

歩行者とのすれ違い環境下における 二輪差動駆動型ロボットの行動意図表示装置の開発

DEVELOPMENT OF AN INDICATION DEVICE FOR THE ACTION INTENTION OF A TWO-WHEELED
DIFFERENTIAL DRIVE ROBOT IN AN ENVIRONMENT WHERE IT PASSES BY PEDESTRIANS

山本理矩

Riku YAMAMOTO

指導教員 小林一行 教授

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

The two-wheel differential drive type is widely used in mobile robots, which can efficiently perform accurate speed adjustment and quick course changes through the rotational difference between the two wheels on either side. It is difficult to guess how such a mobile robot will move from its appearance. Therefore, they may cause collisions with pedestrians when traveling in urban areas in the future. In this paper, we propose the development of a new device for indication of the mobile robot's intention to action for passing pedestrians. RGB LED strip lights were employed as the action intention indicator. By emitting light from the RGB LED strip lights mounted around the vehicle body, the mobile robot indicates its action to passing pedestrians. In order to determine an effective method of indicating the action to passing pedestrians, we conducted a two-stage evaluation in a scenario in which the vehicle was passing a pedestrian. In the first stage, we evaluated the validity of the system by conducting a reaction time and action comprehension experiment on 12 subjects. In the second stage, we evaluated the power consumption of the action intention indicator device, and finally determined the proposed action intention indicator method for the mobile robot.

Key Words : *intention indicator, mobile robot, RGB LED strip light*

1. はじめに

(1) 研究背景

近年、配送ロボットを用いた公道での実証実験[1]や、飲食店での配膳ロボットの活躍[2]などにより、人間との共存社会実現に向けて移動ロボットはわれわれの日常生活の場に普及されつつある。移動ロボットには、車いすと同様の機構である、二輪差動駆動型が広く採用されている。二輪差動駆動型は、左右2つの車輪の回転差で正確な速度調節や素早い進路変更を効率的に行なうことができる。また、ハンドルを必要としないシンプルな構造であり、急な方向転換やその場での回転が可能になる。しかし、今後の都市部における移動ロボットと人間が共存する環境においては、これらの特徴により、人間が移動ロボットの行動を予測できず衝突を引き起こす危険性がある。

たとえば、人々が行き交う環境下で相手とすれ違う際、われわれは対向してくる相手の顔の表情や視線の動き、体の姿勢などのキネシクス[3]のさまざまな要素から相手

の行動を推測し、自分の行動を決定している。また、公道を走行する自動車やバイクの場合、右左折の方向を指す方向指示器、ブレーキランプ、ハザードランプ等のランプ類の灯火が義務付けられている。そのため他の車両や歩行者へ、車両の意図を明確に示すことができる。しかし、対向する相手が移動ロボットの場合、交通ルールや行動伝達方法が定められていない現在、移動ロボットの行動を外見から予測することは困難である。つまり、移動ロボットが対向する人間に対して安全性を担保するためには、人間に受け入れられるような行動意図を表示する必要がある。

そこで本論文では、すれ違う歩行者に対する、移動ロボットの新たな行動意図表示装置の開発を提案する。移動ロボットは、車体の周りに取り付けられたRGB LEDストリップライトを発光させることで、すれ違う歩行者へ行動表示を行なう。歩行者とのすれ違いシーンは、日常の無数のすれ違いや交差に対応させるために、8つのすれ違い

シナリオを設定した。すれ違いシナリオにおいて反応時間・動作理解度取得実験を行なったのち、行動意図表示装置の消費電力測定値による評価を行なうことで、提案手法の有効性を確認した。

(2) 関連研究

移動ロボットの行動意図の表示方法は、これまで多くの研究者が研究・実証しており、関連する研究がある[4-14]。初期の研究では、松丸らによる[4-6]がある。松丸らは、複数の表示方法(ランプ、吹き出し、光線、眼球表現、プロジェクタ)を検討し、移動ロボットの行動表示として有効な表示タイミングと表示方法を提案した[4-6]。また、Wengefeldらは、計画した移動ロボットの走行軌跡を地面に投影するレーザー投影装置を開発し、システムに対する人間からの印象を調査した[7]。一方で、LEDの発光デザインに焦点を当てた行動意図表示方法も検討されてきた[8-10]。Szafirらは、飛行ロボットの飛行方向を伝えるために、4つの信号デザイン(blinker, thruster, beacon, gaze)を設計した[8]。一方、Songらは、自律走行するロボット掃除機の意図を伝えるために、目線信号に焦点を当てたデザインを設計した[9]。これらに対し、筆者らはLEDの色と発光デザインを組み合わせた行動意図表示装置を開発した[10]。[4-10]に共通しているのは、移動ロボットの行動意図表示を行なう場面は想定されておらず、移動ロボットの行動意図表示システム自体の評価に焦点が当てられていることである。つまり、移動ロボットと人間のインタラクションの側面には注意が向けられていない。そこで、移動ロボットと人間のインタラクションの側面から行動意図表示方法を評価した研究が行われてきた[11-14]。Shresthaらは、移動ロボットと歩行者がすれ違う3つの異なるシナリオ(正面、鈍角、直交)において、ターンインジケータ、ディスプレイインジケータ、およびそれらの音との組み合わせによる方向意図伝達方法を提案した[11]。三河らは、正面から対向してくる歩行者に対して、3次元CG顔モデルを用いた動作予告方法を提案した[12-13]。またCheらは、移動ロボットと人間が直交するシナリオにおいて、移動ロボットの動作による暗黙的コミュニケーションとウェアラブルデバイスを用いた明示的コミュニケーションを組み合わせた意図伝達方法を提案した[14]。しかし、[11-14]のすれ違いシナリオでは、移動ロボットと人間のすれ違う角度が鋭角の場合(移動ロボットを後方から追い越す状況)においては考慮されていない。また、先行研究の多くは、移動ロボットの行動意図表示を移動ロボットの前方に向けて行なうように設計しており、移動ロボットの後方から行動意図を読み取ることは困難である。加えて、行動意図表示システムの消費電力について評価を行なっている研究は少ない。

本研究が先行研究と異なっている点は、以下3点である。

1. 移動ロボットと人間が鋭角にすれ違うシナリオを含む、全方向でのすれ違いシナリオを考慮している点

2. 移動ロボットの行動意図表示を全方向から確認できるように設計している点

3. 反応速度、動作理解度、消費電力の3つの側面から行動意図表示システムの評価を行なっている点

本研究で設定した8つのすれ違いシナリオ(0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, 180°)は、移動ロボットのナビゲーション中のさまざまなすれ違いを再現している。そのため、提案した行動意図表示システムの有効性を効率的に評価することができる。

(3) 研究の目的と目標

本研究の目的は、移動ロボットと人間の共存する環境において、移動ロボットと人間の予期せぬ衝突を回避することである。

この目的の中で、本研究の目標は、すれ違う歩行者に対する移動ロボットの行動意図表示システムの開発である。

2. 提案手法に用いる移動ロボットの構成

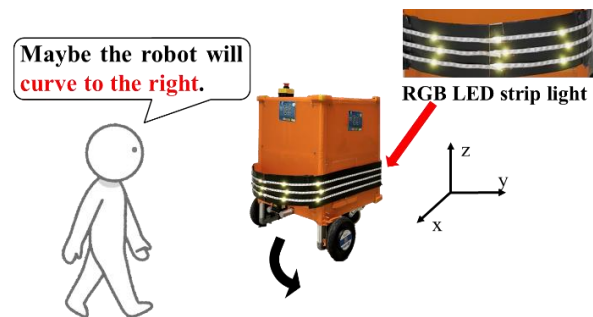


Fig.1 Configuration of mobile robot with LED

Fig. 1に、移動ロボットとRGB LEDストリップライトを用いた行動意図表示装置の構成を示す。移動ロボットの行動意図を周囲に知らせるために、表示装置は移動ロボットの車体の周りに設置した。

3. 本研究における仮定と問題

(1) 本研究における仮定

以下3つの仮定を前提に、本研究の目標であるすれ違う歩行者に対する移動ロボットの行動意図表示システムを提案する。

(A1) 行動表示は、歩行者とすれ違う(交差する)際の右左折時のみ行なうものとする。

(A2) 移動ロボットは、1人の歩行者の前方 $\pm 90^\circ$ 以内ですれ違うものとする。

(A3) 移動ロボットの速度は一定とし、表示(伝達)する情報は移動ロボットの移動方向のみとする。

(A1)は、すれ違う際にわれわれ歩行者側は、すれ違う相手が左右どちらに曲がるのかの情報さえ分かれば衝突を回避できると考えるため設けた。(A2)は、移動ロボットの交通ルールが定められていない現在の状況では、移動ロボットの行動伝達可能は範囲に限界があるため設

けた。(A3)は、人間は移動ロボットの特性や先験的な常識を持っていないため、複数の情報を表示(伝達)することで混乱を招く可能性があるため設けた。

(2) 本研究における問題

3.1 節の本研究における仮定を前提に、本システムを提案するうえで解決すべき問題を以下に示す。

(P1) すれ違う歩行者に対する行動表示をどのように行なうか。

(P2) 移動ロボットと歩行者のすれ違い時のインタラクションをどのように評価するか。

4. 提案する行動意図表示方法

本研究では、移動ロボットに搭載された RGB LED ストリップライトを発光させることで、すれ違う歩行者に対して行動表示を行なう。そこで、行動表示を行なう際の LED の発光デザインを新たに 4 つ設計した。設計した行動意図表示装置の発光デザインを Fig. 2 に示す。

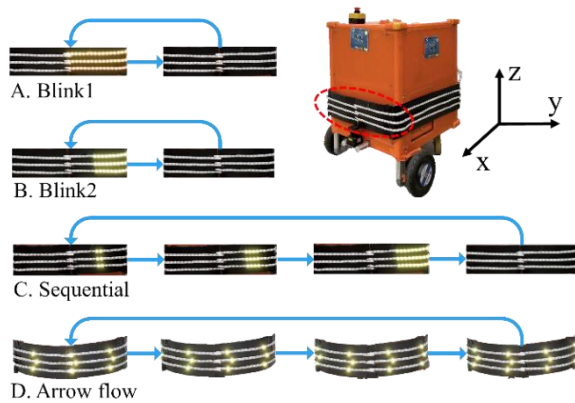


Fig.2 Designed light-emitting design

A. Blink 1, B. Blink 2, C. Sequential の 3 つのデザインは、自動車の方向指示器に採用されている発光デザインである。これは社会規範にもとづく、人間の経験などから得られる基本的な発光デザインであり、点滅周波数は視認性を考慮して 2.0 Hz に設定した[15-16]。D. Arrow flow のデザインは、矢印の流れによる発光デザインであり、視覚的に移動ロボットの行動を表現している発光デザインである。また、すべての発光デザインにおける LED の発光色には、移動ロボットのカーブを意味する色として有効な黄色 (RGB 値:255, 255, 0) を採用した[10]。

各発光デザインにおける行動意図表示装置の 4 方向からの視点と、点滅時間の比を可視化したものを Fig. 3-9 に示し、各発光デザインについて説明する。

A. Blink 1

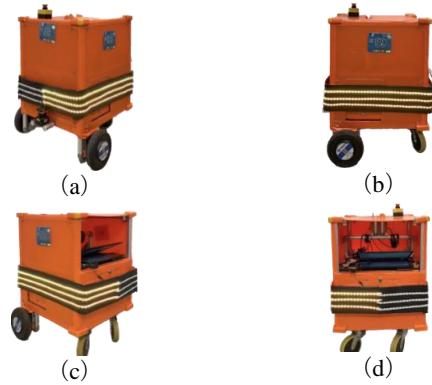


Fig. 3 Viewpoints from four directions of "Blink 1"

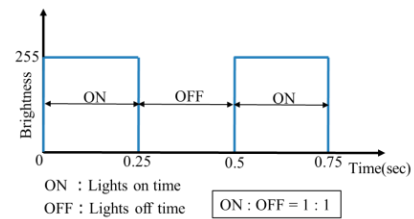


Fig. 4 Blinking time details of "Blink 1"

Fig. 3 に Blink1 の発光デザインの 5 方向からの視点、Fig. 4 に Blink1 の点滅時間の詳細を示す。このデザインは、自動車の方向指示器に採用されている基本的な点滅デザインであり、移動ロボットが曲がる方向の LED すべてが点滅する。自動車の方向指示器に出会う機会が多いため、直感的に理解できる利点がある。

B. Blink 2

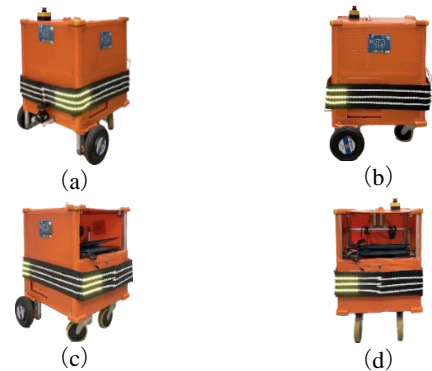


Fig. 5 Viewpoints from four directions of "Blink 2"

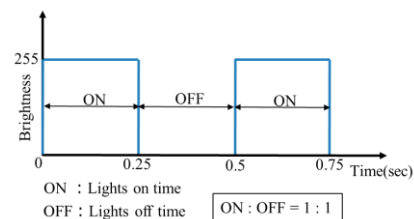


Fig. 6 Blinking time details of "Blink 2"

Fig. 5 に Blink2 の発光デザインの 5 方向からの視点、Fig. 6 に Blink2 の点滅時間の詳細を示す。このデザインも A. Blink1 と同様に、自動車の方向指示器に採用されている基本的な点滅パターンである。A. Blink1 に比べ点滅範囲が狭く、誘目性は劣るが、A. Blink1 よりも低消費電

力の設計となっている。

C. Sequential

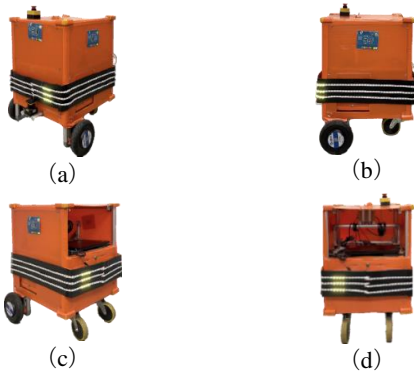


Fig. 7 Viewpoints from four directions of “Sequential”

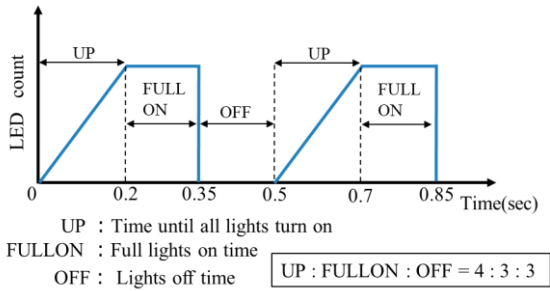


Fig. 8 Blinking time details of “Sequential”

Fig. 7 に Sequential の発光デザインの 5 方向からの視点, Fig. 8 に Sequential の点滅時間の詳細を示す. このデザインも A. Blink1, B. Blink2 と同様に, 自動車の方向指示器に採用されている基本的な点滅パターンである. 移動ロボットが曲がる方向に流れるように点滅することで, 移動ロボットの方向をより強調した設計となっている.

D. Arrow flow

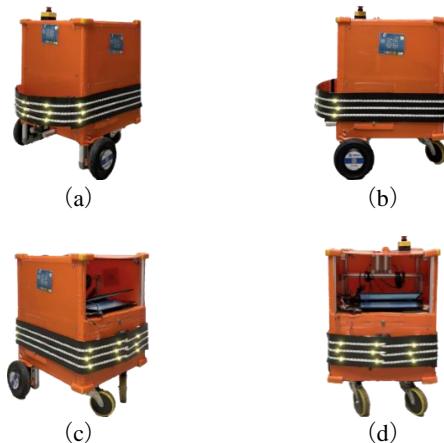


Fig. 9 Viewpoints from four directions of “Arrow flow”

Fig. 9 に Blink1 の発光デザインの 5 方向からの視点を示す. このデザインは, 移動ロボットが曲がる方向を矢印の流れにより表現した, 視覚的なデザイン設計となっている.

これら 4 つの発光デザインの中から, すれ違う歩行者への行動表示として有効な表示方法を検討する.

5. 実験

提案した行動意図表示の発光デザインを決定するために, 2 段階の評価を行なった. 第 1 段階では, 8 つのすれ違いシナリオにおいて, 移動ロボットの行動を正しく読み取ることができているかの反応時間・動作理解度取得実験を行なう. 第 2 段階では, 第 1 段階の結果と消費電力推定値を用いて, 荷重平均評価値を算出する. この 2 段階を踏むことで, すれ違う歩行者に対する移動ロボットの行動意図表示方法を選定する.

(1) すれ違いシナリオ

本研究では, 移動ロボットと人間のすれ違いシーンを想定して, 移動ロボットと人間がすれ違う角度が $\pm 90^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 135^\circ$, 0° , 180° の計 8 つのすれ違いシナリオを設定した[11]. Fig. 10 に, すれ違いシナリオの詳細を示す.

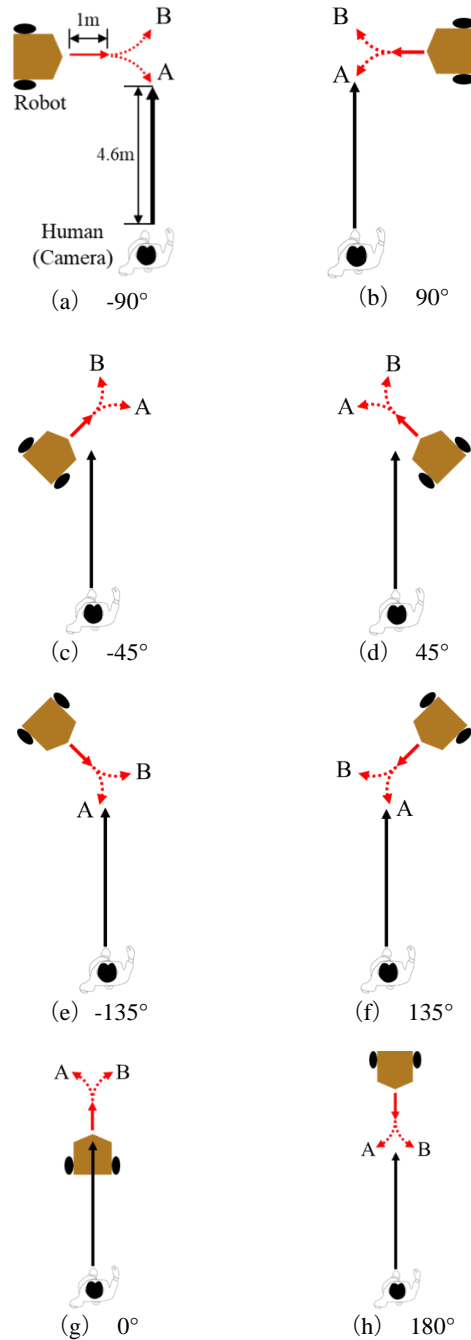


Fig. 10 cross path scenario

移動ロボットは、赤い実線の矢印を 0.3 m/s で 1m 進んだ後、左右どちらかの点線の矢印の方向へ曲がる。人間は黒い実線の矢印を 1.37 m/s[17]で 4.6m 進みながら、移動ロボットの行動を読み取る。また、本実験では、より多くの実験協力者を集めるために、シナリオ上の人間をカメラに置き換えて実験を行なう。その際、カメラの高さは、日本人男女 20 歳～29 歳の平均身長[18]を考慮し、165 cm に設定した。

(2) 反応時間・動作理解度取得実験

5.1 節のすれ違いシナリオにおいて、移動ロボットの行動を正しく理解できているかどうかを確認するため、移動ロボットの反応時間・動作理解度取得実験を行なった。Fig. 11 に反応時間・動作理解度取得実験時の様子を示す。



Fig. 11 Situation of the experiment

実験は 20 代の男女 12 名を対象に実施した。実験では、提案した行動意図表示装置がない場合とある場合で、走行する移動ロボットの動画を見たときに、曲がる方向を理解・予測するまでの反応時間と正答率を測定した。

移動ロボットは、曲がる 1.5 秒前[4]に、行動意図表示装置による行動表示を行なう。被験者は、歩行者目線での移動ロボットの曲がる方向を、スティックにより入力した。実験動画は、行動意図表示装置の有無 (5 種類) に対して 8 つのすれ違いシナリオをランダムで提示した。また、シナリオの角度によっては、行動意図表示装置の見え方が左右対称になるシナリオの組み合わせがある (たとえば、Fig. 10 の 90°シナリオ A と -90°シナリオの A の場合など)。これにより、すべてのシナリオで左右両方の行動表示を行なうと、被験者が表示に慣れてしまい、正確な測定結果を得られない恐れがある。そこで、試行回数の多さによる被験者の慣れを防ぐために、行動意図表示装置の見え方が左右対称となるシナリオの組み合わせは、どちらか一方のシナリオのみ (0°と 180°シナリオにおいては、それぞれ A, B のどちらか一方のみ) を被験者に提示し、全試行回数は 40 回とした。

行動意図表示装置がない場合とある場合の、各すれ違いシナリオにおける全被験者の平均反応時間と標準偏差を Fig. 12 に、全すれ違いシナリオにおける全被験者の平均反応時間と標準偏差を Fig. 13 に示す。また、各すれ違いシナリオにおける全被験者の平均正答率を Fig. 14 に、

全すれ違いシナリオにおける全被験者の平均正答率を Fig. 15 に示す。

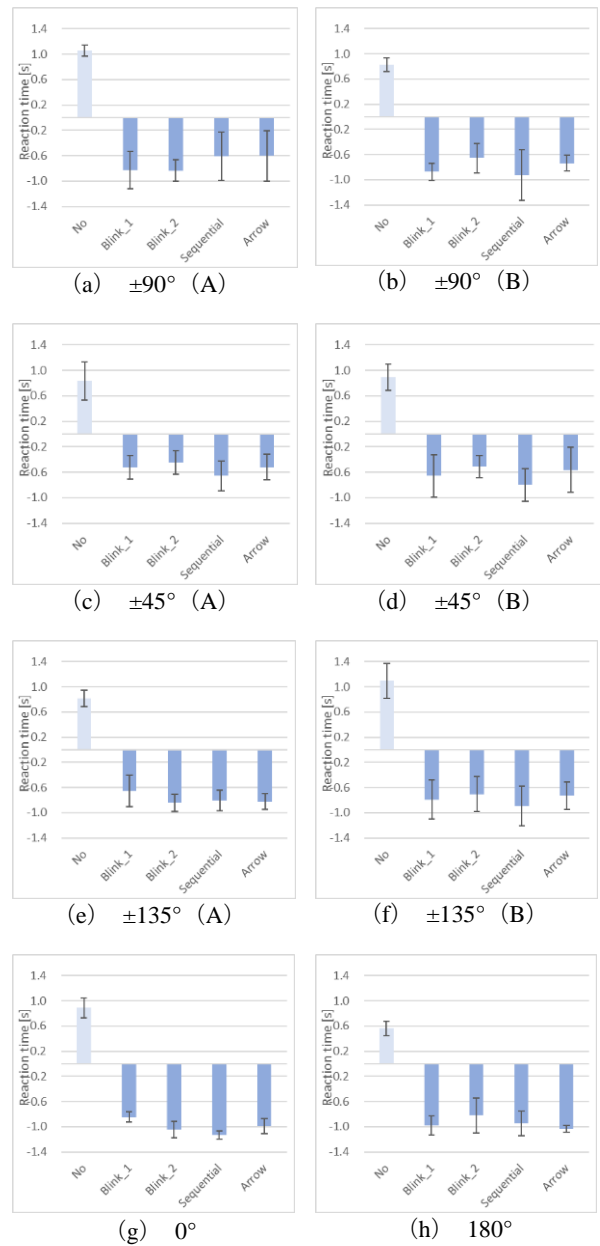


Fig. 12 Average reaction time and standard deviation of each scenario

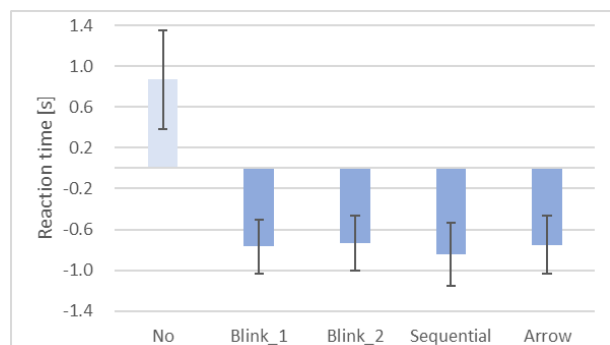


Fig. 13 Average reaction time and standard deviation of all scenarios

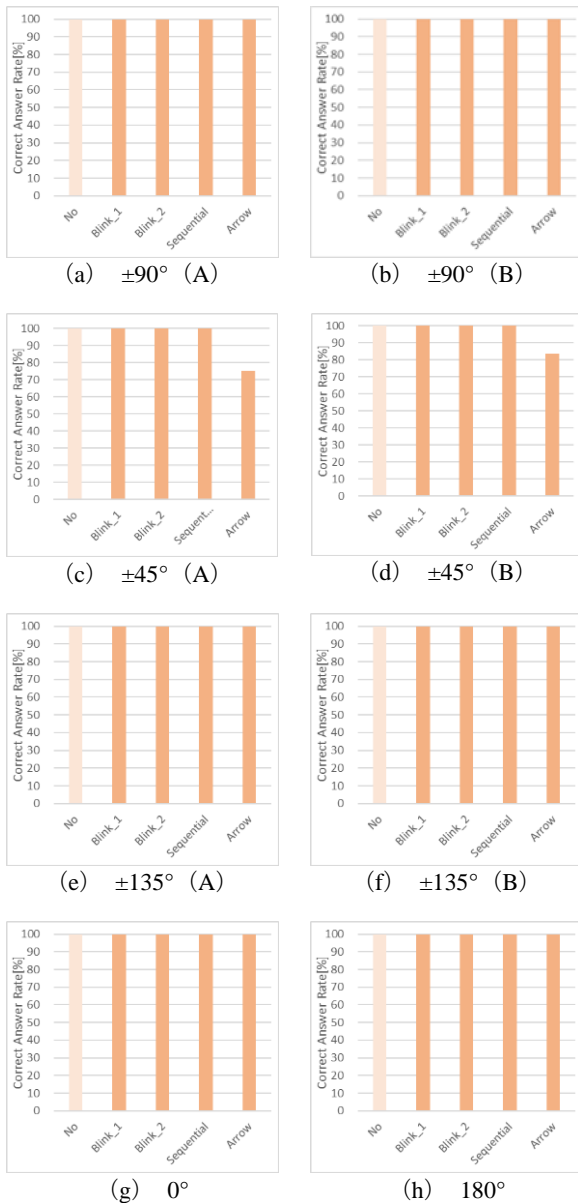


Fig. 14 Average correct answer rate of each scenario

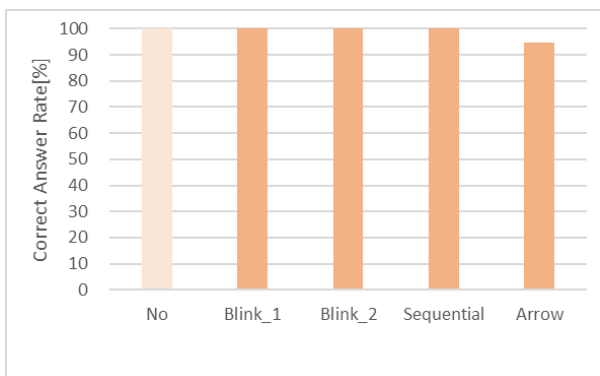


Fig. 15 Average correct answer rate of all scenarios

Fig. 12- 14 に示すように、提案した行動意図表示装置を用いた場合は、すべてのすれ違いシナリオにおいて、移動ロボットが実際に曲がるよりも前に移動ロボットの曲がる方向を正確に予測できていることが確認できた。

(3) 反応時間・動作理解度の評価値 $\hat{\alpha}$ の算出

5.2 節の反応時間・動作理解度取得実験の結果から、評

価値 $\hat{\alpha}$ を式 (1) より求めた。このとき、正答率を CR 、反応時間を RT 、反応時間の最小値と最大値をそれぞれ $RT_{min} = -1.5$ 、 $RT_{max} = -0.4$ 、正答率の重みを k とし、反応時間 RT は、範囲 $[0,1]$ に正規化した。

$$\hat{\alpha} = kCR + (1 - k) \frac{RT - RT_{max}}{RT_{min} - RT_{max}} \quad (1)$$

正答率と正規化反応時間は、重み k により正答率と反応時間のどちらを重視するかを決定する。本論では、重み k を 0.6 に設定し、正答率を反応時間に比べ若干重視した。Table 1 に、表示方法ごとの正答率、反応時間、評価値を示す。

Table 1 Evaluation value table of correct answer rate and reaction time

	Correct Answer Rate	Reaction Time(sec)	Evaluation Value
Blink1	1.000	-0.769	0.734
Blink2	1.000	-0.733	0.721
Sequential	1.000	-0.845	0.762
Arrow flow	0.948	-0.751	0.696

反応時間と正答率の加重平均評価値は Table 1 のようになった。

(4) 行動意図表示装置の消費電力による評価

移動ロボットにおいて、消費電力の大きさは自律走行時の動作や走行距離に非常に大きく影響する。表示方法が優れていても、消費電力の大きさが原因で移動ロボットの動作時間が大きく減少してしまうと、実用性が低くなる。そこで、行動意図表示装置の消費電力も考慮したうえで、最終的に実用性のある行動意図表示方法を決定する。

5.3 節の反応時間・動作理解度の評価値 $\hat{\alpha}$ と、発光デザインの消費電力の測定値から、加重平均評価値 \bar{A} を式 (2) より求めた。このとき、反応時間・動作理解度の評価値を $\hat{\alpha}$ 、消費電力測定値を P 、消費電力測定値の最大値を $P_{max} = 3.0$ 、評価値の重みを k とし、消費電力測定値 P は、範囲 $[0,1]$ に正規化した。

$$\bar{A} = k\hat{\alpha} + (1 - k) \frac{P_{max} - P}{P_{max}} \quad (2)$$

反応時間・動作理解度の評価値と消費電力は、式 (1) と同様に重み k を 0.6 に設定し、反応時間・動作理解度の評価値を消費電力に比べ若干重視した。Table 2 に、表示方法ごとの反応時間・動作理解度の評価値、消費電力測定値、加重平均評価値を示す。

Table 2 Weight average table of power consumption and evaluation value

	Evaluation Value	Power (W)	Weight Average
Blink1	0.734	2.769	0.471
Blink2	0.721	2.180	0.542
Sequential	0.762	1.988	0.592
Arrow flow	0.696	2.760	0.450

最終的な各表示方法の加重平均評価値は Table 2 のようになった。反応時間・動作理解度の評価で最も評価の高かった Sequential は、消費電力を考慮したうえでも最も評価の高い結果となった。

6. 検証

実際に移動ロボットが人間とすれ違いながら走行する際、提案した行動意図表示装置を用いた場合、どれほど走行時間に影響があるのかを検証する。

行動意図表示装置を実際の移動ロボットに実装し、歩行者を避けながら自律走行させたときの、走行可能時間を測定した。検証する発光デザインは、5.4 節の加重平均評価値が最も高かった Sequential と、最も消費電力の多い Blink1 の 2 つとした。

(1) 検証環境

Fig. 16 に検証環境を示す。

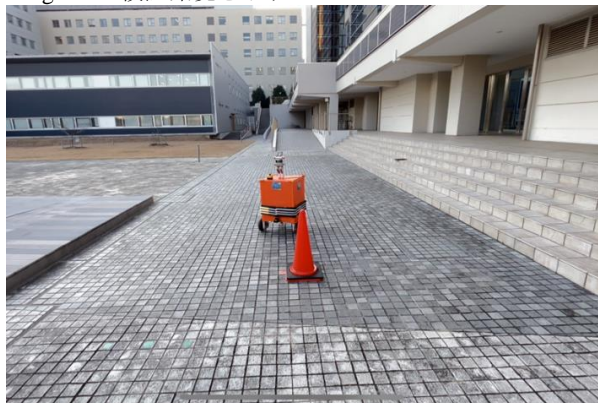


Fig. 16 Verification environment

移動ロボットは、歩行者を模した障害物を行動表示しながら避け、自律走行する。

Fig. 16 の検証環境は、歩行者と移動ロボットのすれ違い時のインタラクションを実現させるものではない。しかし、ここでは行動意図表示装置の消費電力による走行可能時間の影響を確かめることが目的であるため、検証結果には影響がないものとする。

(2) 走行可能時間の測定

Table 3 に、走行可能時間の測定結果と、行動意図表示装置の有無による走行可能時間の比較結果を示す。

Table 3 Running time

	Power (W)	Running time (min)	Percentage of time difference from no device (%)
Without device	0	56	100
Sequential	1.988	49	87.5
Blink1	2.769	44	78.6

Table 3 より、提案した行動意図表示装置を用いた場合の走行可能時間は、Sequential で 49 分、Blink1 で 44 分と、行動意図表示装置を用いない場合と比較してそれぞれ 87.5%、78.6%の動作時間となった。

7. むすび

(1) 結論

本論文では、すれ違う歩行者に対する、移動ロボットの新たな行動意図表示装置の開発を提案した。行動意図表示装置には RGB LED ストリップライトを採用し、行動表示を行なう際の LED の発光デザインを新たに 4 つ設計した。そして、設定した 8 つのすれ違いシナリオにおいて、反応時間・動作理解度取得実験を行なったうえで、消費電力による評価を行なった。その結果、すれ違う歩行者へ有効な行動表示方法が選定された。

(2) 今後の展望

本研究で選定された新たな行動表示方法は、20 代の男女による実験から得られたものである。そのため、他の年代の被験者にも実験を行ない、今回と同様の結果が得られるか確かめる必要がある。また、行動表示を行ないながら自律走行させた結果、行動意図表示装置を用いない場合に比べて走行時間が 56 分から 49 分と、12.5%減少した。本システムの消費電力 1.988W は、先行研究[7]で提案されたレーザー投影システムの 5.6W と比較すると半分以上の消費電力である。しかし、本研究で提案した行動意図表示装置は、Blink1 を除き、行動表示の際に使用していない LED の範囲がある。そのため、今後はより低消費電力のシステムにするために、行動意図表示装置のハードウェア面での改良を行なっていきたい。

参考文献

- 1) 多様な交通主体の交通ルール等の在り方に関する有識者検討会 中間報告書概要、警視庁, 2021
- 2) 株式会社すかいらーくホールディングス, “「ガスト」「しゃぶ葉」1,000 店以上にロボット導入”
https://corp.skylark.co.jp/Portals/0/images/news/press_release/pk637h000006gkn3-att/211018_Robot_at_Gusto_Syabuyo.pdf, (2023/1/17 閲覧)
- 3) R. L. Birdwhistell, “Kinesics and Context — Essays on Body Motion Communication,” 1965.
- 4) T. Matsumaru, S. Kudo, H. Endo and T. Ito, “Examination on

- a software simulation of the method and effect of preliminary-announcement and display of human-friendly robot's following action," *Trans. SICE*, Vol.40, No.2, pp. 189–198, 2004.
- 5) T. Matsumaru, "Development of four kinds of mobile robot with preliminary-announcement and indication function of upcoming operation," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.19, No.2, pp. 148–159, 2007.
 - 6) T. Matsumaru and K. Akai, "Functions of mobile-robot step-on interface," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.21, No.2, pp. 267–276, 2009.
 - 7) T. Wengefeld, D. Höchemer, B. Lewandowski, M. Köhler, M. Beer and H. -M. Gross, "A Laser Projection System for Robot Intention Communication and Human Robot Interaction," 2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), Naples, Italy, pp. 259-265, 2020.
 - 8) D. Szafir, B. Mutlu and T. Fong, "Communicating directionality in flying robots," 2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI) , Portland, OR, USA, pp. 19–26, 2015.
 - 9) S. Song and S. Yamada, "Designing LED lights for communicating gaze with appearance-constrained robots," 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) , Nanjing, pp. 94–97, 2018.
 - 10) R. Yamamoto, T. Ohkubo, K. Kobayashi, K. Watanabe, N. J. Sebi and K. C. Cheok, "Development of Intention Indicator Device for a Two-Wheeled Mobile Robot," 2021 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) , pp. 1221–1226, 2021.
 - 11) M. C. Shrestha et al., "Exploring the use of light and display indicators for communicating directional intent," 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) , pp. 1651-1656, 2016
 - 12) J. Lyu, M. Mikawa, M. Fujisawa, and W. Hiiragi, "Mobile robot with previous announcement of upcoming operation using face interface," *Proc. of 2019 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII2019)* , pp. 782–787, 2019.
 - 13) M. Mikawa, J. Lyu, M. Fujisawa, W. Hiiragi, and T. Ishibashi, "Previous announcement method using 3D CG face interface for mobile robot," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.32, No.1, pp. 97–112, 2020.
 - 14) Y. Che, A. M. Okamura and D. Sadigh, "Efficient and trustworthy social navigation via explicit and implicit robot–human communication," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol.36, No.3, pp. 692–707, 2020.
 - 15) 藤田, 永田, 池田, "模擬霧環境下でのLED視認性研究," 交通工学研究発表会論文報告集, pp.141-144, 2001.
 - 16) 前田, 平山, 川西, 出口, 井手, 村瀬, "歩行者の視認性に有効な追加照射光の点滅周波数の検討," 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, D1-6, 2017.
 - 17) R. W. Bohannon and A. A. Williams, "Normal walking speed: a descriptive meta-analysis," *Physiotherapy*, vol. 97, pp. 182-189, 2011
 - 18) 令和 2 年度体力・運動能力調査報告書, スポーツ庁, 2021