

無線Wi-Fiを搭載した自律移動型ロボットによる 迷路探索課題の開発

常三島技術部門
情報システムグループ

辻 明典 (TSUJI Akinori)

1. はじめに

近年、AI/IoT等の先進技術は情報分野に限らず、様々な分野において積極的に導入が進められている。大学や高専の実験や演習においても、AIやIoTの基礎技術の習得を目的とした課題の開発が求められる。本稿では、これまでに製作した無線Wi-Fiを搭載した自律移動型ロボットを用いて、迷路のスタートからゴールまでの最短経路を自動探索する迷路探索課題を開発したので報告する。

2. 無線Wi-Fi搭載自律移動型ロボット

自律移動型ロボットは、周囲の環境をセンサで把握し、その状況に合わせて考え行動するロボットである^[1]。開発した無線 Wi-Fi を搭載した自律移動型ロボットを図 1 に、仕様を表 1 にそれぞれ示す。ロボットは、①LED ボード、②マイコンボード、③モータードライバボードの 3 枚の基板より構成され、各ボードはコネクタによって連結できる。例えば、マイコンボード単体で IoT 用計測端末として使用でき、またマイコンボードとモータードライバボードを連結してロボットを制作できる。さらに、マイコンボードと LED ボードで LED 照明の制御実験ができる。各ボードの組み合わせによって、様々な用途にあわせた実験や演習に使い分けができる特長がある。

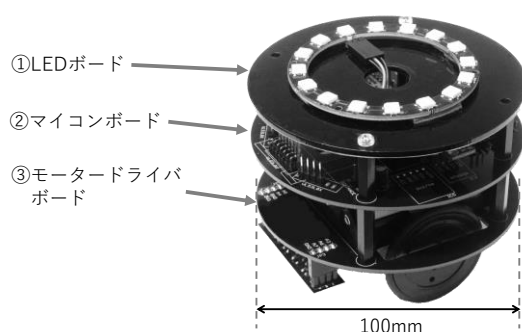


図 1 開発した無線 Wi-Fi を搭載した自律移動型ロボット

① LED ボード

SMD 型フルカラーLED が 16 個実装されている。マイコンにより各 LED の調光制御が可能で、ロボットの状態をリアルタイムで確認するための表示器として使用する。

② マイコンボード

無線 Wi-Fi を搭載したマイコン、I²C 通信で接続が可能なセンサ（高精度温湿度センサ、9 軸慣性センサ、レーザー距離センサ、照度センサ等）を備え、ロボットの障害物検知や姿勢制御に必要なセンサを実装している。単体のボードで IoT 向けに周囲の環境計測として使用できる。

③ モータードライバボード

減速ギア付き DC モーター、フォトリフレクタ 5 個を実装し、ロボットの通常走行に加えてラインレース等の課題にも応用できる。また、単三電池より電源供給でき、マイコンボードと LED ボードを動作させられる。携帯用計測端末としての使用や LED 照明の電源としても使用できる。

自律移動型ロボットに、無線 Wi-Fi 機能を搭載することで、センシングした計測結果をリアルタイムでパソコンやスマートフォン等で確認したり、無線経由でプログラムを書き換えられる等、開発におけるデバッグを効率化できるメリットがある。

表 1 無線 Wi-Fi 搭載自律移動型ロボットの仕様

名称	規格
無線Wi-Fiマイコン	Espressif, ESP32-WROOM-32D
温度・湿度センサ	Honeywell, HTU21D
9軸慣性センサ	Bosch, BMX055
レーザー距離センサ	STMicro, VL53L0X
フォトリフレクタ	Letex, LBR-127HLD
減速ギア付きDCモーター	DCモーター, 5V / 600RPM
モータードライバー	Texas Instruments, DRV8835
フルカラーLED	WorldSemi, WS2812B
ニッケル水素充電電池	単三 4本

3. 迷路探索課題

迷路探索課題は、ラインで構成される迷路のスタートからゴールまでの最短経路を探索する課題である。ロボットには、正確なライントレース、ライン交差点の判定、経路を正しく記録しながらの走行、スタート～ゴール間の最短経路の算出等が求められる。迷路課題としては、まずロボットをライントレースできるように調整した後、迷路を構成する典型パターンの走行練習をする。その後、迷路の経路を順に記録をして、最短経路を求めるアルゴリズムの実装を行う。

3. 1 ライントレース

ライントレースは、ロボットの前方に取り付けたセンサでラインを検出し、常に中央のセンサが反応するよう左右の車輪の速度制御を行いながら走行する。図2に、ロボット前方のセンサ（フォトリフレクタ）とライン検出の状態を示す。センサ5個がラインを横切ったときの応答を図3に示す。ここで、縦軸はアナログ値（0～4095）、横軸は時間である。ライン上（黒）では大きな値を示し、ライン外（白）では小さな値を示す。これらを閾値処理して、ライン上は1、ライン外は0として、ラインに対するロボットの位置の検出を行う。

ロボットがライン上を走行するとき、図4のようにセンサの個数分のビット列が生成される。 n 番目のセンサの反応の有無を $b_n = \{0, 1\}$ 、 $n = 0, 1, 2, 3, 4$ とすると、センサの反応は $\mathbf{B} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]$ となる。これに重み $\mathbf{W}^T = [100, 200, 300, 400, 500]$ を付けて、ロボットのライン上の位置を

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\mathbf{W}^T \quad (1)$$

とする。ここで、重み \mathbf{W}^T はロボットのモーター速度の範囲が0～1023から決定した。このとき、中央センサのみが反応すると、 $\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ となり、式(1)より $P_T = 300$ となる。ライントレースでは、このロボットがラインの中央を走行する P_T を目標値として、ロボットがライン中央からはずれたときの差をなくすよう走行させる。中央のラインからの誤差を e とすると、

$$e = P_T - P_c \quad (2)$$

となる。ここで、 P_c は現在のロボット位置で

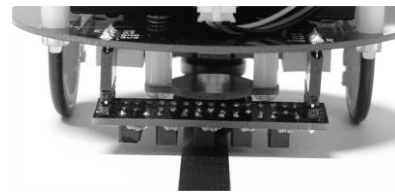


図2 ロボット前方のセンサ（フォトリフレクタ5個）とラインの検出

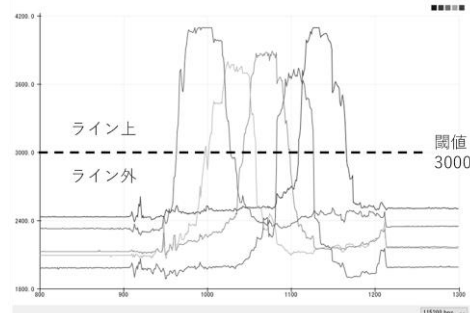


図3 フォトリフレクタの応答とライン検出のための閾値

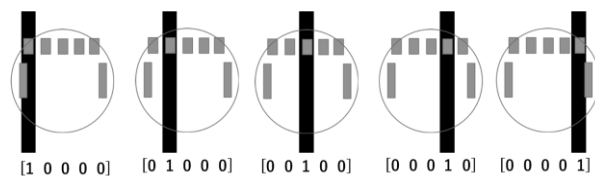


図4 ロボットのライン位置の検出

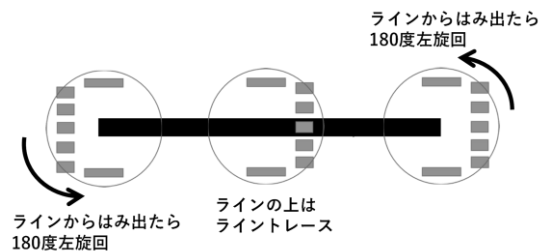


図5 直線のライントレース

ある。この誤差に比例定数 K_P を乗じて、モーター左右の速度制御を行う比例制御を行う。さらに、誤差 e の過去の誤差を e_p とし、 $K_D(e - e_p)$ として、瞬時のロボットの位置ずれに対応する微分制御を行う。つまり、モーターの左右出力は、

$$M_c = K_P e + K_D (e - e_p) \quad (3)$$

により調整される。このとき、左右のモーター出力は、

$$M_L = M_0 - M_c \quad (4)$$

$$M_R = M_0 + M_c \quad (5)$$

となる。ここで、 M_0 はモーターの基本スピードで、モーターを駆動するPWMのデューティ

比に対応し、0~1023の範囲の値をとる。

PD制御のKP, KDのパラメタ調整は、KD = 0としてラインを走行させてKPを決めた後にKDを調整する。ラインレースには、図5に示す直線を用いる。ライン上ではラインレースを行い、ラインから外れると180度左旋回を行いラインに復帰する。これを繰り返して、ラインから脱線しないようKP, KDのパラメタ調整を行う。ここで、迷路のラインの幅は、互いのセンサの間隔より10mmとした。

3.2 左手法による迷路探索

迷路探索は、スタートとゴールが示されたラインで構成される迷路が与えられたとき、スタート-ゴール間の最短経路を探索する課題である。迷路探索のコース例を図6(a)に示す。迷路探索の解法の一つとして、迷路の左壁に沿って走る左手法がある。図7に、迷路を構成する経路の基本パターン(8種類)を示す。左手法では、これらの基本パターンに対して、次に挙げる5つのルールに従ってゴールまでの経路を探索する。

ルール1: 直線, 曲がり角はラインに沿って走らせる。(図7(a), (b))

ルール2: T字路, 四つ角では左折をする。(図7(c), (d))

ルール3: 分岐路では左折または直進する。(図7(e), (f))

ルール4: 黒塗り長方形はゴールで停止する。(図7(g))

ルール5: ラインの行き止まりは旋回をする。(図7(h))

例えば、図6(a)の迷路において、START1からゴールへ向かうとき、左手法を適用した迷路探索では、図6(b)の太矢印の順に探索が行われる。つまり、迷路の探索経路は、START1 → ①L → ②L → ③T → ④R → ⑤L → ⑥L → ⑦T → ⑧R → ⑨L → GOALとなる。ここで、探索経路の記号をL: 左折(Left Turn), R: 右折(Right Turn), T: 旋回(Turn), S: 直進(Straight)と定義している。START1からゴールまでに要する経路長は①から⑨の9となる。この迷路の最短経路は一つ目の四つ角を右折するだけでゴールにたどり着くが、左手法による迷路探索では、無駄な経路が多く含まれる。

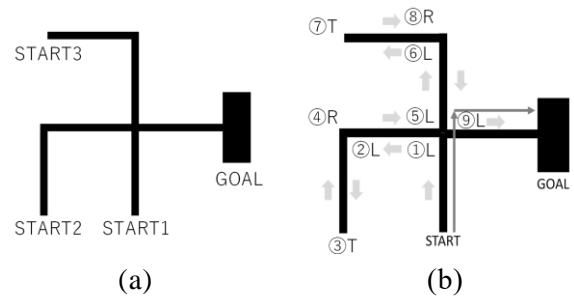


図6 迷路探索 (a)迷路探索のコース例, (b)左手法を適用した迷路探索の経路

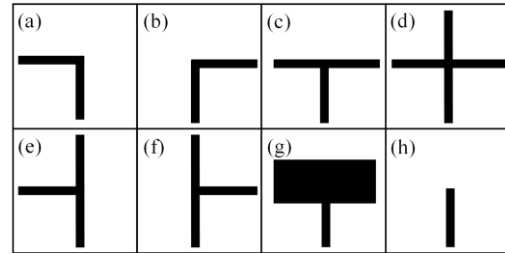


図7 迷路探索における経路の基本パターン(8種類)

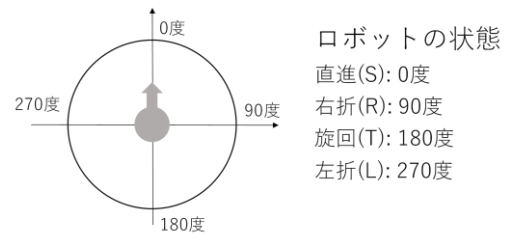


図8 ロボットの回転角(0度~360度)

3.3 最短経路の探索

スタートからゴールまでの最短経路を求めるため、1回目の走行では左手法による迷路探索を行う。このとき、通過経路を記録しながら走行し、行き止まりによる迂回路を除外することで最短経路を探索する。2回目の走行では1回目の走行で求めた最短経路で走行をする。

最短経路を求めるには、行き止まりによる旋回を伴う経路を除外する必要がある^[2]。そこで、行き止まり(T: 旋回の前後の経路を列挙すると、次の組み合わせが考えられる。LTS, LTR, LTL, RTS, RTR, RTL, STS, STR, STL。ここでLTSは、交差点を左折(L)して、行き止まりを旋回(T)し、直進(S)する走行を略しており、他も同様である。いずれの組み合わせも行き止まりの経路を回避でき、まとめると、次の省略規則となる。

LTS→R, LTR→T, LTL→S,

RTS→L, RTR→S, RTL→T,
STS→T, STR→L, STL→R.

ロボットを左手法で走行させながら、これら行き止まりを含む無駄経路を省略する。

経路の省略を簡単に求めるため、ロボットの向きから経路省略後の角度の算出を行う^[3]。図8にロボットの回転角を示す。ここで、ロボットの回転角を、直進0度、右折90度、旋回180度、左折270度とし、それぞれ{S, R, L}={0, 90, 270}とする。このとき、旋回前をX={S, R, L}, 旋回後をY={S, R, L}, 旋回をT=180とすると、行き止まりを含む経路省略後の角度Zは、次式により求まる。

$$Z = (X + T + Y) \% 360 \quad (6)$$

ここで、%は余りを求める記号である。例えば、LTSの場合には、式(6)より、270+180+0=450となり、360度で割った余りが90となる。つまり、右折(90度)が省略後の経路とわかる。左手法による迷路の走行中に、経路を順次記憶しながら、経路の省略規則を適用することで最短経路が求まる。

4. 評価実験

開発した自律型移動ロボットを用いて、迷路探索課題の評価を行った。迷路コースには、図6(a)を用いた。図6(b)の迷路の各スタート(START1, START2, START3)より始めて、左手法による探索を行って最短経路を求めた。また、走行中の経路は、無線Wi-Fiを用いてブラウザで確認した。

4. 1 迷路の最短経路走行

迷路探索中に、走行経路をメモリに記憶すると同時に、前述の経路の省略規則を適用した。走行中の経路情報は、無線Wi-Fi経由でホストPCへ送信し、各スタート地点からの最短経路が求まる過程を次のとおり調べた。

<START1の探索過程>

- ①L, ②LL, ③LLT, ④L[LTR], LTR→T,
 - ⑤[LTL], LTL→S, ⑥SL, ⑦SLT,
 - ⑧S[LTR], LTR→T, ⑨[STL], STL→R
- 最短経路：R (経路長9→1)

<START2の探索過程>

- ①R, ②RL, ③RLL, ④RLLT

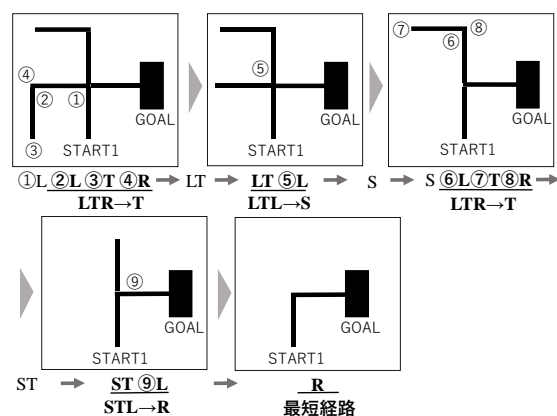


図9 スタート(START1)より始めたときの最短経路の探索過程

⑤RL[LTR], LTR→T ⑥R[LTL], LTL→S
最短経路：RS (経路長6→2)

<START3の探索過程>

- ①R, ②RL

最短経路：RL (経路長：2→2)

ここで、[*]は経路の省略規則を適用したことを示す。図9にSTART1の探索過程を示す。結果として、各スタートより始めて、左手法の経路に省略規則を適用し、ゴールまでの最短経路を求めて走行できることを確認した。

5. まとめ

本稿では、無線Wi-Fiを搭載した自律移動型ロボットを用いた迷路探索課題の開発について述べた。開発した迷路探索課題は、センシングの基礎やロボット制御、最短経路を求めるアルゴリズムをはじめとして、AIやIoTの基礎となる要素が多く含まれる課題である。さらに、迷路に経由地点や閉路を設けることで、より挑戦的な発展課題としても展開できる。

参考文献

- [1] 辻明典, 桑折範彦, 川上博, "実践して学ぶAI/IoT技術", 大学教育カンファレンス in 徳島発表抄録集, pp.54-55, 2019.
- [2] J.A. Pandian, "Maze Solving Robot Using Freeduino and LSRB Algorithm", IJMER, ISSN:2249-6645, pp.92-100, 2013.
- [3] L. Bienias, "Maze Exploration Algorithm for Small Mobile Platform", Image Proc. & Comm., vol. 21, no. 3, pp.15-26, 2015.