

Inteligencja Obliczeniowa w Analizie Danych Cyfrowych (IOwADC) - Projekt II

Robert Barcik, Konrad Bodzioch, Dominik Breksa

24/03/2024

1 Cel Ćwiczenia

Zaznajomienie z problemami STRIPS oraz przetestowanie różnych metod rozwiązywania takich z użyciem biblioteki **AIPython**.

2 Opis Domeny STRIPS

Domena STRIPS została stworzona z pomocą bazy domen z repozytorium [github projektu](#).

```
(define (domain air-cargo)
  (:requirements :strips)
  (:predicates (In ?obj ?place)
               (At ?obj ?place)
               (Cargo ?obj)
               (Plane ?obj)
               (Airport ?obj))

  (:action LOAD
    :parameters (?c ?p ?a)
    :precondition (and (At ?c ?a) (At ?p ?a)
                      (Cargo ?c) (Plane ?p) (Airport ?a))
    :effect (and (In ?c ?p) (not (At ?c ?a))))

  (:action UNLOAD
    :parameters (?c ?p ?a)
    :precondition (and (In ?c ?p) (At ?p ?a)
                      (Cargo ?c) (Plane ?p) (Airport ?a))
    :effect (and (At ?c ?a) (not (In ?c ?p))))

  (:action FLY
    :parameters (?p ?from ?to)
    :precondition (and (At ?p ?from)
                      (Plane ?p) (Airport ?from) (Airport ?to))
    :effect (and (At ?p ?to) (not (At ?p ?from))))
)
```

Powyższa notacja opisuje problem **transportu towaru między lotniskami z użyciem samolotów**. Posiada on następujące elementy:

- towar,
- samoloty,
- lotniska.

Stany w naszym problemie opisujemy z użyciem następujących cech:

- **towar jest w samolot**,
- **samolot/towar znajduje się na lotnisko**.

Przyjmujemy również element *null*, gdy towar znajduje się w samolocie, ale nie na lotnisku (oraz na odwrót).

Akcje dozwolone w domenie STRIPS są następujące:

- **LOAD (załadować):** *towar, samolot, lotnisko*; samolot oraz towar muszą być na tym samym lotnisku,
- **UNLOAD (rozładować):** *towar, samolot, lotnisko*; towar znajduje się w samolocie, a samolot na danym lotnisku,
- **FLY (lecieć):** *samolot, lotnisko_start, lotnisko_koniec*; samolot musi znajdować się na lotnisku startowym.

3 Problemy

Poniżej przedstawimy rozwiązywane problemy z użyciem ForwardPlanning z pomiarem statystyk oraz ewentualnym użyciem dodatkowej heurystyki.

3.1 Problem 1

```
# Domain
air_cargo1dom: STRIPS_domain = create_air_cargo_transportation(
    cargo={'c1', 'c2', 'c3', 'c4', 'c5'},
    planes={'p1', 'p2'},
    airports={'sfo', 'jfk', 'lax'},
    cargo_forbidden_airports={'c1': set(), 'c2': set(), 'c3': set(), 'c4':
        set(), 'c5': set()},
    planes_forbidden_airports={'p1': {'lax'}, 'p2': set()},
)

# Initial state
air_setup1: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'sfo',
    At('c2'): 'jfk',
    At('c3'): 'lax',
    At('c4'): 'jfk',
    At('c5'): 'lax',

    At('p1'): 'sfo',
    At('p2'): 'jfk',

    # Airplanes start loaded with cargo to make the problem easier
    In('c1'): 'p1',
    In('c2'): 'p2',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
    In('c5'): 'null',
}

# Goal state
air_goal1: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'jfk',
    At('c2'): 'sfo',
    At('c3'): 'sfo',
    At('c4'): 'lax',
    At('c5'): 'sfo',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
    In('c5'): 'null',
}
```

3.1.1 Zastosowana heurystyka

```
def h_unloaded_cargo(assignment, goal):
    """This heuristic counts the number of cargo that are not yet at their goal
        location. The idea is that the more cargo that are not at their goal, the
        further away we are from the goal state."""
    return sum(1 for k, v in goal.items() if assignment[k] != v and '_is_in' in k)
```

3.1.2 Znalezione rozwiązania

Problem 1 - No heuristic

```
Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at': 'lax',
           'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
           'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in':
           'null', 'c5_is_in': 'null'}

--load_c4_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'lax', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
           'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'lax', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
           'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c4_from_p2_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
           'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
           'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c3_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2',
           'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c5_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2',
           'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo',
           'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2',
           'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at':
           'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk',
           'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2',
           'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
           'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
           'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in':
           'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
           'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
           'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in':
           'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c5_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
           'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'jfk',
           'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in':
           'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
           'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'jfk',
           'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
           'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}

(cost: 11)
16836 paths have been expanded and 39649 paths remain in the frontier
Elapsed time: 376.484786 seconds
```

Problem 1 - With heuristic:

```
Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at': 'lax',
          'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in':
          'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
          'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
          'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c5_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'p2'}
--load_c3_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c4_from_p2_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c5_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'jfk',
          'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at':
          'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
(cost: 11)
9537 paths have been expanded and 27670 paths remain in the frontier
Elapsed time: 133.734086 seconds
```

3.1.3 Statystyki

Bez heurystyki:

- Koszt rozwiązania: 11,
- Przeanalizowane ścieżki: 16836,
- Pozostałe ścieżki: 39649,

- Czas wykonywania: 376.484786 sekund.

Z heurystyką:

- Koszt rozwiązania: 11,
- Przeanalizowane ścieżki: 9537,
- Pozostałe ścieżki: 27670,
- Czas wykonywania: 133.734086 sekund.

3.2 Problem 2

```
# Domain
air_cargo2dom: STRIPS_domain = create_air_cargo_transportation(
    cargo={'c1', 'c2', 'c3'},
    planes={'p1', 'p2', 'p3'},
    airports={'sfo', 'jfk', 'lax', 'ord', 'atl'},
    cargo_forbidden_airports={'c1': set(), 'c2': set(), 'c3': set()},
    planes_forbidden_airports={'p1': {'ord'}, 'p2': {'lax'}, 'p3': set()},
)

# Initial state
air_setup2: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'atl',
    At('c2'): 'ord',
    At('c3'): 'jfk',

    At('p1'): 'sfo',
    At('p2'): 'jfk',
    At('p3'): 'ord',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
}

# Goal state
air_goal2: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'jfk',
    At('c2'): 'sfo',
    At('c3'): 'sfo',

    At('p3'): 'jfk',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
}
```

3.2.1 Zastosowana heurystyka

```
def h_mismatched_planes(assignment, goal):
    """This heuristic counts the number of planes that are not yet at their goal
    location. The idea is that the more planes that are not at their goal, the
    further away we are from the goal state."""
    return sum(1 for k, v in goal.items() if assignment[k] != v and '_is_at' in k
               and 'p' in k)
```

3.2.2 Znalezione rozwiązania

Problem 2 - No heuristic:

Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk',
'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord', 'c1_is_in':
'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--load_c3_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_jfk_to_ord--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'ord', 'p3_is_at':
'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p2'}
--fly_p3_from_ord_to_atl--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'ord', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p2'}
--load_c2_from_ord_to_p2--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'ord', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2'}
--load_c1_from_atl_to_p3--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'ord', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_ord_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2'}
--fly_p3_from_atl_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'p2'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p3_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
(cost: 10)
23636 paths have been expanded and 101904 paths remain in the frontier
Elapsed time: 748.833487 seconds

Problem 2 - With heuristic:

Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk',
'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord', 'c1_is_in':
'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--load_c2_from_ord_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_ord_to_jfk--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'null'}
--load_c3_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_atl--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--load_c1_from_atl_to_p3--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'atl', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_atl_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'sfo', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--unload_c3_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
'sfo', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',

```

        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'sfo', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p3_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
(cost: 10)
18316 paths have been expanded and 93788 paths remain in the frontier
Elapsed time: 469.093306 seconds

```

3.2.3 Statystyki

Bez heurystyki:

- Koszt rozwiązania: 10,
- Przeanalizowane ścieżki: 23636,
- Pozostałe ścieżki: 101904,
- Czas wykonywania: 748.833487 sekund.

Z heurystyką:

- Koszt rozwiązania: 10,
- Przeanalizowane ścieżki: 18316,
- Pozostałe ścieżki: 93788,
- Czas wykonywania: 469.093306 sekund.

3.3 Problem 3

```

# Domain
air_cargo3dom: STRIPS_domain = create_air_cargo_transportation(
    cargo={'c1', 'c2', 'c3', 'c4'},
    planes={'p1', 'p2', 'p3'},
    airports={'sfo', 'jfk', 'lax'},
    cargo_forbidden_airports={'c1': {'lax'}, 'c2': {'jfk'}, 'c3': {'lax'},
        'c4': {'sfo'}},
    planes_forbidden_airports={'p1': {'lax'}, 'p2': {'jfk'}, 'p3': {'sfo'}},
)

# Initial state
air_setup3: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'sfo',
    At('c2'): 'lax',
    At('c3'): 'jfk',
    At('c4'): 'jfk',

    At('p1'): 'sfo',
    At('p2'): 'lax',
    At('p3'): 'jfk',

    # Airplanes start loaded with cargo to make the problem easier
    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
}

# Goal state
air_goal3: dict[str, str] = {

```

```

    At('c1'): 'jfk',
    At('c2'): 'sfo',
    At('c3'): 'sfo',
    At('c4'): 'lax',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
}

```

3.3.1 Zastosowana heurystyka

```

def h_combined(assignment, goal):
    """This heuristic combines the previous two heuristics."""
    return h_unloaded_cargo(assignment, goal) + h_mismatched_planes(assignment,
                                                                    goal)

```

3.3.2 Znalezione rozwiązanie

Problem 3 - No heuristic:

```

Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'lax', 'c3_is_at': 'jfk',
          'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
          'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
          'c4_is_in': 'null'}
--load_c2_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c1_from_sfo_to_p1--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p3'}
--load_c3_from_jfk_to_p1--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
          'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
          'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}

```



```

--fly_p1_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c4_from_p3_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'null'}
--unload_c3_from_p1_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
(cost: 12)
3905 paths have been expanded and 3563 paths remain in the frontier
Elapsed time: 9.582043 seconds

```

Problem 3 - With heuristic:

```

Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'lax', 'c3_is_at': 'jfk',
    'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--load_c1_from_sfo_to_p1--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'lax',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'lax',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c3_from_jfk_to_p1--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'lax',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'lax',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--load_c2_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'lax', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p1_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c4_from_p3_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p1', 'c4_is_in': 'null'}

```

```

--unload_c3_from_p1_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
(cost: 12)
2473 paths have been expanded and 4085 paths remain in the frontier
Elapsed time: 3.133521 seconds

```

3.3.3 Statystyki

Bez heurystyki:

- Koszt rozwiązania: 12,
- Przeanalizowane ścieżki: 3905,
- Pozostałe ścieżki: 3563,
- Czas wykonywania: 9.582043 sekund.

Z heurystyką:

- Koszt rozwiązania: 12,
- Przeanalizowane ścieżki: 2473,
- Pozostałe ścieżki: 4085,
- Czas wykonywania: 3.133521 sekund.

4 Problemy z pod celami

Poniżej przedstawiono problemy zawierające dodatkowe pod-cele do osiągnięcia, również w wariacie z heurystyką i bez. Dla każdego przypadku zastosowano heurystyki równoważne tym z poprzedniego podpunktu adekwatne do danego problemu.

Rozdzielono główny problem na sensowne pod cele, tak aby najpierw wypełnić daną ideę.....

4.1 Pod Problem 1

Podczas definicji poniższego pod celu, spróbowaliśmy maksymalizować daną heurystykę (liczbę ukończonych ładunków). A więc uznaliśmy za sensowne, aby najpierw ukończyć (dostarczyć) pierwsze 3 ładunki ('c1', 'c2' i 'c3').

```

air_sub_problem_1: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'jfk',
    At('c2'): 'sfo',
    At('c3'): 'sfo',
    At('c4'): 'jfk',
    At('c5'): 'lax',

    At('p1'): 'jfk',
    At('p2'): 'sfo',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
    In('c5'): 'null',
}

air_cargo1_sub_problem_1: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo1dom,
    air_setup1, air_sub_problem_1)
air_cargo1_sub_problem_2: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo1dom,
    air_sub_problem_1, air_goal1)

```

4.1.1 Heurystyka

Zastosowano identyczną heurystykę jak dla problemu 1.

4.1.2 Znalezione rozwiązania dla problemu bez heurystyki

```
Problem 1 - Sub Problem 1 - No heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at': 'lax',
          'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
          'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in':
          'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
                             'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
                             'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c3_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
                             'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
                             'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
                             'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
                             'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                              'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
                              'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                              'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
                              'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                              'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                              'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                              'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                              'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'} (cost: 7)
3509 paths have been expanded and 13324 paths remain in the frontier
Elapsed time: 8.347586 seconds
```

```
Problem 1 - Sub Problem 2 - No heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at': 'sfo',
          'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
          'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
          'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                             'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'jfk', 'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                             'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                             'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'jfk', 'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                             'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                             'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                             'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                             'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c4_from_p2_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
                              'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
                              'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c5_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
                              'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
```

```

        'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c5_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'} (cost: 7)
1442 paths have been expanded and 5530 paths remain in the frontier
Elapsed time: 1.710939 seconds

```

4.1.3 Znalezione rozwiązania dla problemu z użyciem heurystyki

```

Problem 1 - Sub Problem 1 - With heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk', 'c3_is_at': 'lax',
        'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in':
        'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
        'c3_is_at': 'lax', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c3_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
        'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
        'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'jfk',
        'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2',
        'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'} (cost: 7)
882 paths have been expanded and 3399 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.767331 seconds

```

```

Problem 1 - Sub Problem 2 - With heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at': 'sfo',
        'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at':
        'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'jfk', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
        'jfk', 'p2_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',

```

```

    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
    'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p2', 'c5_is_in': 'null'}
--unload_c4_from_p2_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'lax', 'p1_is_at':
    'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'}
--load_c5_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
    'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'null', 'p1_is_at':
    'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'p2'}
--unload_c5_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'c5_is_at': 'sfo', 'p1_is_at':
    'jfk', 'p2_is_at': 'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null', 'c5_is_in': 'null'} (cost: 7)
450 paths have been expanded and 1856 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.403290 seconds

```

4.1.4 Statystyki

Bez heurystyki:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 7,
 - Przeanalizowane ścieżki: 3509,
 - Pozostałe ścieżki: 13324,
 - Czas wykonywania: 8.347586 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 7,
 - Przeanalizowane ścieżki: 1442,
 - Pozostałe ścieżki: 5530,
 - Czas wykonywania: 1.710939 sekund.
- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 14,
 - Przeanalizowane ścieżki: 4951,
 - Pozostałe ścieżki: 4951,
 - Czas wykonywania: 10.058525.

Z heurystyką:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 7,
 - Przeanalizowane ścieżki: 882,
 - Pozostałe ścieżki: 3399,
 - Czas wykonywania: 0.767331 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 7,
 - Przeanalizowane ścieżki: 450,

- Pozostałe ścieżki: 1856,
- Czas wykonywania: 0.403290 sekund.
- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 14,
 - Przeanalizowane ścieżki: 1332,
 - Pozostałe ścieżki: 5255,
 - Czas wykonywania: 1.170621.

4.2 Pod Problem 2

W tym przypadku zbudowano pod cel następująco:

- Samolot 'p3', który jest wymagany na lotnisku 'jfk' został przetransportowany w wymagane miejsce za w czasu, zgodnie z przeznaczeniem konstrukcji problemu.
- Pozostałe samoloty ('p1' i 'p2') przebazowały się tak, aby przygotować się na załadunek odpowiednio 'c1' dla 'p1' oraz 'c2' dla 'p2'.

```

air_sub_problem_2: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'atl',
    At('c2'): 'ord',
    At('c3'): 'jfk',

    At('p1'): 'atl',
    At('p2'): 'jfk',
    At('p3'): 'jfk',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
}

air_cargo2_sub_problem_1: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo2dom,
    air_setup2, air_sub_problem_2)
air_cargo2_sub_problem_2: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo2dom,
    air_sub_problem_2, air_goal2)

```

4.2.1 Heurystyka

Zastosowano identyczną heurystykę jak dla problemu 2.

4.2.2 Znalezione rozwiązania dla problemu bez heurystyki

```

Problem 2 - Sub Problem 1 - No heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk',
    'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_ord_to_jfk--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
    'c3_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
(cost: 1)
7 paths have been expanded and 65 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.001275 seconds

```

```

Problem 2 - Sub Problem 2 - No heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk', 'p1_is_at':
    'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in':
    'null', 'c3_is_in': 'null'}

```

```

--load_c3_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at':
    'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk',
    'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_ord--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at':
    'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord',
    'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p3'}
--load_c2_from_ord_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord',
    'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_ord_to_atl--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'atl',
    'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--load_c1_from_atl_to_p3--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'atl', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_atl_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'sfo', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--unload_c3_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'sfo',
    'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'sfo',
    'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p3_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk',
    'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'} (cost: 10)
21166 paths have been expanded and 96059 paths remain in the frontier
Elapsed time: 600.387508 seconds

```

4.2.3 Znalezione rozwiązania dla problemu z użyciem heurystyki

```

Problem 2 - Sub Problem 1 - With heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk', 'p1_is_at':
    'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in':
    'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_ord_to_jfk--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at':
    'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'} (cost: 1)
2 paths have been expanded and 11 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.000342 seconds

```

```

Problem 2 - Sub Problem 2 - With heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord', 'c3_is_at': 'jfk',
    'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--load_c3_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_ord--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'ord',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'p3'}
--load_c2_from_ord_to_p3--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'ord', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_ord_to_sfo--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
    'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'p3'}
--unload_c3_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':

```

```

        'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p3', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p3_to_sfo--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'sfo', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_sfo_to_atl--> {'c1_is_at': 'atl', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'atl', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--load_c1_from_atl_to_p3--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'atl', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--fly_p3_from_atl_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'p3', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p3_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null'}
(cost: 10)
17320 paths have been expanded and 91135 paths remain in the frontier
Elapsed time: 424.487179 seconds

```

4.2.4 Statystyki

Bez heurystyki:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 1,
 - Przeanalizowane ścieżki: 7,
 - Pozostałe ścieżki: 65,
 - Czas wykonywania: 0.001275 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 10,
 - Przeanalizowane ścieżki: 21166,
 - Pozostałe ścieżki: 96059,
 - Czas wykonywania: 600.387508 sekund.
- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 11,
 - Przeanalizowane ścieżki: 21173,
 - Pozostałe ścieżki: 96124,
 - Czas wykonywania: 600.388783.

Z heurystyką:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 1,
 - Przeanalizowane ścieżki: 2,
 - Pozostałe ścieżki: 11,
 - Czas wykonywania: 0.000342 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 10,
 - Przeanalizowane ścieżki: 17320,
 - Pozostałe ścieżki: 91135,
 - Czas wykonywania: 424.487179 sekund.

- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 11,
 - Przeanalizowane ścieżki: 17322,
 - Pozostałe ścieżki: 91146,
 - Czas wykonywania: 1.170621.

4.3 Problem 3

Rozdzielono problem 3, w taki sposób, aby dostarczać poszczególne paczki jedna po drugiej, wykorzystując fakt, że nie wszystkie samoloty mają dostęp do całej planszy lotnisk. (Pierwsze 2 towary będą dostarczone).

```
# Sub goal / initial state
air_sub_problem_3: dict[str, str] = {
    At('c1'): 'jfk',
    At('c2'): 'sfo',
    At('c3'): 'jfk',
    At('c4'): 'jfk',

    At('p1'): 'sfo',
    At('p2'): 'lax',
    At('p3'): 'jfk',

    In('c1'): 'null',
    In('c2'): 'null',
    In('c3'): 'null',
    In('c4'): 'null',
}

air_cargo3_sub_problem_1: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo3dom,
    air_setup3, air_sub_problem_3)
air_cargo3_sub_problem_2: Planning_problem = Planning_problem(air_cargo3dom,
    air_sub_problem_3, air_goal3)
```

4.3.1 Heurystyka

Zastosowano identyczną heurystykę jak dla problemu 3.

4.3.2 Znalezione rozwiązania dla problemu bez heurystyki

```
Problem 3 - Sub Problem 1 - No heuristic:
Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'lax', 'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at':
    'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c2_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--load_c1_from_sfo_to_p1--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
```

```

--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'null', 'c4_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_sfo_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'} (cost: 8)
1461 paths have been expanded and 3436 paths remain in the frontier
Elapsed time: 1.365272 seconds

```

Problem 3 - Sub Problem 2 - No heuristic:

```

Solution: {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at':
    'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk',
    'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'null', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk',
    'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'null', 'c4_is_in': 'p3'}
--load_c3_from_jfk_to_p2--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'jfk',
    'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'p2', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p2_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
    'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'p2', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c4_from_p3_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'null', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
    'sfo', 'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
    'c3_is_in': 'p2', 'c4_is_in': 'null'}
--unload_c3_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
    'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo',
    'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
    'null', 'c4_is_in': 'null'} (cost: 6)
1320 paths have been expanded and 4599 paths remain in the frontier
Elapsed time: 1.240593 seconds

```

4.3.3 Znalezione rozwiązania dla problemu z użyciem heurystyki

Problem 3 - Sub Problem 1 - With heuristic:

```

Solution: {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'lax', 'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at':
    'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
    'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c2_from_lax_to_p2--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
    'c4_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_lax_to_sfo--> {'c1_is_at': 'sfo', 'c2_is_at': 'null', 'c3_is_at':
    'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo', 'p3_is_at':
    'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',

```

```

        'c4_is_in': 'null'}
--load_c1_from_sfo_to_p1--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
        'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'sfo',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'null',
        'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'sfo',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'p2', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null'}
--unload_c2_from_p2_to_sfo--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'sfo',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p2_from_sfo_to_lax--> {'c1_is_at': 'null', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'p1', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null'}
--unload_c1_from_p1_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null'} (cost: 8)
242 paths have been expanded and 934 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.066035 seconds

```

Problem 3 - Sub Problem 2 - With heuristic:

```

Solution: {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at': 'jfk', 'c4_is_at':
        'jfk', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in':
        'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'null'}
--fly_p1_from_sfo_to_jfk--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'jfk', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax', 'p3_is_at':
        'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in': 'null',
        'c4_is_in': 'null'}
--load_c3_from_jfk_to_p1--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'null', 'c4_is_at': 'jfk', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'p1', 'c4_is_in': 'null'}
--load_c4_from_jfk_to_p3--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'jfk', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p1_from_jfk_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'null', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'p1', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c3_from_p1_to_sfo--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at':
        'lax', 'p3_is_at': 'jfk', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null',
        'c3_is_in': 'null', 'c4_is_in': 'p3'}
--fly_p3_from_jfk_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo', 'c3_is_at':
        'sfo', 'c4_is_at': 'null', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'null', 'c4_is_in': 'p3'}
--unload_c4_from_p3_to_lax--> {'c1_is_at': 'jfk', 'c2_is_at': 'sfo',
        'c3_is_at': 'sfo', 'c4_is_at': 'lax', 'p1_is_at': 'sfo', 'p2_is_at': 'lax',
        'p3_is_at': 'lax', 'c1_is_in': 'null', 'c2_is_in': 'null', 'c3_is_in':
        'null', 'c4_is_in': 'null'} (cost: 7)
342 paths have been expanded and 1117 paths remain in the frontier
Elapsed time: 0.268207 seconds

```

4.3.4 Statystyki

Bez heurystyki:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 8,
 - Przeanalizowane ścieżki: 1461,
 - Pozostałe ścieżki: 3436,
 - Czas wykonywania: 1.365272 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 6,
 - Przeanalizowane ścieżki: 1320,
 - Pozostałe ścieżki: 4599,
 - Czas wykonywania: 1.240593 sekund.
- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 14,
 - Przeanalizowane ścieżki: 8035,
 - Pozostałe ścieżki: 96124,
 - Czas wykonywania: 2.605865.

Z heurystyką:

- Dla pod-celu 1:
 - Koszt rozwiązania: 8,
 - Przeanalizowane ścieżki: 242,
 - Pozostałe ścieżki: 934,
 - Czas wykonywania: 0.066035 sekund.
- Dla pod-celu 2:
 - Koszt rozwiązania: 7,
 - Przeanalizowane ścieżki: 342,
 - Pozostałe ścieżki: 1117,
 - Czas wykonywania: 0.268207 sekund.
- Łącznie:
 - Koszt rozwiązania: 15,
 - Przeanalizowane ścieżki: 584,
 - Pozostałe ścieżki: 2051,
 - Czas wykonywania: 1.236656.

5 Przemyślenia i Wnioski

Wnioski:

- Zastosowanie dobrej heurystyki znacznie przyspiesza znalezienie rozwiązania,
- Dodanie odpowiednich pod-problemów może również przyspieszyć proces znajdowania rozwiązania.
- Czas liczenia się rozwiązania jest silnie skorelowany z ilością odwiedzanych ścieżek przez algorytm. A więc ograniczając ilość ścieżek potrzebnych do przeszukania poprzez użycie heurystyk / pod celi znacznie przyspieszamy proces liczenia.

Literatura

- Biblioteki do kodu:
 - **Numpy**, wersji: 1.26.4
 - **Pandas**, wersji: 2.8.2 - agregacja rezultatów i konwersja do odpowiednich formatów.
 - **aipython**, wersji: 0.9.12
- Źródła merytoryczne:
 - [Dokumentacja 'aipython' w formie książki](#).