

情報工学実験 B レポート AI-2

— (広義の) 最良優先探索 —

氏名: 大野 颯也 (OHNO, Soya)

学生番号: 09B23523

締切日: 2025 年 10 月 14 日

提出日: 2025 年 10 月 14 日

目次

1	レポート AI-2: (広義の) 最良優先探索	1
2	A) 考察課題の問い	2
3	B) 解答方針	2
4	C) プログラムの作成	2
4.1	C1) Dijkstra's algorithm	4
4.1.1	ソースコード	4
4.1.2	実行結果に対する説明と考察	14
4.2	C2) 遠回りな経路に対する検討	14
4.2.1	ソースコード	14
4.2.2	実行結果に対する説明と考察	25
5	D) 考察	25
6	E) 発展課題の検討と考察	26
6.1	E-1) (Extra-A) グリッド型迷路の利用	26
6.1.1	ソースコード	26
6.1.2	実行結果に対する説明と考察	33
6.2	E-2) (Extra-B) 迷路を探索しよう !!	34
6.2.1	ソースコード	34
6.2.2	実行結果に対する説明と考察	38
6.3	E-3) (Extra-C) A* algorithm による探索の実装	39
6.3.1	ソースコード	39
6.3.2	実行結果に対する説明と考察	43

1 レポート AI-2: (広義の) 最良優先探索

- レポートの執筆にあたっては、[Moodle のガイダンス資料](#) > [提出物](#)も参考にしてください。

- PDF を作成する際は、↑ の LaTeX コードのセルの修正も忘れないように.
- セルはある程度自由に追加しても構いません.

本レポート共通の実験条件

- 使用機材 (番号)
 - PC: S067, Ryzen 5 PRO 5650G
- 動作確認時の実行環境
 - Python version 3.12.3 (main, Aug 14 2025, 17:47:21) [GCC 13.3.0]
 - Numpy version 2.3.2
 - Matplotlib version 3.10.5
 - NetworkX version 3.5

2 A) 考察課題の問い

迷路探索のためのグラフ探索として, Dijkstra's algorithm の実装をおこない, その実装や実装方針について考察せよ. このとき, 「深さ優先探索」あるいは「幅優先探索」のいずれかとの差分に注目し, 探索過程や探索結果等も示しながら, 考察すること.

3 B) 解答方針

AI-1 で作成した幅優先探索のコードをベースにして, Dijkstra's algorithm を作成する. ヒープというデータ構造について検討し, Dijkstra's algorithm に落とし込むために条件付けの方法を学ぶ. その後, 実際に幅優先探索のコードに適応して動作させる. 幅優先探索との違いを確認するためにも, ゴールに遠回りでたどり着く経路が最適解のグラフも使って考えてみる.

C-1) では Dijkstra's algorithm について考察し, C-2) では経路が変更されたグラフへ適用させる.

4 C) プログラムの作成

```
[4]: # 本実験ではほぼ毎回利用するライブラリ
import sys
import numpy as np

import IPython.display
from IPython.display import display, Markdown

import matplotlib
from matplotlib import pyplot as plt
matplotlib.rcParams["savefig.bbox"] = 'tight'

# データ構造の定義に利用する
from collections import deque
```

```

from dataclasses import dataclass

# グラフ構造の描画に利用するライブラリ
import networkx as netx

#
# DEBUG
#
print('*** System Information ***')
print(f'Python      : {sys.version}')
print(f'NumPy        : {np.__version__}')
print(f'Matplotlib    : {matplotlib.__version__}')
print(f'NetworkX      : {netx.__version__}')

```

```

*** System Information ***
Python      : 3.12.3 (main, Aug 14 2025, 17:47:21) [GCC 13.3.0]
NumPy       : 2.3.2
Matplotlib  : 3.10.5
NetworkX    : 3.5

```

```

[5]: %reload_ext autoreload
      %autoreload 1
      %import ebai

# 人工知能実験用の補助関数を定義したサブライブラリ（改変不可）
import ebai
ebai.ebai_info()

```

```

/home/users/ecs/09B23523/exp-b/ai/ebai.py
> Revision 2025.1
> 更新日時：2025-10-03 11:18:05.715802
>
> Python      : 3.12.3 (main, Aug 14 2025, 17:47:21) [GCC 13.3.0]
> NumPy       : 2.3.2
> Matplotlib  : 3.10.5
> NetworkX    : 3.5

```

```

[6]: # PNGかPDFで画像を出力する
# - レポート PDFを作るときに、どうしても画像サイズが 10 MB 超える！という場合は、
#   ('png', 'pdf') を ('jpeg') のみに置き換えてから、試してみてください。
from matplotlib_inline.backend_inline import set_matplotlib_formats
set_matplotlib_formats('png', 'pdf')

```

4.1 C1) Dijkstra's algorithm

4.1.1 ソースコード

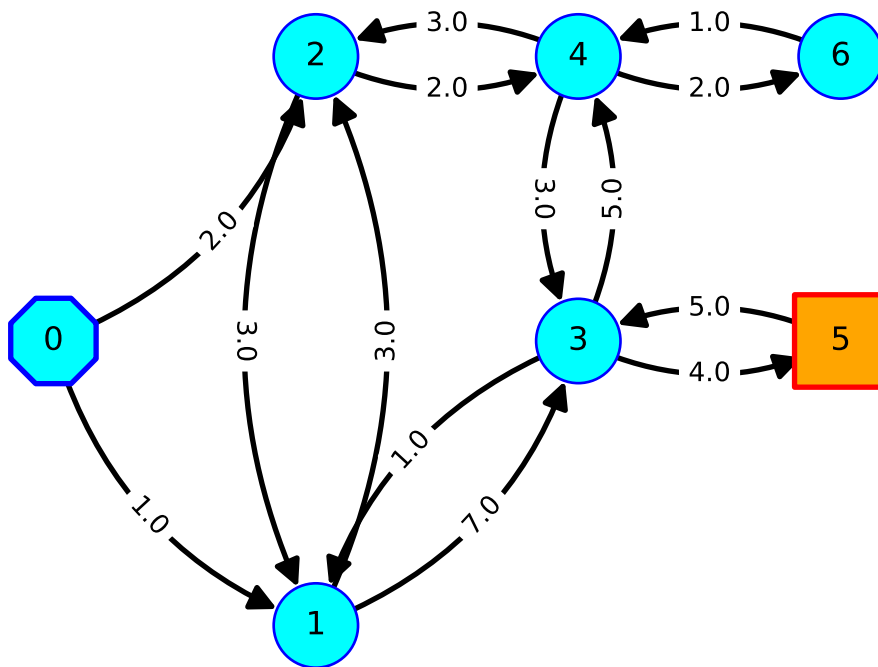
```
[4]: import heapq
@dataclass
class State:
    id: int
    cost: float
    parent_id: int

    # <を使うための定義
    def __lt__(a, b):
        if a.cost != b.cost:
            return a.cost < b.cost

graph4_edgedict = {
    0: [(1, 1.0), (2, 2.0)],
    1: [(2, 3.0), (3, 7.0)],
    2: [(1, 3.0), (4, 2.0)],
    3: [(1, 1.0), (4, 5.0), (5, 4.0)],
    4: [(2, 3.0), (3, 3.0), (6, 2.0)],
    5: [(3, 5.0)],
    6: [(4, 1.0)]
}

graph4_target = 5
graph4_pos = {0: [0, 1], 1: [1, 2], 2: [1, 0], 3: [2, 1], 4: [2, 0], 5: [3, 1], 6: [3, 0]}

fig4, ax4 = plt.subplots()
ebai.draw_graph_structure(graph4_edgedict, graph4_pos, graph4_target, show_weight=True,
↪ax=ax4)
```



```
[5]: graph_edgedict = graph4_edgedict
graph_target = graph4_target
graph_pos = graph4_pos

# Write your code
# (1) Initialization
# (1-1) Prepare open_list as STACK, QUEUE, or XXXX(AI-2)
open_list = []
heapq.heapify(open_list)
# - 任意のリストは heapify を経ることで heap として扱えるようになります.
heapq.heappush(open_list, State(0, cost=0, parent_id=-1))
# - open_list は "List(deque) of State" とする.
# - [] の中に State() を1つだけ入れており, そのリストで deque を初期化している.
# - スタートは常に 0 番ノードにする.
# - いったんは cost = 0, parent_id = -1 ということにしておく.
# - 【重要】 cost と parent_id は後で見直しが必要.

# (1-2) Prepare closed_list as DICT
closed_list = dict()
# - closed_list は "Dict of State" とする.
# - cf. This implementaion by dict might be easy and simple one.
```

```

#         However, an implementation by list (static table) might
#         be faster. As some algorithm contest, the dict implementation
#         will be caused TLE (Time Limit Exceed)...

# DEBUG
print(f'(1) {open_list=}')
print(f'(1) {closed_list=}')

# -----
# (2) Loop until the open_list is empty
#     (Loop while(if) the open_list is not empty)
loop_count = 0
while len(open_list) > 0 and loop_count < 100:
    # - open_list に要素がある限り、ループし続ける
    # - 安全のため、loop_count が増えすぎてゐるなら、タイムアウトとして止める.
    # ** 初期の 100 では、探索対象のグラフによっては少なすぎるかもしれないので、注意. **
    # - なお、例年 while 文が苦手という人がいるようですが...
    # while 文は、if 文とほぼ同じです. 条件が成立するなら内部を実行する、です.
    # ただし、if 文は内部を実行終わったら、そこで終わるが、while 文は条件判定に戻る.
    # cf. アセンブラで言えば、if でも while でも、beq による条件分岐があるのは同じだが、
    #     while は最後に j while_loop を置くことでループ構造を実現する.
    #     https://www.swlab.cs.okayama-u.ac.jp/~nom/lect/p3/dat/examples/ans-practice5-1.s

    loop_count += 1;
    print(f'\n----- LOOP = {loop_count}')
```

```

# (3) Set current state for search algorithm
cur_state = heapq.heappop(open_list)    # POP as STACK

#     DEBUG
print(f'(3) {cur_state=}')
print(f'(3) {open_list=}')

# -----
# (4) Update closed_list
assert cur_state.id not in closed_list, f'REVISITED: {cur_state.id=} should not in_
↪{closed_list=}'

# - assert は条件を満たしていないときに処理を止める関数です
#   - アルゴリズムとして必要なのではなく、検証 (validation) の一種です.
```

```

# - 後述の (7-1) や (7-2) で適切な処理をしていない場合は、
#   ここで "再訪 (revisit)" してしまう場合があります。
# - "再訪" になってしまう場合は、ここで処理を加えるよりは (7) を見直しましょう。
# - ただし・・・どうしても解決できない（か、独自に考えているアルゴリズムであり、
#   ここでの再訪相当を適切に処理することにした）なら、この assert を除いてください。
# - それはそれで、考察できることは増えると思いますので...

closed_list[cur_state.id] = cur_state

# - closed_list に記録を残します。
# - 本講義で想定しているアルゴリズムであれば、ここでは上書きは起こりません。
# - 上述の通り、アルゴリズムによっては、何らかの条件分岐が必要かもしれません。

#     DEBUG
print(f'(4) {closed_list=}')

# -----
# (5) Check whether reaching the target (goal) or not
if graph_target in closed_list:
    # Python の独特な条件式です. graph_target と一致する要素が、
    # closed_list のキーに含まれているかどうかのチェックをしています。

    print('\n*** I have reached the target node!!\n')
    break

    # この終了条件は、今後必要に応じて見直しが必要になるでしょう。
    # 【発展】ここで終了しなくても、解説 A3 の経路探索は実現できる。
    #         (終了すべきでない、とまでは言っていない。考察課題です。)

# -----
# (6) Find adjacent nodes
candidate_state_nodes = graph_edgedict[cur_state.id]

# - cur_state のノードの隣接ノードは、graph_edgedict を辞書引きすればよい
# - この時点では candidate_state_nodes は (dst_id, weight) のタプルである。

#     DEBUG
print(f'(6) {candidate_state_nodes=}')

# -----
# (7) Update open_list
for _dst_id, _weight in candidate_state_nodes:
    candidate_state = State(
        id=_dst_id,

```

```

cost=_weight + cur_state.cost,          # TODO: 解説 A5 & A6 (AI-2)
parent_id=cur_state.id # TODO: 解説 A3
)

# - for ループを使い、候補となるノードを追加したい。効率は無視。
#   - 候補となるノードは、[解説 A2] 時点では、id (ノード ID) しか情報を持っていない。
#   - parent_id は、次の [解説 A3] で考え直す必要がある。
#   - cost は、AI-2で考え直す必要がある。
# - 以降、_candidate_node を open_list に追加してよいかどうか、
#   を判定してから、最終的に、open_list へ追加する。

# (7-1) Ignore the candidate, if it existing in closed_list
# Note: We should reconsider this process, if try to implement A* algorithm
if candidate_state.id in closed_list:
    continue
    # - closed_list は dict 型なので in 演算子で存在の判定ができる
    # - _dst_id が探索済みのノード (closed_list 内のノード) である
    #   ==> open_list には追加しない。
    #   ==> "continue" により、以降の処理は実行せず、for ループを継続する

# (7-2) Ignore the candidate, if it existing in open_list
# Note: We must reconsider this process at AI-2
_exist_state = [x for x in open_list if x.id == candidate_state.id]
_exist_state = _exist_state[0] if _exist_state else None
if _exist_state is None:
    # - 本講義だけでは、この 3 行の条件判定の解説は難しいので、深入りしないで構いません。
    # - この処理では、open_list 内の全探索状態に candidate_state.id と同じ ID があれば、
    #   _exist_state として、open_list の 1 要素が得られます。無ければ None です。

    heapq.heappush(open_list, candidate_state)

elif candidate_state.cost < _exist_state.cost:
    open_list.remove(_exist_state)
    open_list.append(candidate_state)
    heapq.heapify(open_list)
else:
    pass
    # - open_list に _dst_id と同じ id の状態データが存在する
    #   ==> (AI-1 では) open_list には追加しない。
    #
    # 【重要】AI-2で cost も踏まえた再検討をする。次回の Tutorial 3 も注意深く確認しよう。

```



```

print(f'(7) {open_list=}')

# -----

#
# Backtracking
#
def backtrack(closed_list, graph_target, graph_start):
    """ BACKTRACK
    PARAMETERS
    -----
    closed_list
        グラフ探索で得られたクローズドリスト
    graph_target
        グラフ探索におけるゴールとなるノードの ID
    graph_start (default: 0)
        グラフ探索におけるスタートとなるノードの ID

    RETURNS
    -----
    ???
        ???
    ???
        ???

    NOTE
    ----
    - return は各自で考えよう.
      - 何も戻さない方針なら return 文をなくして, 上記 RETURNS については, None とでも書いておけばよい
    """
    # parameters
    route = deque([])
    # - route にノード情報を追加していく.
    # - 追加と利用の考え方は, システムプログラミングの関数呼び出しにおけるスタックと同じ考え方.

    bt_node_id = graph_target
    # - ゴールから逆にたどるので, ゴールのノード番号を入れておく
    # - bt は backtracking の略です.

    # Debug

```

```

print(f'DEBUG: {bt_node_id=}')
while bt_node_id >= 0:
    # - 本資料では、ソースノードは、常に 0 番ノードと仮定していることを思い出そう。
    # - ソースノードは、Backtracking 処理におけるゴールに相当する。
    # - != 0 でも問題はないが・・・もう少し考えてみよう
    # - 実際のところ、(正常な) ノード ID としては、正の値しか使っていない。
    # - そこで、先を見越して、広く設定しておこう。この条件ならば「正常でない」の意味で、
    #   マイナス番号のノード ID をプログラマが意図的に利用することもできる。

    route.appendleft(bt_node_id)
    # - 先頭に追加していく。

    # Debug
    print(f'DEBUG: {route=}')

    bt_node_id = closed_list.get(bt_node_id, State(id=-1, cost=-1, parent_id=-9)).
↪parent_id
    # - dict.get は、辞書引きをする際に key が見つからなければ、第 2 引数を default 値としてを返
    す

    # Debug
    print(f'DEBUG: {bt_node_id=}')

    if bt_node_id <= graph_start:
        # a) Backtracking 成功は、どんな条件になるでしょうか？
        #   自分で if 文を書き換えてください。
        # Backtracking 成功
        print(f'Backtracking: Success: Route = {list(route)}')
    else:
        # Backtracking 失敗
        print(f'Backtracking: Failed: Route = {list(route)}?')

    # Debug
    print('\n-----')

    return list(route)
    # b) 何を返すのがよいか、は自分でよく考えてください。
    #   (何も返さないという方針も当然あり得ますが、考えを示す必要があります。)

#
# Test your function

```

```

#
print(f'DEBUG: {graph_target=}')
display(closed_list)
    # - 探索"成功"時の closed_list を使います。セルの中でも、簡単に中身を確認しておくといいでしょう。
    # - なお, "成功"していないときの動作は, 未定義です。所望の Backtracking の結果は得られないでしょう。

print('TEST BACKTRACKING -----')
true_rute = backtrack(closed_list, graph_target, 0)
    # - 関数のデバッグをしたいなら, 右サイドバーの虫アイコンを押して, デバuggを起動し,
    #   ブレークポイント設置とステップ実行をするとよいでしょう。

# DEBUG: draw the Graph
ebai.draw_graph_structure(graph_edgedict, graph_pos, graph_target, open_list=open_list,
                           show_weight=True,
                           highlight_path=true_rute,
                           closed_list=closed_list)

    # - 先ほどの描画例に加えて, open_list, closed_list も追加している
    #   - 適宜, 引数を与えずに描画するなどして, 描かれた図の各シンボルが
    #     何を表しているのか, 理解をしてください。
    # - ループ込みの完成版であれば, ループ内で毎回描画するのは, 無駄である。
    #   必要な場所でのみ, 描画すれば十分であろう。

# *****
# 【注意】
# fig?.savefig() を利用した画像保存をする際は, 十分に注意を払ってください。
# ループ内での savefig() 呼び出しは, 大量のネットワーク経由のデータ転送と,
# 共有ディスクの大量消費をする可能性があり, ほかの学生の受講の妨げになります。
# (あなたの端末だけでなく, 演習室の全端末がハングアップする可能性があります。)
# *****

# Show the Result of Backtracking

```

```
(1) open_list=[State(id=0, cost=0, parent_id=-1)]
```

```
(1) closed_list={}
```

```
----- LOOP = 1
```

```
(3) cur_state=State(id=0, cost=0, parent_id=-1)
```

```
(3) open_list=[]
```

```
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1)}
```

```
(6) candidate_state_nodes=[(1, 1.0), (2, 2.0)]
```

```
(7) open_list=[State(id=1, cost=1.0, parent_id=0), State(id=2, cost=2.0,
parent_id=0)]
```

```

----- LOOP = 2
(3) cur_state=State(id=1, cost=1.0, parent_id=0)
(3) open_list=[State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0)}
(6) candidate_state_nodes=[(2, 3.0), (3, 7.0)]
(7) open_list=[State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), State(id=3, cost=8.0,
parent_id=1)]

----- LOOP = 3
(3) cur_state=State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)
(3) open_list=[State(id=3, cost=8.0, parent_id=1)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)}
(6) candidate_state_nodes=[(1, 3.0), (4, 2.0)]
(7) open_list=[State(id=4, cost=4.0, parent_id=2), State(id=3, cost=8.0,
parent_id=1)]

----- LOOP = 4
(3) cur_state=State(id=4, cost=4.0, parent_id=2)
(3) open_list=[State(id=3, cost=8.0, parent_id=1)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2)}
(6) candidate_state_nodes=[(2, 3.0), (3, 3.0), (6, 2.0)]
(7) open_list=[State(id=6, cost=6.0, parent_id=4), State(id=3, cost=7.0,
parent_id=4)]

----- LOOP = 5
(3) cur_state=State(id=6, cost=6.0, parent_id=4)
(3) open_list=[State(id=3, cost=7.0, parent_id=4)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 6: State(id=6, cost=6.0, parent_id=4)}
(6) candidate_state_nodes=[(4, 1.0)]
(7) open_list=[State(id=3, cost=7.0, parent_id=4)]

----- LOOP = 6
(3) cur_state=State(id=3, cost=7.0, parent_id=4)
(3) open_list=[]

```

```
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 6: State(id=6, cost=6.0, parent_id=4), 3: State(id=3, cost=7.0,
parent_id=4)}
```

```
(6) candidate_state_nodes=[(1, 1.0), (4, 5.0), (5, 4.0)]
```

```
(7) open_list=[State(id=5, cost=11.0, parent_id=3)]
```

```
----- LOOP = 7
```

```
(3) cur_state=State(id=5, cost=11.0, parent_id=3)
```

```
(3) open_list=[]
```

```
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 6: State(id=6, cost=6.0, parent_id=4), 3: State(id=3, cost=7.0,
parent_id=4), 5: State(id=5, cost=11.0, parent_id=3)}
```

```
**** I have reached the target node!!
```

```
DEBUG: graph_target=5
```

```
{0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1),
 1: State(id=1, cost=1.0, parent_id=0),
 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0),
 4: State(id=4, cost=4.0, parent_id=2),
 6: State(id=6, cost=6.0, parent_id=4),
 3: State(id=3, cost=7.0, parent_id=4),
 5: State(id=5, cost=11.0, parent_id=3)}
```

```
TEST BACKTRACKING -----
```

```
DEBUG: bt_node_id=5
```

```
DEBUG: route=deque([5])
```

```
DEBUG: bt_node_id=3
```

```
DEBUG: route=deque([3, 5])
```

```
DEBUG: bt_node_id=4
```

```
DEBUG: route=deque([4, 3, 5])
```

```
DEBUG: bt_node_id=2
```

```
DEBUG: route=deque([2, 4, 3, 5])
```

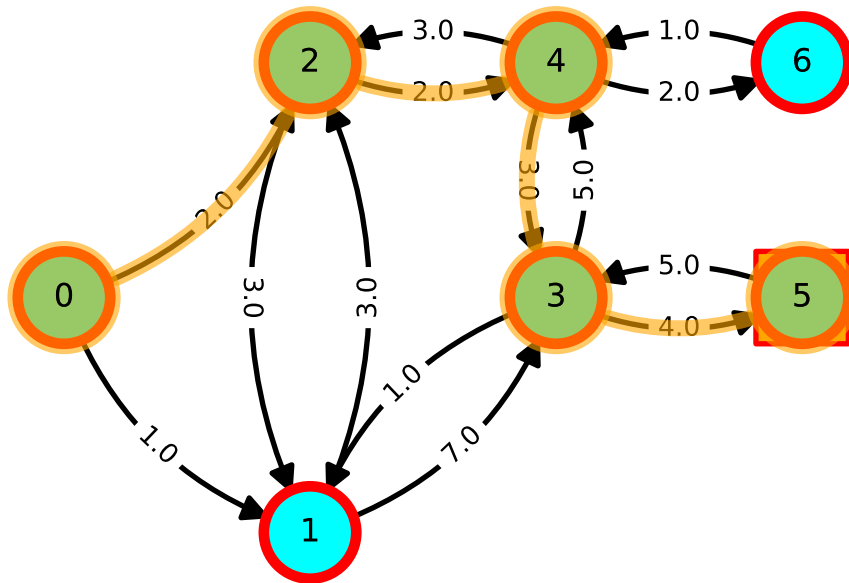
```
DEBUG: bt_node_id=0
```

```
DEBUG: route=deque([0, 2, 4, 3, 5])
```

```
DEBUG: bt_node_id=-1
```

```
Backtracking: Success: Route = [0, 2, 4, 3, 5]
```

```
-----
```



4.1.2 実行結果に対する説明と考察

グラフの矢印の中心にある数値はそのルートにおける重みである。DEBUG として出力されている State の cost を見ると、親ノードまでの cost も加算されている。赤くなっているのは探索されたノードであり、オレンジ色で光っている経路が Dijkstra's algorithm によって導出された最短経路である。合計コストの小さい順に探索を勧めていくことにより、最小コストで探索を終了することができる。

使用するデータ構造はユニーク制約付きの優先度付きキューである。これはデータをヒープで管理するものである。cost が小さい順になるように木構造が組まれる。このときの木構造は [親ノード < 子ノード] という関係のみが担保されている木構造であるため、木構造の根となる open_list の先頭データのみを扱うことによって常に最小のデータを扱うことができるようになっている。

またユニーク制約付きというのは、先に優先度付きキューにエンキューした id についても、新しく出てきた同じ id のデータの cost が以前の cost よりも小さければ上書きするというものである。

4.2 C2) 遠回りな経路に対する検討

4.2.1 ソースコード

```
[6]: import heapq

@dataclass
class State:
    id: int
    cost: float
    parent_id: int

    # < を使うための定義
```

```

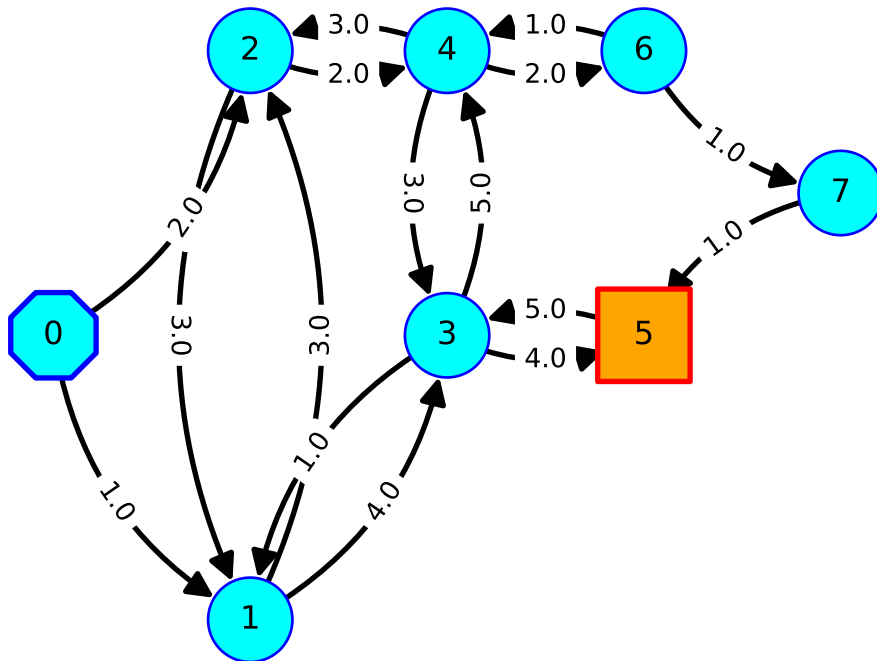
def __lt__(a, b):
    if a.cost != b.cost:
        return a.cost < b.cost

graph4_edgedict = {
    0: [(1, 1.0), (2, 2.0)],
    1: [(2, 3.0), (3, 4.0)],
    2: [(1, 3.0), (4, 2.0)],
    3: [(1, 1.0), (4, 5.0), (5, 4.0)],
    4: [(2, 3.0), (3, 3.0), (6, 2.0)],
    5: [(3, 5.0)],
    6: [(4, 1.0), (7, 1.0)],
    7: [(5, 1.0)]
}

graph4_target = 5
graph4_pos = {0: [0, 1], 1: [1, 2], 2: [1, 0], 3: [2, 1], 4:[2, 0], 5:[3, 1], 6: [3, 0], 7: [4, 0.5]}

fig4, ax4 = plt.subplots()
ebai.draw_graph_structure(graph4_edgedict, graph4_pos, graph4_target, show_weight=True,
    ax=ax4)

```



```

[7]: graph_edgedict = graph4_edgedict
graph_target = graph4_target
graph_pos = graph4_pos

# Write your code
# (1) Initialization
# (1-1) Prepare open_list as STACK, QUEUE, or XXXX(AI-2)
open_list = []
heapq.heapify(open_list)
# - 任意のリストは heapify を経ることで heap として扱えるようになります。
heapq.heappush(open_list, State(0, cost=0, parent_id=-1))
# - open_list は "List(deque) of State" とする。
#   - [] の中に State() を1つだけ入れており、そのリストで deque を初期化している。
# - スタートは常に0番ノードにする。
#   - いったんは cost = 0, parent_id = -1 ということにしておく。
#   - 【重要】cost と parent_id は後で見直しが必要。

# (1-2) Prepare closed_list as DICT
closed_list = dict()
# - closed_list は "Dict of State" とする。
# - cf. This implementaion by dict might be easy and simple one.
#   However, an implementation by list (static table) might
#   be faster. As some algorithm contest, the dict implementation
#   will be caused TLE (Time Limit Exceed)...

# DEBUG
print(f'(1) {open_list=}')
print(f'(1) {closed_list=}')

# -----
# (2) Loop until the open_list is empty
#   (Loop while(if) the open_list is not empty)
loop_count = 0
while len(open_list) > 0 and loop_count < 100:
# - open_list に要素がある限り、ループし続ける
# - 安全のため、loop_count が増えすぎてゐるなら、タイムアウトとして止める。
#   ** 初期の100では、探索対象のグラフによっては少なすぎるかもしれないので、注意. **
# - なお、例年 while 文が苦手という人がいるようですが...
#   while 文は、if 文とほぼ同じです。条件が成立するなら内部を実行する、です。
#   ただし、if 文は内部を実行終えたら、そこで終わるが、while 文は条件判定に戻る。

```



```

# cf. アセンブラで言えば, if でも while でも, beqによる条件分岐があるのは同じだが,
# while は最後に j while_loop を置くことでループ構造を実現する.
# https://www.swlab.cs.okayama-u.ac.jp/~nom/lect/p3/dat/examples/ans-practice5-1.s

loop_count += 1;
print(f'\n----- LOOP = {loop_count}')
```

```

# (3) Set current state for search algorithm
cur_state = heapq.heappop(open_list)    # POP as STACK

# DEBUG
print(f'(3) {cur_state=}')
print(f'(3) {open_list=}')
```

```

# (4) Update closed_list
assert cur_state.id not in closed_list, f'REVISITED: {cur_state.id=} should not in_
↳{closed_list=}'

# - assert は条件を満たしていないときに処理を止める関数です
# - アルゴリズムとして必要なのではなく, 検証 (validation) の一種です.
# - 後述の (7-1) や (7-2) で適切な処理をしていない場合は,
#   ここで "再訪 (revisit)" してしまう場合があります.
# - "再訪" になってしまう場合は, ここで処理を加えるよりは (7) を見直しましょう.
# - ただし... どうしても解決できない (か, 独自に考えているアルゴリズムであり,
#   ここでの再訪相当を適切に処理することにした) なら, この assert を除いてください.
# - それはそれで, 考察できることは増えると思いますので...
```

```

closed_list[cur_state.id] = cur_state

# - closed_list に記録を残します.
# - 本講義で想定しているアルゴリズムであれば, ここでは上書きは起こりません.
# - 上述の通り, アルゴリズムによっては, 何らかの条件分岐が必要かもしれません.
```

```

# DEBUG
print(f'(4) {closed_list=}')
```

```

# (5) Check whether reaching the target (goal) or not
if graph_target in closed_list:
    # Python の独特な条件式です. graph_target と一致する要素が,
    # closed_list のキーに含まれているかどうかのチェックをしています.
```

```

print('\n**** I have reached the target node!!\n')
break

# この終了条件は、今後必要に応じて見直しが必要になるでしょう。
# 【発展】ここで終了しなくても、解説 A3 の経路探索は実現できる。
#           (終了すべきでない、とまでは言っていない。考察課題です。)

# -----
# (6) Find adjacent nodes
candidate_state_nodes = graph_edgedict[cur_state.id]

# - cur_state のノードの隣接ノードは、graph_edgedict を辞書引きすればよい
# - この時点では candidate_state_nodes は (dst_id, weight) のタプルである。

#     DEBUG
print(f'(6) {candidate_state_nodes=}')

# -----
# (7) Update open_list
for _dst_id, _weight in candidate_state_nodes:
    candidate_state = State(
        id=_dst_id,
        cost=_weight + cur_state.cost,      # TODO: 解説 A5 & A6 (AI-2)
        parent_id=cur_state.id # TODO: 解説 A3
    )

    # - for ループを使い、候補となるノードを追加したい。効率は無視。
    #   - 候補となるノードは、[解説 A2] 時点では、id (ノード ID) しか情報を持っていない。
    #   - parent_id は、次の [解説 A3] で考え直す必要がある。
    #   - cost は、AI-2 で考え直す必要がある。
    #   - 以降、_candidate_node を open_list に追加してよいかどうか、
    #     を判定してから、最終的に、open_list へ追加する。

# (7-1) Ignore the candidate, if it existing in closed_list
# Note: We should reconsider this process, if try to implement A* algorithm
if candidate_state.id in closed_list:
    continue

    # - closed_list は dict 型なので in 演算子で存在の判定ができる
    # - _dst_id が探索済みのノード (closed_list 内のノード) である
    #   ==> open_list には追加しない。
    #   ==> "continue" により、以降の処理は実行せず、for ループを継続する

# (7-2) Ignore the candidate, if it existing in open_list

```

```

# Note: We must reconsider this process at AI-2
_exist_state = [x for x in open_list if x.id == candidate_state.id]
_exist_state = _exist_state[0] if _exist_state else None
if _exist_state is None:
    # - 本講義だけでは、この3行の条件判定の解説は難しいので、深入りしないで構いません。
    # - この処理では、open_list 内の全探索状態に candidate_state.id と同じ IDがあれば、
    #   _exist_state として、open_list の1要素が得られます。無ければ None です。

    heapq.heappush(open_list, candidate_state)

elif candidate_state.cost < _exist_state.cost:
    open_list.remove(_exist_state)
    open_list.append(candidate_state)
    heapq.heapify(open_list)
else:
    pass
    # - open_list に _dst_id と同じ id の状態データが存在する
    #   ==> (AI-1では) open_list には追加しない。
    #
    # 【重要】AI-2で cost も踏まえた再検討をする。次回の Tutorial 3 も注意深く確認しよう。

print(f'(7) {open_list=}')

# -----

#
# Backtracking
#
def backtrack(closed_list, graph_target, graph_start):
    """ BACKTRACK
    PARAMETERS
    -----
    closed_list
        グラフ探索で得られたクローズドリスト
    graph_target
        グラフ探索におけるゴールとなるノードの ID
    graph_start (default: 0)
        グラフ探索におけるスタートとなるノードの ID

    RETURNS

```

```

-----
????
    ???
????
    ???

```

NOTE

```
----
```

- `return` は各自で考えよう.
- 何も戻さない方針なら `return` 文をなくして, 上記 `RETURNS` については, `None` とでも書いておけばよい

```
"""
```

```
# parameters
```

```
route = deque([])
```

- # - `route` にノード情報を追加していく.
- # - 追加と利用の考え方は, システムプログラミングの関数呼び出しにおけるスタックと同じ考え方.

```
bt_node_id = graph_target
```

- # - ゴールから逆にたどるので, ゴールのノード番号を入れておく
- # - `bt` は *backtracking* の略です.

```
# Debug
```

```
print(f'DEBUG: {bt_node_id=}')

```

```
while bt_node_id >= 0:
```

- # - 本資料では, ソースノードは, 常に 0 番ノードと仮定していることを思い出そう.
- # - ソースノードは, *Backtracking* 処理におけるゴールに相当する.
- # - `!= 0` でも問題はないが... もう少し考えてみよう
- # - 実際のところ, (正常な) ノード `ID` としては, 正の値しか使っていない.
- # - そこで, 先を見越して, 広く設定しておこう. この条件ならば「正常でない」の意味で,
- # - マイナス番号のノード `ID` をプログラマが意図的に利用することもできる.

```
route.appendleft(bt_node_id)
```

- # - 先頭に追加していく.

```
# Debug
```

```
print(f'DEBUG: {route=}')

```

```
bt_node_id = closed_list.get(bt_node_id, State(id=-1, cost=-1, parent_id=-9)).
```

```
parent_id
```

- # - `dict.get` は, 辞書引きをする際に `key` が見つからなければ, 第 2 引数を `default` 値としてを返

す

```

    # Debug
    print(f'DEBUG: {bt_node_id=}')

    if bt_node_id <= graph_start:
        # a) Backtracking 成功は, どんな条件になるでしょうか?
        # 自分で if 文を書き換えてください.
        # Backtracking 成功
        print(f'Backtracking: Success: Route = {list(route)}')
    else:
        # Backtracking 失敗
        print(f'Backtracking: Failed: Route = {list(route)}?')

    # Debug
    print('\n-----')

    return list(route)

    # b) 何を返すのがよいか, は自分でよく考えてください.
    # (何も返さないという方針も当然あり得ますが, 考えを示す必要があります.)

#
# Test your function
#
print(f'DEBUG: {graph_target=}')
display(closed_list)

# - 探索 "成功" 時の closed_list を使います. セルの中でも, 簡単に中身を確認しておくといいでしょう.
# - なお, "成功" していないときの動作は, 未定義です. 所望の Backtracking の結果は得られないでしょう.

print('TEST BACKTRACKING -----')
true_rute = backtrack(closed_list, graph_target, 0)

# - 関数のデバッグをしたいなら, 右サイドバーの虫アイコンを押して, デバuggを起動し,
# ブレークポイント設置とステップ実行をするとよいでしょう.

# DEBUG: draw the Graph
ebai.draw_graph_structure(graph_edgedict, graph_pos, graph_target, open_list=open_list,
                           show_weight=True,
                           highlight_path=true_rute,
                           closed_list=closed_list)

# - 先ほどの描画例に加えて, open_list, closed_list も追加している
# - 適宜, 引数を与えずに描画するなどして, 描かれた図の各シンボルが
# 何を表しているのか, 理解をしてください.
# - ループ込みの完成版であれば, ループ内で毎回描画するのは, 無駄である.

```

```
# 必要な場所でのみ、描画すれば十分であろう.
# *****
# 【注意】
# fig?.savefig() を利用した画像保存をする際は、十分に注意を払ってください.
# ループ内での savefig() 呼び出しは、大量のネットワーク経由のデータ転送と、
# 共有ディスクの大量消費をする可能性があり、ほかの学生の受講の妨げになります.
# (あなたの端末だけでなく、演習室の全端末がハングアップする可能性があります.)
# *****
```

```
# Show the Result of Backtracking
```

```
(1) open_list=[State(id=0, cost=0, parent_id=-1)]
(1) closed_list={}

----- LOOP = 1
(3) cur_state=State(id=0, cost=0, parent_id=-1)
(3) open_list=[]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1)}
(6) candidate_state_nodes=[(1, 1.0), (2, 2.0)]
(7) open_list=[State(id=1, cost=1.0, parent_id=0), State(id=2, cost=2.0,
parent_id=0)]

----- LOOP = 2
(3) cur_state=State(id=1, cost=1.0, parent_id=0)
(3) open_list=[State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0)}
(6) candidate_state_nodes=[(2, 3.0), (3, 4.0)]
(7) open_list=[State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), State(id=3, cost=5.0,
parent_id=1)]

----- LOOP = 3
(3) cur_state=State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)
(3) open_list=[State(id=3, cost=5.0, parent_id=1)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0)}
(6) candidate_state_nodes=[(1, 3.0), (4, 2.0)]
(7) open_list=[State(id=4, cost=4.0, parent_id=2), State(id=3, cost=5.0,
parent_id=1)]

----- LOOP = 4
```

```

(3) cur_state=State(id=4, cost=4.0, parent_id=2)
(3) open_list=[State(id=3, cost=5.0, parent_id=1)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2)}
(6) candidate_state_nodes=[(2, 3.0), (3, 3.0), (6, 2.0)]
(7) open_list=[State(id=3, cost=5.0, parent_id=1), State(id=6, cost=6.0,
parent_id=4)]

```

----- LOOP = 5

```

(3) cur_state=State(id=3, cost=5.0, parent_id=1)
(3) open_list=[State(id=6, cost=6.0, parent_id=4)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 3: State(id=3, cost=5.0, parent_id=1)}
(6) candidate_state_nodes=[(1, 1.0), (4, 5.0), (5, 4.0)]
(7) open_list=[State(id=6, cost=6.0, parent_id=4), State(id=5, cost=9.0,
parent_id=3)]

```

----- LOOP = 6

```

(3) cur_state=State(id=6, cost=6.0, parent_id=4)
(3) open_list=[State(id=5, cost=9.0, parent_id=3)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 3: State(id=3, cost=5.0, parent_id=1), 6: State(id=6, cost=6.0,
parent_id=4)}
(6) candidate_state_nodes=[(4, 1.0), (7, 1.0)]
(7) open_list=[State(id=7, cost=7.0, parent_id=6), State(id=5, cost=9.0,
parent_id=3)]

```

----- LOOP = 7

```

(3) cur_state=State(id=7, cost=7.0, parent_id=6)
(3) open_list=[State(id=5, cost=9.0, parent_id=3)]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 3: State(id=3, cost=5.0, parent_id=1), 6: State(id=6, cost=6.0,
parent_id=4), 7: State(id=7, cost=7.0, parent_id=6)}
(6) candidate_state_nodes=[(5, 1.0)]
(7) open_list=[State(id=5, cost=8.0, parent_id=7)]

```

----- LOOP = 8

```

(3) cur_state=State(id=5, cost=8.0, parent_id=7)
(3) open_list=[]
(4) closed_list={0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1), 1: State(id=1, cost=1.0,
parent_id=0), 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0), 4: State(id=4, cost=4.0,
parent_id=2), 3: State(id=3, cost=5.0, parent_id=1), 6: State(id=6, cost=6.0,
parent_id=4), 7: State(id=7, cost=7.0, parent_id=6), 5: State(id=5, cost=8.0,
parent_id=7)}

```

**** I have reached the target node!!

DEBUG: graph_target=5

```

{0: State(id=0, cost=0, parent_id=-1),
 1: State(id=1, cost=1.0, parent_id=0),
 2: State(id=2, cost=2.0, parent_id=0),
 4: State(id=4, cost=4.0, parent_id=2),
 3: State(id=3, cost=5.0, parent_id=1),
 6: State(id=6, cost=6.0, parent_id=4),
 7: State(id=7, cost=7.0, parent_id=6),
 5: State(id=5, cost=8.0, parent_id=7)}

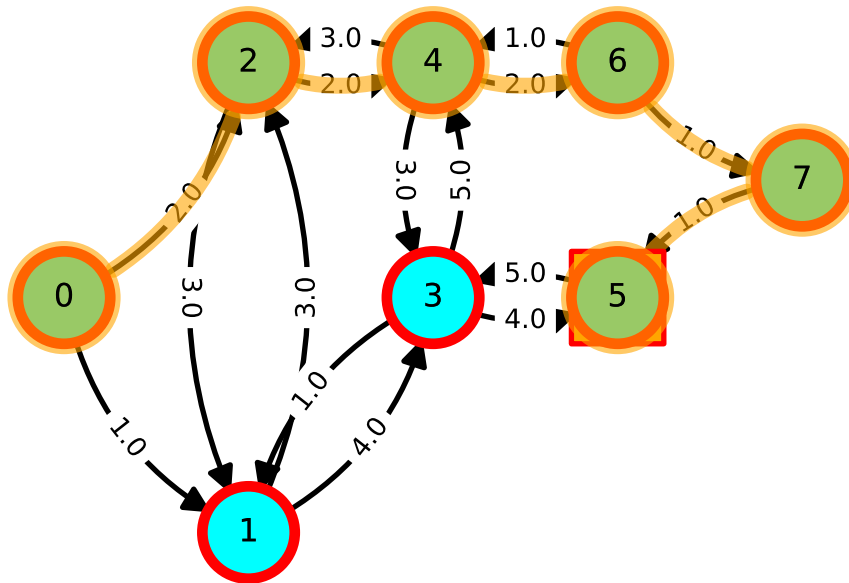
```

TEST BACKTRACKING -----

```

DEBUG: bt_node_id=5
DEBUG: route=deque([5])
DEBUG: bt_node_id=7
DEBUG: route=deque([7, 5])
DEBUG: bt_node_id=6
DEBUG: route=deque([6, 7, 5])
DEBUG: bt_node_id=4
DEBUG: route=deque([4, 6, 7, 5])
DEBUG: bt_node_id=2
DEBUG: route=deque([2, 4, 6, 7, 5])
DEBUG: bt_node_id=0
DEBUG: route=deque([0, 2, 4, 6, 7, 5])
DEBUG: bt_node_id=-1
Backtracking: Success: Route = [0, 2, 4, 6, 7, 5]

```



4.2.2 実行結果に対する説明と考察

アルゴリズムには変更を加えていない．実際に適応してみると，想定 of 最短経路を導出している．

5 D) 考察

Dijkstra's algorithm は幅優先探索のアルゴリズムに重みの計算を付け加えたアルゴリズムである．常に最小のコストとなるように経路を選択してゆく．open_list に記録する際に同じ id に直面したとき，cost が小さければ上書きする．

今回のアルゴリズムにおいてはヒープを用いた実装となっている．この場合，計算量としては $O(m \log(n))$ (m は辺の数， n は頂点の数) となる．ヒープを使わずにキューで全頂点を探索するアルゴリズムにおいては $O(m + n^2)$ の計算量が必要となる．ここから， $[m < n^2]$ においてはヒープを用いたアルゴリズムのほうが効率が良いとわかる．今回扱った問題では， $(m, n^2) = (16, 64)$ より，効率よく探索できているといえる．

幅優先探索においては，キューに入れられた順番に探索してゆくので C2) のパターンでは， $[6, 7]$ を探索する前にアルゴリズムが終了してしまう．またその経路も， $[0, 1, 3, 5]$ のように高いコストの経路となる．しかしその分，探索にかかる時間は早い．ダイクストラ法では確実な最短経路が求まるが探索に時間がかかる．

6 E) 発展課題の検討と考察

6.1 E-1) (Extra-A) グリッド型迷路の利用

6.1.1 ソースコード

[7]: # 本実験でほぼ毎回利用するライブラリ

```
import sys
import numpy as np

import IPython
import IPython.display
from IPython.display import display, Markdown

import matplotlib
from matplotlib import pyplot as plt # hoge

# 人工知能実験で利用
from collections import deque
from dataclasses import dataclass
import networkx as netx

#
# DEBUG
#
print('*** System Information ***')
print(f'Python      : {sys.version}')
print(f'NumPy       : {np.__version__}')
print(f'Matplotlib  : {matplotlib.__version__}')
print(f'NetworkX    : {netx.__version__}')
```

*** System Information ***

```
Python      : 3.12.3 (main, Aug 14 2025, 17:47:21) [GCC 13.3.0]
NumPy       : 2.3.2
Matplotlib  : 3.10.5
NetworkX    : 3.5
```

[8]: %reload_ext autoreload

```
%autoreload 1
%aimport ebai
```

```
# 人工知能実験用の補助関数を定義したサブライブラリ (改変不可)
```

```
import ebai
ebai.ebai_info()

display(Markdown("** 要確認：Revision 2025.1 以上が必要です **"))
```

```
/home/users/ecs/09B23523/exp-b/ai/ebai.py
> Revision 2025.1
> 更新日時：2025-10-03 11:18:05.715802
>
> Python      : 3.12.3 (main, Aug 14 2025, 17:47:21) [GCC 13.3.0]
> NumPy       : 2.3.2
> Matplotlib  : 3.10.5
> NetworkX    : 3.5
```

要確認：Revision 2025.1 以上が必要です

```
[9]: import ipywidgets

#%matplotlib inline
%matplotlib widget
#%matplotlib qt

# - このセルは少し特殊な意味を持っています。
#   - inline を指定
#     - Jupyter Lab の標準の挙動です。入力セルの直下に描画されます。
#     - inline ではインタラクティブ（対話的）な動作ができません＝（B）は実行不可
#   - widget（または ipympl）を指定
#     - Jupyter Lab の output 内に描画されますが、少しリッチな画面になります。
#   - qt を指定
#     - plot（subplots）のたびに別ウィンドウが立ち上がります
# - 標準以外では、描画がおかしくなる可能性もありますので、注意してください。
#   - Extra-A までの内容ならば、このセルはすべてコメントアウトしていても問題ありません。

#
# DEBUG
#
print('*** System Information ***')
print(f'ipywidgets : {ipywidgets.__version__}') # <-- NEW!!
print(f'{matplotlib.get_backend()=}')
print(f'{matplotlib.rcsetup.all_backends=}')
print(f'{matplotlib.rcsetup.interactive_bk=}')
```

```

*** System Information ***
ipywidgets : 8.1.7
matplotlib.get_backend()='widget'
matplotlib.rcParams.all_backends=['gtk3agg', 'gtk3cairo', 'gtk4agg', 'gtk4cairo',
'macosx', 'nbagg', 'notebook', 'qtagg', 'qtcairo', 'qt5agg', 'qt5cairo',
'tkagg', 'tkcairo', 'webagg', 'wx', 'wxagg', 'wxcairo', 'agg', 'cairo', 'pdf',
'pgf', 'ps', 'svg', 'template']
matplotlib.rcParams.interactive_bk=['gtk3agg', 'gtk3cairo', 'gtk4agg',
'gtk4cairo', 'macosx', 'nbagg', 'notebook', 'qtagg', 'qtcairo', 'qt5agg',
'qt5cairo', 'tkagg', 'tkcairo', 'webagg', 'wx', 'wxagg', 'wxcairo']

/tmp/ipykernel_10788/324554521.py:24: MatplotlibDeprecationWarning: The
all_backends attribute was deprecated in Matplotlib 3.9 and will be removed in
3.11. Use ``matplotlib.backends.backend_registry.list_builtin()`` instead.
    print(f'{matplotlib.rcParams.all_backends=}')

/tmp/ipykernel_10788/324554521.py:25: MatplotlibDeprecationWarning: The
interactive_bk attribute was deprecated in Matplotlib 3.9 and will be removed in
3.11. Use ``matplotlib.backends.backend_registry.list_builtin(matplotlib.backends
.BackendFilter.INTERACTIVE)`` instead.
    print(f'{matplotlib.rcParams.interactive_bk=}')

```

```

[10]: maze_def_str = """
1 0 1 1 1 1 1 0 1
1 0 0 0 0 0 1 0 1
1 1 1 1 1 1 1 0 1
1 0 0 0 0 0 1 0 1
2 0 2 1 2 0 1 1 1
3 0 0 0 3 0 0 0 1
4 5 6 7 1 1 1 1 1
0 0 1 0 1 0 1 0 0
1 1 1 0 1 0 1 1 1
"""

# 迷路の定義です.
# - (古めの?)RPGやシミュレーションゲームにおけるマス目マップをイメージしてください.
# - 簡単のため, 常に左上 (0,0) がスタートです.
# - 1 以上は, その数値の遷移コストを支払って移動できるマスです.
#   - 数字は, 整数で指定, かつ 8 以下を指定, としてください.
#   - 0 は通れないマスです.

maze_goal = (3-1, 5-1)

# 迷路のゴールです.
# - python のリストの流儀に倣って 0 始まりの座標を指定する必要があります.

```

- "-1" をわざわざ書いているのは、1 始まりで指定された座標からの変換を明示しています。

Compile the maze_string to graph definitions

```
maze = ebai.MazeGraph(maze_def_str, maze_goal)
```

意味は *Shift + Tab* でヘルプを確認してください。

DEBUG

- 図番号や図のサイズは適当に調整してください...

```
fig1 = plt.figure(1, figsize=(10, 4), layout='constrained', clear=True)
```

```
_gs = matplotlib.gridspec.GridSpec(1, 2, figure=fig1, width_ratios=[1, 3])
```

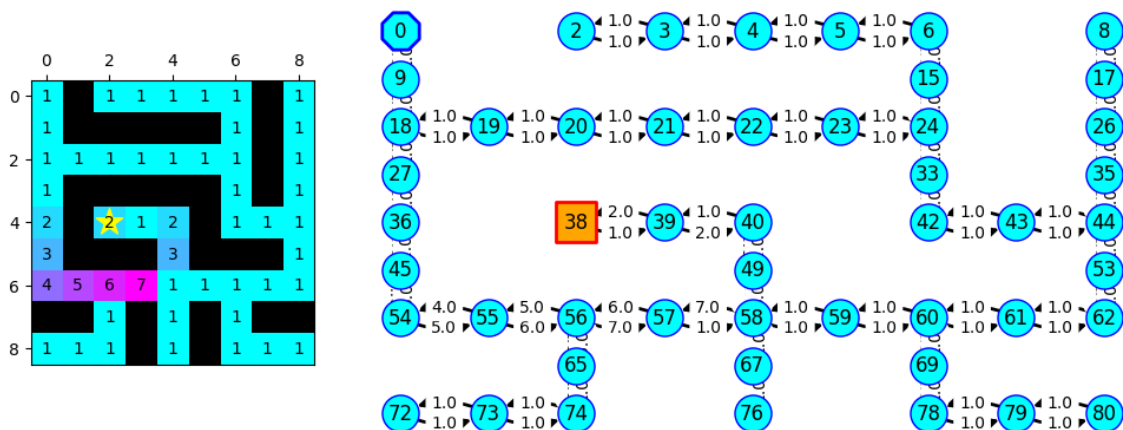
```
ax1 = fig1.add_subplot(_gs[0]), fig1.add_subplot(_gs[1])
```

```
maze.draw_maze(ax=ax1[0])
```

```
maze.draw_graph(ax=ax1[1], show_weight=True, nscale=0.5)
```

- *nscale* は、ノードの描画サイズを変える (0.8 なら 0.8 倍の大きさ) オプションです。

```
plt.show()
```



```
[12]: import heapq
@dataclass
class State:
    id: int
    cost: float
    parent_id: int
    def __lt__(a, b):
        if a.cost != b.cost:
            return a.cost < b.cost
```

```
[13]: def dijkstra(graph_edgedict, graph_target, graph_start):
    """ ダイクストラ法によるグラフ探索

    Parameters
    -----
    ??
        探索対象のグラフの ?? (注：本セル先頭に書かれている _1 や _2 も自分で書き換えてください)
    ??
        探索対象のグラフの ??

    Returns
    -----
    closed_list
        探索処理によって構築された探索木 (探索結果)

    Note
    ----
    - 自分の Dijkstra's algorithm の実装を書き写してください.
      - 15 x 15 = 225 nodes の音声認識グラフを探索すると, 160 回ぐらいのループになります.
        AI-2 で動作を十分検証しているのであれば, 不要な print は, 全てコメントアウトしましょう.
      - また, ループ中に描画をすると大変なことになる可能性が高いです.
        PRACTICE として「最後のみ描画する」と指示をしているので, そんなことになる人は少ないはずですが・・・
    - 戻り値について
      - 少なくとも, 後で Backtracking をするための情報を戻す必要はあります.
      - 念のため補足しておきますが, 「経路は探索結果 (の一つ) である」は真ですが, 「探索結果は経路である」は偽です.

    """
    open_list = []
    heapq.heapify(open_list)
    heapq.heappush(open_list, State(graph_start, cost=0, parent_id=-1))
    closed_list = dict()

    loop_count = 0
    while len(open_list) > 0 and loop_count < 200:
        loop_count += 1
        cur_state = heapq.heappop(open_list)
        closed_list[cur_state.id] = cur_state

        if graph_target in closed_list:
            break

        candidate_state_nodes = graph_edgedict[cur_state.id]
```

```

for _dst_id, _weight in candidate_state_nodes:
    candidate_state = State(
        id=_dst_id,
        cost=_weight + cur_state.cost,
        parent_id=cur_state.id
    )
    if candidate_state.id in closed_list:
        continue

    _exist_state = [x for x in open_list if x.id == candidate_state.id]
    _exist_state = _exist_state[0] if _exist_state else None
    if _exist_state is None:
        heapq.heappush(open_list, candidate_state)
    elif candidate_state.cost < _exist_state.cost:
        open_list.remove(_exist_state)
        open_list.append(candidate_state)
        heapq.heapify(open_list)
    else:
        pass

return closed_list

# None を返すのは妥当ではありません。皆さんが実装するときは消してください。

```

```

[14]: def backtrack(closed_list, graph_target, graph_start):
    """ 探索結果に対する Backtracking 処理により、スタートからゴールまでの経路を得る
    Parameters
    -----
    closed_list
        探索処理によって構築された探索木（探索結果）
    graph_target
        グラフ探索におけるゴールとなるノードの ID
    graph_start (default: 0)
        グラフ探索におけるスタートとなるノードの ID

    Returns
    -----
    route
        経路
    total_cost

```

コスト

Note

- 自分の *Backtracking* の実装を書き写してください。 (AI-1 解説 A3)
- AI-2の実装を通して：
 - 引数として必要な変数（探索結果として得るべき情報）を理解しているはずです。
 - 経路として戻すべき変数を、*PRACTICE* にて、皆さんは正しく認識してきたはずです。
- コストは、探索「成功」時の、最終ノードのコストです。
 - 探索に失敗した場合、あるいは、*Backtracking* に失敗した場合は、関数としては、" 空配列 " と " 無意味なコスト値 " を返すのが一案となるでしょう。

```
"""
route = deque([])
bt_node_id = graph_target
bt_node_cost = 0

while bt_node_id != graph_start:
    route.appendleft(bt_node_id)
    bt_node_id = closed_list.get(bt_node_id, State(id=-1, cost=-1, parent_id=-9)).
    parent_id
    bt_node_cost += closed_list.get(bt_node_id, State(id=-1, cost=-1, parent_id=-9)).cost

if bt_node_id == graph_start:
    pass
else:
    # Backtracking 失敗
    print(f'Backtracking: Failed: Route = {list(route)}?')

route.appendleft(graph_start)
return list(route), bt_node_cost
```

```
[25]: #
# 利用例
# この利用例が動くように、上記にて dijkstra() や backtrack() を定義してください。
#

# DEBUG
graph_start = 54
closed_list = dijkstra(maze.graph_edgedict, maze.graph_target, graph_start)
route, total_cost = backtrack(closed_list, maze.graph_target, graph_start)
```



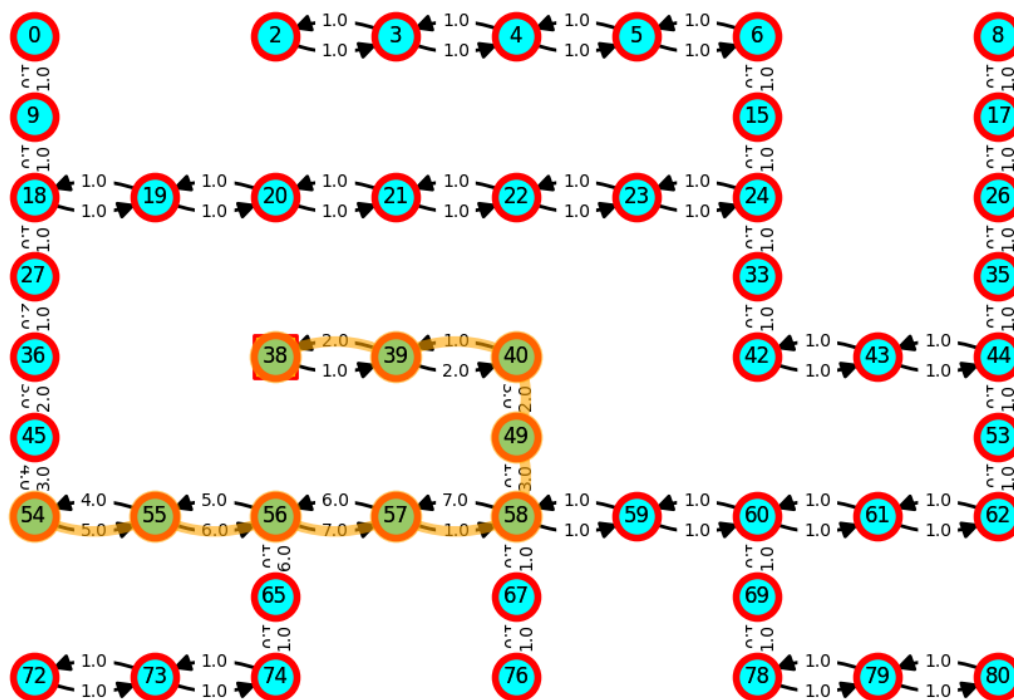
```
# Draw the Graph
fig2, ax2 = plt.subplots(1, 1, figsize=(12, 8), num=2, clear=True)

maze.draw_graph(highlight_path=route, closed_list=closed_list,
                show_weight=True, ax=ax2, nscale=0.5)

plt.show()
```

/tmp/ipykernel_40614/799058931.py:12: UserWarning: Ignoring specified arguments
in this call because figure with num: 2 already exists

```
fig2, ax2 = plt.subplots(1, 1, figsize=(12, 8), num=2, clear=True)
```



6.1.2 実行結果に対する説明と考察

E-1) では、AI-2) までの内容と変わったところがほとんどない。dijkstra 関数、backtrack 関数それぞれの引数に第三の引数として graph_start を渡しているのは、E-2) において使用するからである。

変更したところは、dijkstra 関数では、open_list に最初に入れる状態を graph_start にしたことである。これは初期状態を入れられるようにするためである。backtrack 関数では、バックトラックの終了条件を bt_node_id != graph_start にしたことと、バックトラックの成功判定を bt_node_id == graph_start にしたことである。これはどちらも、ゴールよりも大きい初期状態から始まってもバックトラックできるようにするための判定である。

実際にゴールである 38 を超える初期値から始めてもゴールまでの道のりをバックトラックできている。

6.2 E-2) (Extra-B) 迷路を探索しよう !!

6.2.1 ソースコード

```
[16]: from ipywidgets import Button, Output, Label
      from ipywidgets import GridspecLayout, Layout, HBox, VBox

      if 'fig' in locals():
          fig.clear()
          plt.close(fig)
          del fig

      # PLOTAREA(1): MAP
      figarea = Output()
      with figarea:

          fig, ax = plt.subplots(constrained_layout=True, figsize=(5, 4), num=3, clear=True)
          # fig.canvas.toolbar_position = 'bottom'
          maze.draw_maze(ax=ax)
          plt.show()

      # PLOTAREA(2): CONTROLLER
      buttons = GridspecLayout(2, 3)
      _btn_param = {'width': '60px', 'height': '60px'}
      buttons[0, 1] = Button(description='U', layout=Layout(**_btn_param))
      buttons[1, 0] = Button(description='L', layout=Layout(**_btn_param))
      buttons[1, 1] = Button(description='D', layout=Layout(**_btn_param))
      buttons[1, 2] = Button(description='R', layout=Layout(**_btn_param))
      # note: callback functions will be assign after the robot is initialized.

      txt_log1 = Label(value="History: ")
      txt_log2 = Label(value='FPS: ')
      btn_reset = Button(description='Reset', layout=Layout(width='80px', height='60px'))
      btn_autorun = Button(description='AutoRun', disabled=True, layout=Layout(width='80px',
      height='60px'))
      # AutoRun ボタンは無効化しています。 (disabled=True)
      # 有効化だけでも意味はありません。 次に掲載するプログラム例末尾のコメントを参考にしてください。

      ui_panel = HBox([
          buttons,
          VBox([
```

```

        txt_log1,
        txt_log2,
        HBox([btn_reset, btn_autorun])
    ])
])

all_area = VBox([figarea, ui_panel])
    # VBox を HBox に変えると、地図の右側にコントローラが表示されます。
    # Vertical と Horizontal の違いです。

# Define robot, and assign event-callback functions.
robot = ebai.Robot('example/openmouthrobot.png', maze,
                   fig=fig, ax=ax, zoom=0.2,
                   output=txt_log1)
buttons[0, 1].on_click(robot.req_move_up)
buttons[1, 0].on_click(robot.req_move_left)
buttons[1, 1].on_click(robot.req_move_down)
buttons[1, 2].on_click(robot.req_move_right)
btn_reset.on_click(robot.req_reset)

robot.update_plot(no_wait=False)

# Display all widgets
display(all_area)

```

START [0, 0] / 0

```

VBox(children=(Output(), HBox(children=(GridspecLayout(children=(Button(description='U',
    layout=Layout(grid_ar...

```

[17]: `import time`

```

# Robot's action plan as Queue
# action_plan = deque([])
    # ロボットの行動計画を Queue に入れます。
    # - 適切なモジュールに置き換えれば、スレッドセーフ（他スレッドからも挿入可能）にもできます。
    #   (deque はスレッドセーフではない。その代わり、シングルスレッドで高速な動作を実現できることが多い。
)
    # - この経路は、説明のため、適当に与えていますので、最善ではないかもしれません。念のため。
def mat_to_pos(pos):
    return pos[1] * 9 + pos[0]

```

```

def pos_to_mat(val):
    y = val // 9
    x = val % 9
    return (x, y)

def path_to_directions(path_vals):
    directions = []
    for i in range(len(path_vals) - 1):
        x1, y1 = pos_to_mat(path_vals[i])
        x2, y2 = pos_to_mat(path_vals[i+1])
        dx, dy = x2 - x1, y2 - y1

        if dx == 1 and dy == 0:
            directions.append('R')
        elif dx == -1 and dy == 0:
            directions.append('L')
        elif dx == 0 and dy == 1:
            directions.append('D')
        elif dx == 0 and dy == -1:
            directions.append('U')
        else:
            directions.append('?') # 不明な移動（斜めや飛び越え）
    return directions

def robot_autorun(*args):
    # 関数外にある action_plan 変数を使います.
    # global action_plan

    cur_mat = robot._position
    cur_pos = mat_to_pos(cur_mat)
    closed_list = dijkstra(maze.graph_agedict, maze.graph_target, cur_pos)
    route, total_cost = backtrack(closed_list, maze.graph_target, cur_pos)

    action_plan = deque(path_to_directions(route))

    # Refresh rate
    INTERVAL = 1.0 / 5.0 # [sec]
    # 画面更新のインターバルを決めておきます
    # - JupyterLab 環境だと 10 FPS も出せたら万々歳・・・かな.
    # - なお, 今回はロボットの速度は 1.0 [cell/frame] で固定しています.

```

```
# - 1 時刻フレームごとに、1マス進むの意味です。
# - 5 FPS なら、1秒に5マス進みます。言い換えると、0.2秒ごとに1マス進みます。
# - 滑らかに動くアニメーションのためには、画面上のキャラクターは1マス単位ではなく、
#   より細かく移動中も描画したほうが良いですが・・・さすがに講義のレベルを超える
#   プログラムになるので、今回は入れていません。（本実験の目的とも合致しません）
```

```
# Dequeue from the action queue, wait a shorttime, and do the action
```

```
_last_time = time.perf_counter()
```

```
while len(action_plan) > 0:
```

```
    # wait していることを除けば、どこかで見たような while ループでしょう。
```

```
    # --> グラフ探索のループはどういう構造だったのでしょうか？
```

```
# Redraw: Message pump for the rendering thread
```

```
fig.canvas.flush_events()
```

```
    # - 他スレッドへの意識なしにループすると、計算処理に CPU が 100% 利用されるため、
```

```
    #   処理優先度の低い描画処理が後回しになる --> ループが終わるまで描画されない
```

```
    #   (オペレーティングシステムのタイムスライス機構も思い出そう！)
```

```
    # - ほとんどの言語系では、sleep() 関数で代用できることも多いことは覚えておくとよい。
```

```
    # --> 無限ループで異常に PC が重くなる時は、ループ内に sleep() を入れる！！
```

```
#
```

```
# wait timer
```

```
#
```

```
if (_interval := (time.perf_counter() - _last_time)) < INTERVAL:
```

```
    continue
```

```
_last_time = time.perf_counter()
```

```
    # 次のタイマー待ちのため、ここで現在時刻を再入手します。
```

```
    # 5 FPS で描画をするなら、計算処理を含めて、0.2秒 (200 ms) しか使えません。
```

```
# ---
```

```
txt_log2.value = f'FPS: {1./_interval:.1f} FPS'
```

```
    # これは画面に FPS を表示するための処理。
```

```
    # タイマー処理に必須というわけではありません。
```

```
#
```

```
# Process: run your action
```

```
#
```

```
action = action_plan.popleft()
```

```
robot.req_move(action)
```

```
    # キューから次のアクションを取り出し、ロボットに与えます。
```

```

# Test move
# robot_autorun()

# 参考：
# 上 1 行はコメントアウトして、以下の 2 行でボタンにイベントを割り付けてみるのも手です。
btn_autorun.on_click(robot_autorun)
btn_autorun.disabled = False

# # 少し注意点を.
# # - 結びつける関数（コールバック関数）は引数を受け取れるようにする必要があります.
# #   (robot_autorun() 関数定義で使いもしない引数 *arg が書いてあるのは、そのため. )
# # - action_plan はキューなので、robot_autorun() が終わった後は空っぽです.
# #   - GUI の上で再実行したいなら、キューに改めて挿入する必要があります.
# #   - 例えば、ロボットの現在位置からゴールまで (再) 探索する ... とかです.

```

6.2.2 実行結果に対する説明と考察

E-1) における変更は、ここでロボットを任意の地点からオートランできるようにするためである。autorun をクリックされたときのロボットの状態を取得し、それを初期値をして dijkstra 関数や backtrack 関数に渡せばロボットがどこからでもゴールに到達することができる。

ebai.py ファイルにおいてロボットの状態が、

```

[18]: def update_position(self, offset_x:int=0, offset_y:int=0):
        """
        Parameters
        -----
        offset_x : int
            x 方向の移動量
        offset_y : int
            y 方向の移動量

        Note
        ----
        - 外部から呼び出すことは期待されていない。`req_XXX` を介して移動すること。
        - 移動に失敗した場合もその場所のコストを負う
        """
        assert np.abs(offset_x) <= 1
        assert np.abs(offset_y) <= 1

        _x = self._position[0] + offset_x

```

```

_y = self._position[1] + offset_y
xmax, ymax = self._maze.size()
if (_x < 0) or (_y < 0) or (_x >= xmax) or (_y >= ymax):
    self._add_cost()
    return False

if self._maze.maze_def[_y][_x] != 0:
    self._position[0] = _x
    self._position[1] = _y
    self._add_cost()
    return True

self._add_cost()
return False

```

上記のように管理されていることがわかる。よって `robot._position` で現在位置が取得できる。

また、`mat_to_pos(pos)` 関数、`pos_to_mat` 関数、`path_to_directions` 関数はそれぞれ、タプル (現在位置) を数値 (`graph_start`) に、数値をタプルに、配列 (`backtrack` による探索ルート) を文字 (移動方向 ('U','D','R','L')) に変換する関数である。これらは、扱う型の異なる関数のインターフェイスとして機能する。

6.3 E-3) (Extra-C) A* algorithm による探索の実装

6.3.1 ソースコード

```

[11]: import heapq
import math

# A* アルゴリズムのためのデータクラス
@dataclass
class Astate:
    id: int
    cost: float
    # eval_score = f(n) = g(n) + h(n)
    eval_score: float
    parent_id: int

# ヒープの優先順位は g(n) + h~(n) が小さい順
def __lt__(a, b):
    a_sum = a.eval_score
    b_sum = b.eval_score
    if a_sum != b_sum:
        return a_sum < b_sum

```

```
def pos_to_mat(val):
    y = val // 9
    x = val % 9
    return (x, y)
```

```
[12]: # マンハッタン距離
# def heuristic_func(node_a, node_b):
#     ax, ay = pos_to_mat(node_a)
#     bx, by = pos_to_mat(node_b)
#     return abs(ax - bx) + abs(ay - by)

# ユークリッド距離
# def heuristic_func(node_a, node_b):
#     ax, ay = pos_to_mat(node_a)
#     bx, by = pos_to_mat(node_b)
#     return math.sqrt((ax - bx)**2 + (ay - by)**2)

# マンハッタン距離 + bias ver1
def heuristic_func(node_a, node_b):
    ax, ay = pos_to_mat(node_a)
    bx, by = pos_to_mat(node_b)
    return abs(ax - bx) + abs(ay - by)**3

# マンハッタン距離 + bias ver2
# def heuristic_func(node_a, node_b, cost):
#     ax, ay = pos_to_mat(node_a)
#     bx, by = pos_to_mat(node_b)
#     return abs(ax - bx) + abs(ay - by)**3 + cost**1.5

# ユークリッド距離 + 指数
# def heuristic_func(node_a, node_b):
#     ax, ay = pos_to_mat(node_a)
#     bx, by = pos_to_mat(node_b)
#     distance = math.sqrt((ax - bx)**2 + (ay - by)**2)
#     return math.pow(1.6, distance)

# ユークリッド距離の自然対数とマンハッタン距離を合計した値
# def heuristic_func(node_a, node_b):
#     ax, ay = pos_to_mat(node_a)
#     bx, by = pos_to_mat(node_b)
```



```
#    manhattan = abs(ax - bx) + abs(ay - by)
#    euclidean = math.sqrt((ax - bx)**2 + (ay - by)**2)
#    h_score = euclidean + manhattan
#    return h_score
```

```
[13]: def Astar(graph_edgedict, graph_target, graph_start):
    open_list = []
    heapq.heapify(open_list)
    heapq.heappush(open_list, Astate(graph_start, cost=0, eval_score =
    ➔ heuristic_func(graph_start, graph_target), parent_id=-1))
    closed_list = dict()

    loop_count = 0
    while len(open_list) > 0 and loop_count < 200:
        loop_count += 1
        cur_state = heapq.heappop(open_list)

        # 処理 5 の改造 取り出した id がゴールなら探索終了
        if cur_state.id == graph_target:
            closed_list[cur_state.id] = cur_state
            break

        closed_list[cur_state.id] = cur_state

        candidate_state_nodes = graph_edgedict[cur_state.id]

        for _dst_id, _weight in candidate_state_nodes:
            g_new = cur_state.cost + _weight
            h_new = heuristic_func(_dst_id, graph_target)
            candidate_state = Astate(
                id=_dst_id,
                cost=g_new,
                eval_score=g_new+h_new,
                parent_id=cur_state.id
            )

            if candidate_state.id in closed_list:
                # 処理 7-1 の改造 探索してきた経路が最短とは限らないから、取り出す作業
                if g_new < closed_list.get(candidate_state.id, Astate(id=-1, cost=-1,
                ➔ eval_score = 0, parent_id=-9)).cost:
```

```

        # dict 型の削除方法
        del closed_list[candidate_state.id]
        candidate_state.eval_score = g_new + h_new
        heapq.heappush(open_list, candidate_state)
        continue

    _exist_state = [x for x in open_list if x.id == candidate_state.id]
    _exist_state = _exist_state[0] if _exist_state else None
    if _exist_state is None:
        heapq.heappush(open_list, candidate_state)
    # A* では,  $g(n)+h(n)$  で評価する
    elif candidate_state.eval_score < _exist_state.eval_score:
        open_list.remove(_exist_state)
        heapq.heappush(open_list, candidate_state)
    else:
        pass

return closed_list

```

```

[14]: def A_backtrack(closed_list, graph_target, graph_start):
    route = deque([])
    bt_node_id = graph_target
    bt_node_cost = 0

    while bt_node_id != graph_start:
        route.appendleft(bt_node_id)
        bt_node_id = closed_list.get(bt_node_id, Astate(id=-1, cost=-1, eval_score = 0,
        ↪parent_id=-9)).parent_id
        bt_node_cost += closed_list.get(bt_node_id, Astate(id=-1, cost=-1, eval_score = 0,
        ↪parent_id=-9)).cost

    if bt_node_id == graph_start:
        pass
    else:
        # Backtracking 失敗
        print(f'Backtracking: Failed: Route = {list(route)}?')

    route.appendleft(graph_start)
    return list(route), bt_node_cost

```

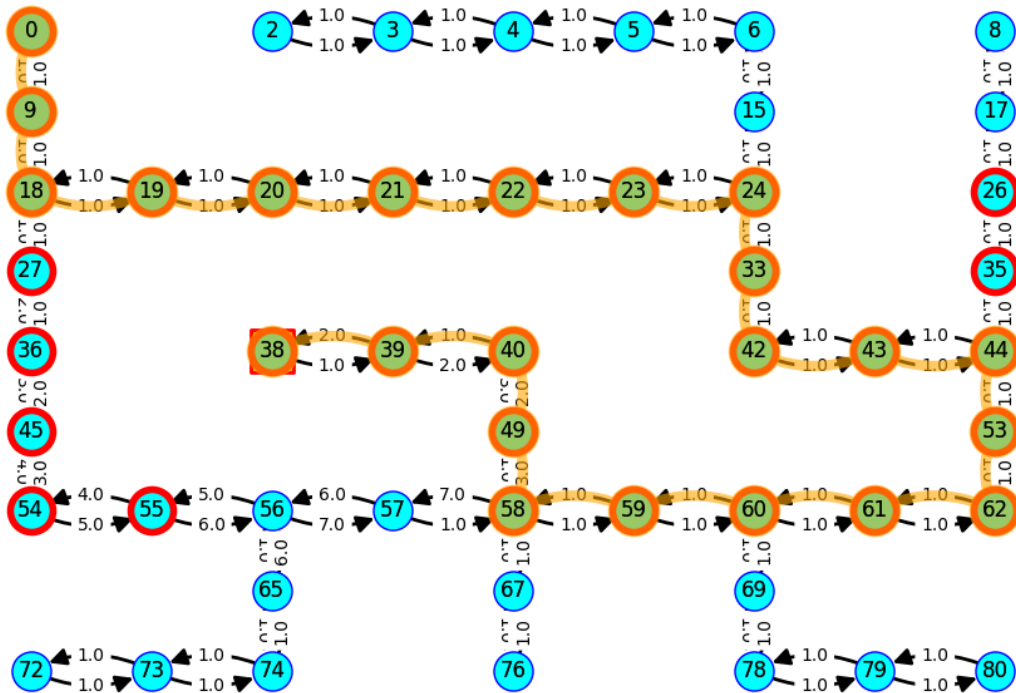
```
[16]: # DEBUG
```

```
graph_start = 0
closed_list = Astar(maze.graph_edgedict, maze.graph_target, graph_start)
route, total_cost = A_backtrack(closed_list, maze.graph_target, graph_start)

# Draw the Graph
fig2, ax2 = plt.subplots(1, 1, figsize=(12, 8), num=2, clear=True)

maze.draw_graph(highlight_path=route, closed_list=closed_list,
                show_weight=True, ax=ax2, nscale=0.5)

plt.show()
```



6.3.2 実行結果に対する説明と考察

dijkstra アルゴリズムを少し変形させることにより A アルゴリズムを設計することができる。State クラスは *eval_score* を設定するために *Astate* という新しいデータクラスを設定した。 *eval_score* は $g(n) + h(n)$ のことである。 A アルゴリズムは評価値の計算に heuristic な値を使用するので、closed_list に格納したとしてもそれが最短の経路であることは保証されない。 よって、コストの低い経路ができ次第、closed_list から open_list に移動させる。

■**heuristic_func の検討** start を 0 としたときを考える。斜め移動を許容しないグラフであるので、マンハッタン距離を $h(n)$ に使用してみる。すると、無駄なノードの探索数が 18 個存在した。そこでお試しとしてユークリッド距離を使用してみたところ、無駄なノードの探索数は 21 個にまで上昇した。これは、グラフの斜めの方向のコストが減少したことによって、より広く探索できるようになったためである。ゴールからみて遠くに存在するノードの探索数を減らしたかったため、先ほどのユークリッド距離を指数にして計算してみた。すると底を 1.7 に設定したときに、無駄なノードの探索数が最小となり、それは 18 個であった。次に、マンハッタン距離とユークリッド距離を足し合わせる方法にした。すると、無駄なノードの探索数は 14 個となった。ダイクストラ法の無駄なノードの探索数が 25 個であったので、かなり効率よく探索できている。

次の方法はあまり美しくないが、今回扱っているグラフの特性を活かしてマンハッタン距離の y 方向のみを過大評価する方法をとった。y 方向のみを 3 乗すると、無駄なノードの探索数は 7 個まで少なくなった。これは、ノード数最短の経路とコスト最小の経路がちょうど同じ y において分岐しているためうまくいった。また、cost を 1.5 乗にして探索を試みた (実際は $h(n)$ にて 1.5 乗で $g(n)$ 分で加算されるため $\text{cost} * 1.5 + \text{cost}$)。すると、無駄なノードの探索数は 5 個まで減少した。この時、start を 54,55 に設定したときのみ最短経路をたどれない。