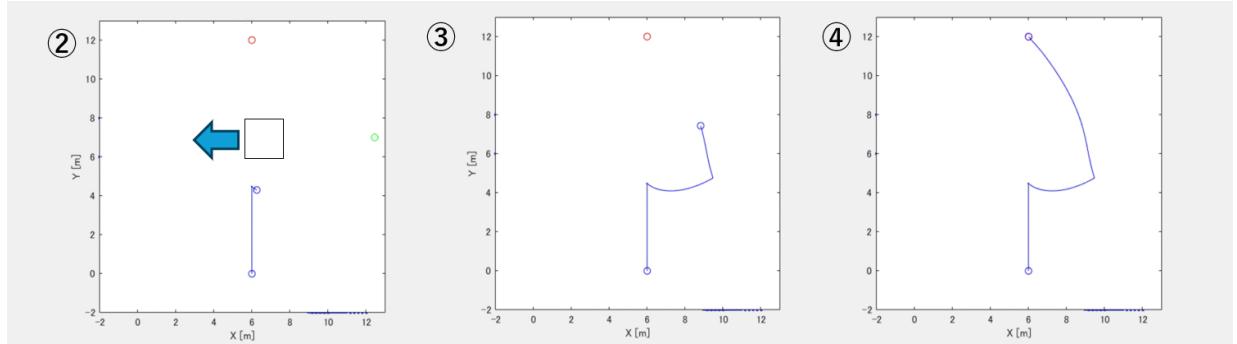
図 15 ではロボットが動的障害物をセンサで検知した時点では障害物は  $x$  方向に正の速度を有していたが、その後速度が減少して 0 となり最終的には負方向へと反転している。このような運動方向が変化する障害物に対しても、図 15(a) の提案手法は安定して回避行動を行えることが確認できる。これは加速度推定により動的障害物の将来の反転挙動を事前

表 4: 横方向の往復移動をする障害物の回避性能比較

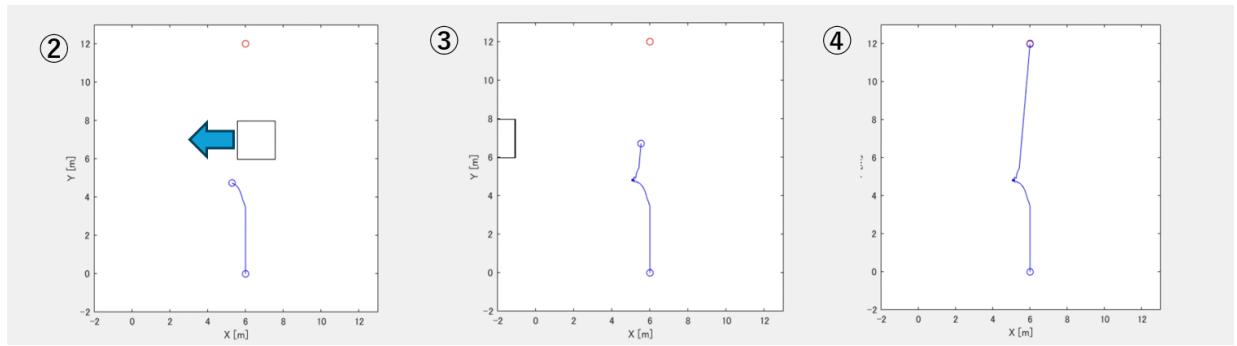
| 手法         | 到達時間 [s] | 経路長 [m] |
|------------|----------|---------|
| 提案手法       | 110      | 13.20   |
| 従来研究 [9]   | 136      | 16.32   |
| 通常のポテンシャル法 | 121      | 14.52   |



(a) 提案手法



(b) 従来研究 [9]



(c) 通常のポテンシャル法

図 15: 横方向の往復移動をする障害物の回避

に予測できることが寄与していると考えられる。また提案手法は、他手法と比較して顕著な改善を示した。従来研究 [9] に対しては、到達時間が 26[s]、経路長は 3.12[m] の短縮を実現している。さらに、通常のポテンシャル法と比較しても、到達時間が 11[s]、経路長は 1.32[m] 短く、効率的な回避が行われていることがわかる。

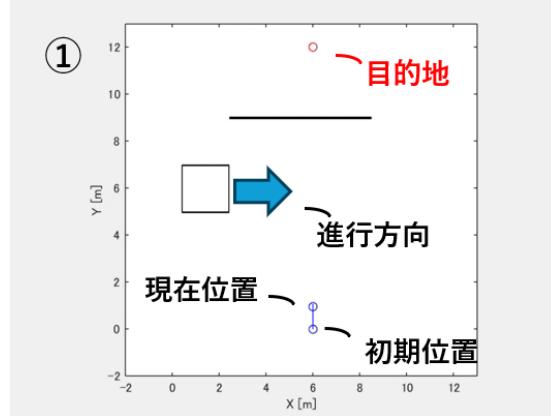


図 16: 横方向に等加速で進行する障害物と静的障害物の回避における初期位置

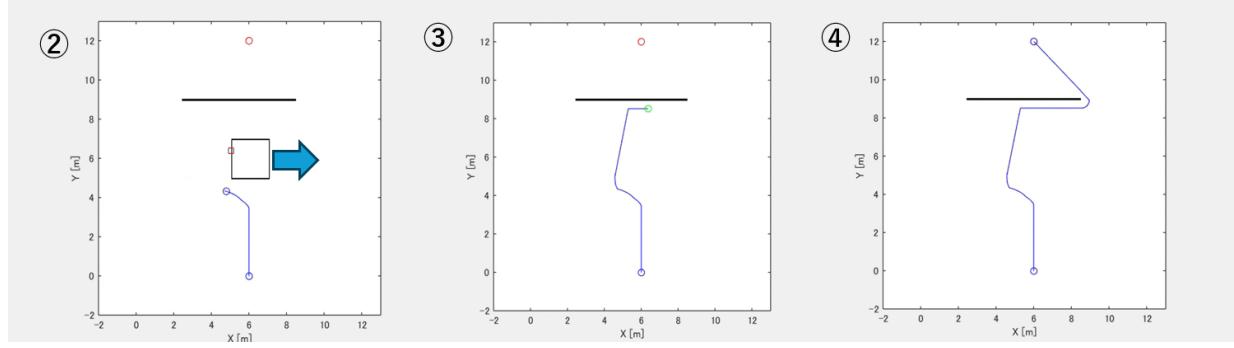
#### Case 4) : 横方向に等加速で進行する障害物と静的障害物の回避

横方向に等加速で進行する障害物と静的障害物の回避シミュレーションについて初期位置を図 16、回避挙動のシミュレーション結果を図 17 に示す。表 5 に各手法の到達時間および経路長の比較結果を示す。ここでは、動的障害物の初期速度は  $(0.035, 0.000)[\text{m}/\text{s}]$ 、加速度は  $(0.004, 0.000)[\text{m}/\text{s}^2]$  に設定した。

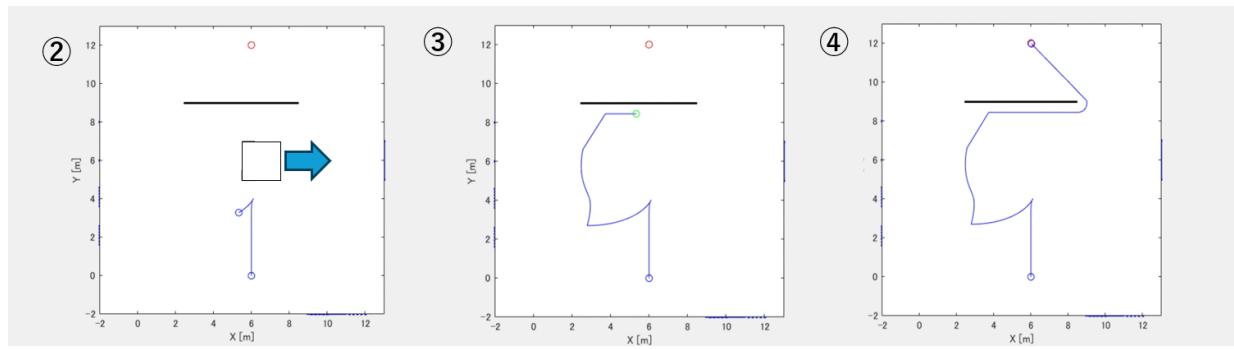
図 17(c) の通常のポテンシャル法は静的障害物である壁の影響により停留し到達不能となった。図 17(a) の提案手法は動的障害物に対して加速度推定に基づく回避を行いながら、静的障害物の壁に対しては従来研究 [7] の「壁沿い走行」へと適切に切り替え走行していることが確認できる。さらに、表 5 に示すように、提案手法は到達時間が 145[s]、経路長は 17.40[m] で目的地に到達しており、従来研究 [9] に対して到達時間が 26[s]、経路長は 3.12[m] 短縮されている。この結果は、加速度を有する動的障害物と静的障害物の壁が同時に存在する環境においても、提案手法が効率的な経路生成を実現できることを示している。

表 5: 横方向に等加速で進行する障害物と静的障害物の回避性能比較

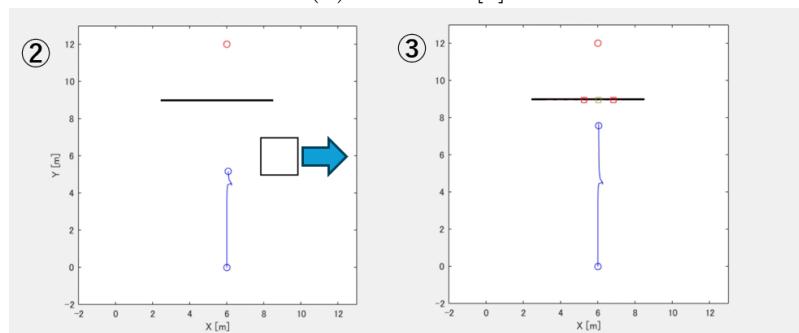
| 手法         | 到達時間 [s] | 経路長 [m] |
|------------|----------|---------|
| 提案手法       | 145      | 17.40   |
| 従来研究 [9]   | 171      | 20.52   |
| 通常のポテンシャル法 | 到達できない   | —       |



(a) 提案手法



(b) 従来研究 [9]



(c) 通常のポテンシャル法

図 17: 横方向に等加速で進行する障害物と静的障害物の回避

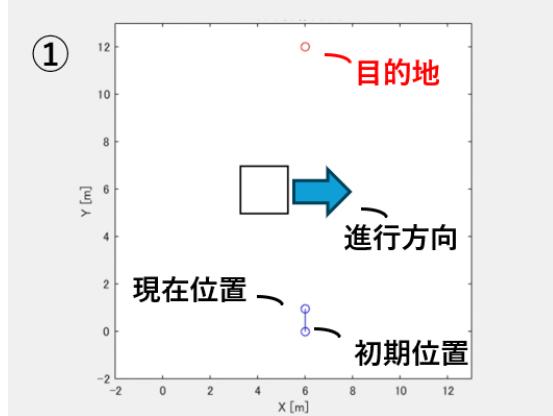


図 18: 横方向に等速で進行する障害物の回避における初期位置

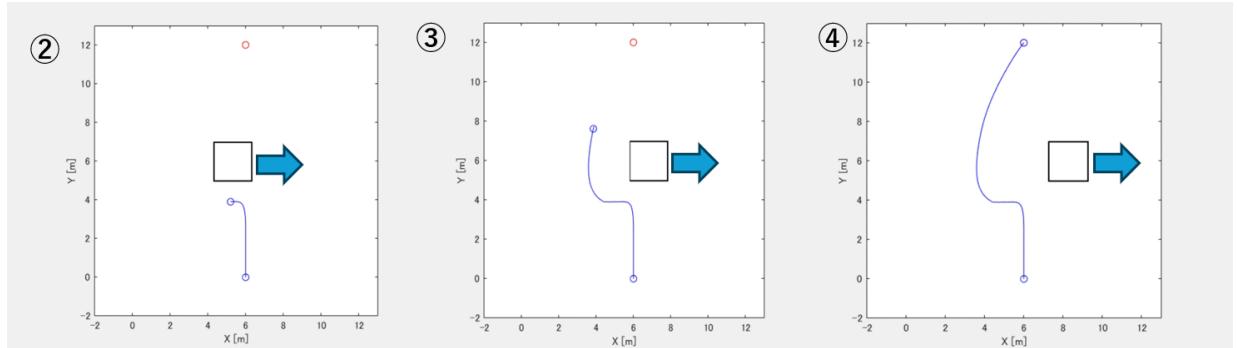
表 6: 横方向に等速で進行する障害物の回避性能比較

| 手法         | 到達時間 [s] | 経路長 [m] |
|------------|----------|---------|
| 提案手法       | 122      | 14.64   |
| 従来研究 [9]   | 133      | 15.96   |
| 通常のポテンシャル法 | 159      | 19.08   |

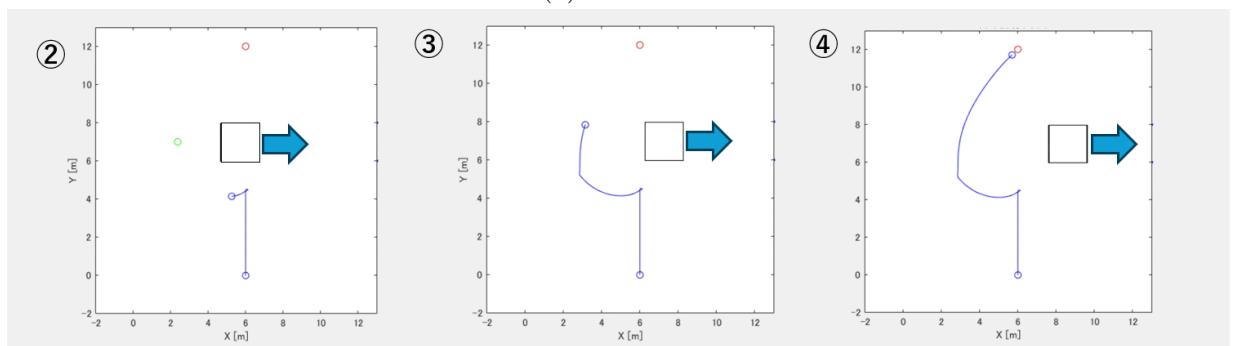
### Case 5) : 横方向に等速で進行する障害物の回避

図 18 に初期位置、図 19 に横方向に等速で進行する障害物の回避シミュレーション結果を示し表 6 に各手法の到達時間および経路長の比較結果を示す。ここでは、障害物の初期速度は  $(0.035, 0.000)[\text{m}/\text{s}]$ 、加速度は  $(0, 0)[\text{m}/\text{s}^2]$  であり、等速運動を行うものとする。

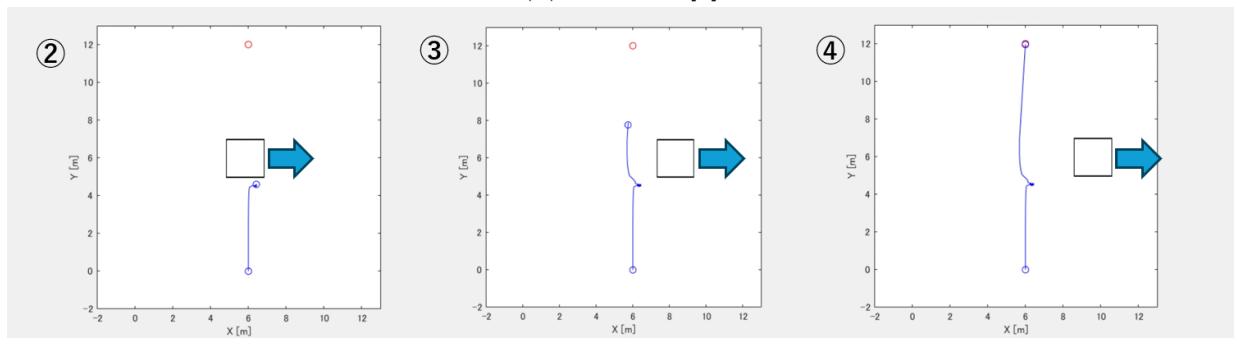
図 19(b) の従来研究 [9] では、障害物に対して十分な安全距離を保ち、かつスムーズに回避している。これに対し、図 19(c) に示している通常のポテンシャル法では障害物に極端に接近する軌道を形成している。複数回移動方向を切り替える非効率な回避行動が見られ、到達時間と経路長の増加に繋がっていると考えられる。図 19(a) の提案手法では、等速運動のような単純な動的環境においても障害物を回避し目的地へ到達している。このことから、提案手法は加速度の有無に関わらず障害物の将来位置予測を安定化させ、効率的な回避軌道を生成できていることが確認できる。また表 6 の結果から提案手法は他の手法と比較して最も短い到達時間と経路長を実現できていることがわかる。



(a) 提案手法



(b) 従来研究 [9]



(c) 通常のポテンシャル法

図 19: 横方向に等速で進行する障害物

## 5 結論

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を提案した。従来研究[9]では、動的障害物の速度情報のみを用いた回避手法を提案しているが、加速度を持つ障害物に対しては適切な回避が困難であるという課題があった。そこで本研究では、センサにより取得した障害物の位置情報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複数秒先の将来位置を予測する手法を提案した。提案手法では、予測した将来位置群を斥力ポテンシャル場に反映させることにより、ロボットが障害物の進行経路に侵入することを防ぎ、より安全かつ効率的な経路を生成することができる。シミュレーションにより、提案手法は従来研究[9]および通常のポテンシャル法よりも短い到達時間と経路長を実現し得ることを確認した。特に、運動方向と反対に加速度をもつ動的障害物に対しても有効に機能することが確認され、加速度を持つ障害物だけでなく、等速で移動する障害物に対しても効率的な回避を実現できるこを確認した。また、提案手法は動的障害物と静的障害物が同時に存在する複雑な環境下においても望ましい回避行動を選択することで、目的地へ到達することができる。

以上の結果から、加速度推定機能を組み込むことで、動的障害物の運動状態をより正確に予測でき、ロボットが余分な回避行動を取ることなく効率的な経路を選択できることが確認された。これにより、加速度を持つ動的障害物に対するポテンシャル法の適用範囲が拡大され、より実用的な自動配送ロボットの実現に貢献できると考えられる。今後の課題として、より複雑な運動パターンを持つ障害物への対応や複数の動的障害物が同時に存在する環境における性能評価、実機実験による検証などが挙げられる。

## 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, Vol. 12, No. 1, pp. 55–67, 2019.
- [4] 徳勢 直也, 坂原 洋, 宮崎 文夫, ”時空間RRTによるロボットが譲り合う軌道生成,” 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 6, pp. 696–701, 2009.
- [5] 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, Hefei, China, 2016.
- [6] 細山 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)

- [10] 瑠城 祐亮, 江口 和樹, 岩崎 聰, 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.
- [11] SICK AG, ”TiM150-3010300 レーザスキャナ 製品仕様,”SICK 社公式 Web サイト,  
[https://www.sick.com/jp/ja/catalog/products/lidar-and-radar-sensors/  
lidar-sensors/tim/tim150-3010300/p/p595144](https://www.sick.com/jp/ja/catalog/products/lidar-and-radar-sensors/lidar-sensors/tim/tim150-3010300/p/p595144).

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご指導と貴重なご助言を賜りました大屋英穂教授ならびに星義克講師に、心より感謝申し上げます。研究の方向性や内容について丁寧にご指導いただき、深い知見を得ることができました。また日々の研究活動において助言や励ましをいただいた大学院生の先輩方、および共に研究に取り組んだ自動制御研究室の皆様にも深く御礼申し上げます。議論や意見交換を通して、多くの刺激を受け、大変有意義な時間を過ごすことができました。本研究を通じて専門的知識のみならず、課題に粘り強く取り組む姿勢や研究に対する考え方を学ぶことができました。ここで得られた経験を、今後の社会生活や自己研鑽に活かしていきたいと考えております。最後になりましたが、本研究に関わり支えてくださったすべての方々に、改めて深く感謝申し上げます。

## 卒業研究日誌No. 1(4月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |     | 研究室内自主活動時間 |       | 研究室以外での自主活動時間 |        |
|------|---|----|-------------|-----|------------|-------|---------------|--------|
|      |   |    | 時間          | 内容  | 時間         | 内容    | 時間            | 内容     |
| 2025 | 4 | 1  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 2  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 3  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 4  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 5  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 6  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 7  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 8  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 9  |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 10 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 11 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 12 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 13 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 14 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 15 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 16 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 17 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 18 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 19 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 20 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 21 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 22 | 1           | 報告会 | 3          | 雑誌会準備 |               |        |
| 2025 | 4 | 23 |             |     |            |       | 4             | 雑誌会順準備 |
| 2025 | 4 | 24 |             |     |            |       | 4             | 雑誌会順準備 |
| 2025 | 4 | 25 | 1           | 雑誌会 |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 26 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 27 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 28 |             |     |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 29 | 1           | 報告会 |            |       |               |        |
| 2025 | 4 | 30 |             |     |            |       |               |        |

合計時間

3

合計時間

3

合計時間

8

総合計時間

14

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 2(5月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |        | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |       |
|------|---|----|-------------|--------|------------|----|---------------|-------|
|      |   |    | 時間          | 内容     | 時間         | 内容 | 時間            | 内容    |
| 2025 | 5 | 1  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 2  | 1           | 雑誌会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 3  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 4  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 5  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 6  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 7  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 8  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 9  |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 10 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 11 |             |        |            |    | 2             | 報告会準備 |
| 2025 | 5 | 12 |             |        |            |    | 4             | 報告会準備 |
| 2025 | 5 | 13 | 1           | 報告会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 14 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 15 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 16 | 1           | 雑誌会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 17 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 18 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 19 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 20 | 1           | 報告会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 21 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 22 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 23 | 1           | 雑誌会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 24 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 25 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 26 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 27 | 4           | 報告会、研究 |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 28 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 29 |             |        |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 30 | 1           | 雑誌会    |            |    |               |       |
| 2025 | 5 | 31 |             |        |            |    |               |       |

合計時間  
卒業研究日誌No. 1までの合計時間  
延べ合計時間

10  
3  
13

卒業研究日誌No. 1までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

卒業研究日誌No. 1までの合計時間  
延べ合計時間

6  
8  
14

卒業研究日誌No. 1までの合計時間  
延べ総合計時間

16  
14  
30

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 3(6月分)

FALSE

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |        | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |                 |
|------|---|----|-------------|--------|------------|----|---------------|-----------------|
|      |   |    | 時間          | 内容     | 時間         | 内容 | 時間            | 内容              |
| 2025 | 6 | 1  |             |        |            |    | 4             | 従来研究を読む、報告会準備   |
| 2025 | 6 | 2  |             |        |            |    | 5             | 従来研究を読む、報告会準備   |
| 2025 | 6 | 3  | 5           | 報告会、研究 |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 4  |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 5  |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 6  | 1           | 雑誌会    |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 7  |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 8  |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 9  |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 10 | 3           | 報告会、研究 |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 11 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 12 | 1           | 雑誌会    |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 13 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 14 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 15 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 16 |             |        |            |    | 4             | 雑誌会の論文を読む       |
| 2025 | 6 | 17 | 5           | 報告会、研究 |            |    | 4             | 雑誌会の論文を読む       |
| 2025 | 6 | 18 |             |        |            |    | 5             | 雑誌会の論文を読む、雑誌会準備 |
| 2025 | 6 | 19 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 20 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 21 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 22 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 23 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 24 | 4           | 報告会、研究 |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 25 |             |        |            |    | 4             | 雑誌会の論文を読む       |
| 2025 | 6 | 26 | 4           | 雑誌会、研究 |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 27 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 28 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 29 |             |        |            |    |               |                 |
| 2025 | 6 | 30 |             |        |            |    |               |                 |

合計時間  
卒業研究日誌No. 2までの合計時間  
延べ合計時間

23  
13  
36

合計時間  
卒業研究日誌No. 2までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 2までの合計時間  
延べ合計時間

26  
14  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 2までの合計時間  
延べ総合計時間

49  
30  
79

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 4(7月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |                   | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|---|----|-------------|-------------------|------------|----|---------------|----|
|      |   |    | 時間          | 内容                | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 7 | 1  | 1           | 報告会               |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 2  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 3  | 1           | 雑誌会               |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 4  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 5  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 6  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 7  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 8  |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 9  | 3           | アプリ開発についての話を聞く、研究 |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 10 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 11 | 5           | 研究                |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 12 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 13 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 14 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 15 | 4           | 報告会、研究            |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 16 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 17 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 18 | 4           | 研究(LiDARについての調査)  |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 19 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 20 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 21 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 22 | 4           | 報告会、研究            |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 23 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 24 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 25 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 26 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 27 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 28 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 29 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 30 |             |                   |            |    |               |    |
| 2025 | 7 | 31 | 4           | 研究                |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 3までの合計時間  
延べ合計時間

26  
36  
62

合計時間  
卒業研究日誌No. 3までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 3までの合計時間  
延べ合計時間

0  
40  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 3までの合計時間  
延べ総合計時間

26  
79  
105

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 5(8月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |        | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|---|----|-------------|--------|------------|----|---------------|----|
|      |   |    | 時間          | 内容     | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 8 | 1  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 2  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 3  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 4  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 5  | 3           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 6  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 7  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 8  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 9  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 10 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 11 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 12 | 4           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 13 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 14 | 6           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 15 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 16 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 17 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 18 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 19 | 4           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 20 | 6           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 21 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 22 | 4           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 23 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 24 | 10          | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 25 | 8           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 26 | 15          | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 27 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 28 | 4           | 中間発表準備 |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 29 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 30 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 8 | 31 |             |        |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 4までの合計時間  
延べ合計時間

64  
62  
126

合計時間  
卒業研究日誌No. 4までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 4までの合計時間  
延べ合計時間

0  
40  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 4までの合計時間  
延べ総合計時間

64  
105  
169

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 6(9月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |           | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|---|----|-------------|-----------|------------|----|---------------|----|
|      |   |    | 時間          | 内容        | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 9 | 1  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 2  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 3  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 4  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 5  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 6  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 7  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 8  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 9  |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 10 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 11 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 12 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 13 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 14 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 15 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 16 | 6           | 研究        |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 17 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 18 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 19 | 6           | 研究        |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 20 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 21 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 22 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 23 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 24 | 5           | 研究、ゼミ日程決め |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 25 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 26 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 27 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 28 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 29 |             |           |            |    |               |    |
| 2025 | 9 | 30 |             |           |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 5までの合計時間  
延べ合計時間

17  
126  
143

合計時間  
卒業研究日誌No. 5までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 5までの合計時間  
延べ合計時間

0  
40  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 5までの合計時間  
延べ総合計時間

17  
169  
186

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 7(10月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月  | 日  | 教員などの直接指導時間 |          | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|----|----|-------------|----------|------------|----|---------------|----|
|      |    |    | 時間          | 内容       | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 10 | 1  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 2  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 3  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 4  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 5  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 6  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 7  | 7           | 報告会、研究   |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 8  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 9  |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 10 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 11 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 12 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 13 | 5           | 研究       |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 14 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 15 | 5           | 研究、分野別ゼミ |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 16 | 5           | 研究、雑誌会   |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 17 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 18 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 19 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 20 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 21 | 6           | 分野別ゼミ    |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 22 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 23 | 6           | 研究、雑誌会   |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 24 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 25 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 26 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 27 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 28 | 7           | 研究、報告会   |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 29 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 30 |             |          |            |    |               |    |
| 2025 | 10 | 31 |             |          |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 6までの合計時間  
延べ合計時間

41  
143  
184

合計時間  
卒業研究日誌No. 6までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 6までの合計時間  
延べ合計時間

0  
40  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 6までの合計時間  
延べ総合計時間

41  
186  
227

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 8(11月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月  | 日  | 教員などの直接指導時間 |        | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|----|----|-------------|--------|------------|----|---------------|----|
|      |    |    | 時間          | 内容     | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 11 | 1  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 2  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 3  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 4  | 8           | 報告会、研究 |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 5  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 6  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 7  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 8  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 9  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 10 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 11 | 8           | 報告会、研究 |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 12 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 13 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 14 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 15 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 16 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 17 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 18 | 6           | 研究     |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 19 | 7           | 研究     |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 20 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 21 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 22 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 23 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 24 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 25 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 26 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 27 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 28 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 29 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 11 | 30 |             |        |            |    |               |    |

合計時間

29  
184  
213

合計時間

0  
3  
3

合計時間

0  
40  
40

総合計時間

29  
227  
256卒業研究日誌No. 7までの合計時間  
延べ合計時間卒業研究日誌No. 7までの合計時間  
延べ合計時間卒業研究日誌No. 7までの合計時間  
延べ合計時間

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 9(12月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月  | 日  | 教員などの直接指導時間 |        | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|----|----|-------------|--------|------------|----|---------------|----|
|      |    |    | 時間          | 内容     | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2025 | 12 | 1  | 7           | 報告会、卒論 |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 2  | 7           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 3  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 4  | 7           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 5  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 6  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 7  |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 8  | 7           | 報告会、卒論 |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 9  | 7           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 10 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 11 | 7           | 報告会、卒論 |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 12 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 13 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 14 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 15 | 7           | 報告会、卒論 |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 16 | 7           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 17 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 18 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 19 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 20 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 21 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 22 | 7           | 報告会、卒論 |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 23 | 8           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 24 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 25 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 26 | 7           | 卒論     |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 27 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 28 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 29 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 30 |             |        |            |    |               |    |
| 2025 | 12 | 31 |             |        |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 8までの合計時間  
延べ合計時間

78  
213  
291

合計時間  
卒業研究日誌No. 8までの合計時間  
延べ合計時間

0  
3  
3

合計時間  
卒業研究日誌No. 8までの合計時間  
延べ合計時間

0  
40  
40

総合計時間  
卒業研究日誌No. 8までの合計時間  
延べ総合計時間

78  
256  
334

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 10(1月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |    | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|---|----|-------------|----|------------|----|---------------|----|
|      |   |    | 時間          | 内容 | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2026 | 1 | 1  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 2  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 3  | 7           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 4  | 4           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 5  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 6  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 7  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 8  | 8           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 9  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 10 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 11 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 12 | 7           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 13 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 14 | 7           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 15 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 16 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 17 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 18 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 19 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 20 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 21 | 7           | 卒論 |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 22 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 23 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 24 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 25 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 26 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 27 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 28 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 29 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 30 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 1 | 31 |             |    |            |    |               |    |

合計時間  
卒業研究日誌No. 9までの合計時間  
延べ合計時間

|     |
|-----|
| 40  |
| 291 |
| 331 |

合計時間  
卒業研究日誌No. 9までの合計時間  
延べ合計時間

|   |
|---|
| 0 |
| 3 |
| 3 |

合計時間  
卒業研究日誌No. 9までの合計時間  
延べ合計時間

|    |
|----|
| 0  |
| 40 |
| 40 |

総合計時間  
卒業研究日誌No. 9までの合計時間  
延べ総合計時間

|     |
|-----|
| 40  |
| 334 |
| 374 |

指導教員名

印

## 卒業研究日誌No. 11(2月分)

学籍番号 2221103

氏名 矢口雄大

| 年    | 月 | 日  | 教員などの直接指導時間 |    | 研究室内自主活動時間 |    | 研究室以外での自主活動時間 |    |
|------|---|----|-------------|----|------------|----|---------------|----|
|      |   |    | 時間          | 内容 | 時間         | 内容 | 時間            | 内容 |
| 2026 | 2 | 1  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 2  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 3  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 4  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 5  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 6  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 7  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 8  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 9  |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 10 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 11 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 12 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 13 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 14 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 15 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 16 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 17 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 18 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 19 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 20 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 21 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 22 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 23 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 24 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 25 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 26 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 27 |             |    |            |    |               |    |
| 2026 | 2 | 28 |             |    |            |    |               |    |

合計時間

卒業研究日誌No. 10までの合計時間  
延べ合計時間0  
331  
331

合計時間

卒業研究日誌No. 10までの合計時間  
延べ合計時間0  
3  
3

合計時間

卒業研究日誌No. 10までの合計時間  
延べ合計時間0  
40  
40

総合計時間

卒業研究日誌No. 10までの合計時間  
延べ総合計時間0  
374  
374

指導教員名

印