Алгоритмы конфликтно-ориентированного поиска для задачи многоагентного планирования (CBS, CBS+PC)

Проблема

Задача нахождения пути для одного агента на некоторой карте - задача нахождения пути между двумя вершинами в графе. Задача многоагентного планирования (Multi-agent pathfinding, MAPF) - обобщение этой задачи для k > 1 агентов. В случае такой задачи имеется карта и множество агентов, для каждого из которых определены стартовая и целевая позиции. Проблема заключается в нахождении путей для каждого агента так, чтобы избежать столкновений между ними. Алгоритмы для ее решения можно разделить на оптимальные и субоптимальные. В данной работе рассматривается поиск оптимального решения для задачи многоагентного планирования.

Формальная постановка задачи

В задаче производится работа с ориентированным графом G(V, E) и с k агентами (a1, ... ak). У каждого агента аі имеется стартовая вершина startі $\in V$ и целевая вершина goalі $\in V$. Время дискретизируется на точки t0, t1 и т.д. В момент времени t0 агент аі находится в startі.

За соответствующий промежуток времени агент может совершить переход в какую-либо соседнюю вершину либо оставаться в текущей вершине (совершать действие «ожидание»).

Главное ограничение в MAPF заключается в том, что в каждой вершине в текущий момент времени может находиться не более одного агента. Также можно ввести ограничение на переход агентов по одному и тому же ребру между соответствующими моментами времени (в данной работе это ограничение также учитывается). Конфликт - ситуация, когда ограничение нарушается. Решением MAPF является множество неконфликтующих путей - по одному для каждого агента - где путь для агента аі - последовательность действий, приводящая агента аі из startі в qoalі.

Для решения этой задачи производится минимизация глобальной общей функции стоимости. Эта функция получается суммированием по всем агентам числа шагов, которые требуются, чтобы из стартовой точки прийти в целевую и не покидать ее. МАРГ можно разделить на 2 группы: распределенные и централизованные. В распределенной постановке у каждого агента есть своя вычислительная мощность и могут быть использованы разные виды коммуникации (переда сообщений, трансляция и т. д.). В централизованной постановке подразумевается наличие некоторого одного ресурса, который должен найти решение для всех агентов. В этой работе рассматривается централизованный вариант МАРГ.

Вход и выход

Вход:

- 1. Ориентированный граф G(V, E). Вершины графа возможные положения агентов, ребра возможные перемещения между местами.
- k агентов, обозначенные a1, a2, ... ak. У каждого агента ai имеется стартовая вершина starti ∈ V и целевая вершина goali ∈ V. Время представлено как точки t0, t1 и т.д. В момент времени t0 агент ai находится в starti.

Выход: множество неконфликтующих путей - по одному для каждого агента.

Принцип работы алгоритма конфликтноориентированного поиска (CBS)

Здесь и далее будут использоваться следующие понятия и утверждения:

- Слово «путь» будет использоваться в контексте одного агента.
- Слово «решение» будет обозначать множество k путей для данного множества k агентов.
- Ограничение набор (ai, v, t), где агенту аi запрещено занимать вершину v в момент времени t.
- Состоятельный путь для агента аі путь, который удовлетворяет всем ограничениям для этого агента.
- Состоятельное решение решение, которое состоит из путей таких, что каждый путь для любого агента аі состоятелен.
- Конфликт набор (ai, aj, v, t), где агенты ai и aj занимают вершину v в момент времени t.
- Решение допустимо, если все входящие в него пути не содержат конфликтов.
- Состоятельное решение может быть недопустимо, если, несмотря на состоятельность всех входящих в него путей, эти пути все равно содержат конфликты.

Ключевая идея конфликтно-ориентированного поиска (conflict-based search, CBS) - увеличивать множество ограничений и находить пути, которые согласуются с ними. CBS работает на двух уровнях: низком и высоком. На высоком уровне ищутся конфликты, добавляются ограничения. На низком уровне ищутся индивидуальные пути для агентов, которые состоятельны по отношению к новым добавляемым конфликтам.

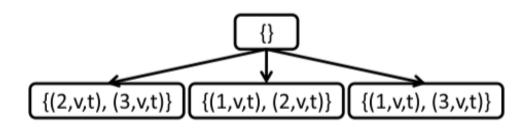
B http://www.bgu.ac.il/~felner/2015/CBSjur.pdf приводится доказательство оптимальности алгоритма.

Высокий уровень

На данном уровне производится поиск по дереву, которое называется деревом ограничений. Каждая вершина дерева N включает в себя:

- множество ограничений (корень дерева содержит пустое множество ограничений):
- решение (каждый путь состоятелен, пути ищутся на низком уровне);
- стоимость текущего решения (сумма стоимостей всех индивидуальных путей).

Вершина N целевая, если ее решение допустимо. На высоком уровне выполняется поиск лучшей вершины (вершины отсортированы по стоимостям). В этой работе в случае ничьих выбирается вершина, у которой решение содержит меньше конфликтов; дальнейшие ничьи разрешаются по принципу first in - first out. В соответствии с набором ограничений вершины выполняется поиск на низком уровне; этот поиск возвращает кратчайший путь для каждого агента (с учетом его ограничений). Когда для каждого агента найден состоятельный путь, эти пути валидируются на наличие конфликтов (рассматриваются все местоположения агентов в каждый момент времени). Если конфликтов нет, текущий N - целевой, возвращается текущее решение. Если обнаружен конфликт С =(a1...ak,v,t) для k (k>=2) агентов, валидация останавливается и N объявляется нецелевым. В случае конфликта k агентов (k>=2) генерируются k потомков N с k-1 ограничением (в каждом потомке одному из k агентов позволяется занимать эту вершину в момент t).



Конфликты ребер (ситуации, когда два агента меняются местами, то есть переходят по ребру в противоположных направлениях за один и тот же промежуток времени) обрабатываются аналогично. Алгоритм 2 представляет собой псевдокод для CBS (MA-CBS не используется).

```
Algorithm 2: High level of CBS (and MA-CBS).
```

```
Input: MAPF instance

    Root.constraints = Ø

 2 Root.solution = find individual paths by the low level()
 3 Root.cost = SIC(Root.solution)
 4 insert Root to OPEN
 5 while OPEN not empty do
        P \leftarrow \text{best node from OPEN} // lowest solution cost
        Validate the paths in P until a conflict occurs.
 8
        if P has no conflict then
         return P.solution || P is goal
 9
        C \leftarrow \text{first conflict } (a_i, a_j, v, t) \text{ in } P
10
        \textbf{if} \ \textit{shouldMerge}(a_i, a_j) \ /\!/ \ \textit{Optional, MA-CBS only } \ \textbf{then}
11
12
             a_{\{i,j\}} = merge(a_i, a_j, v, t)
13
             Update P.constraints(external constraints).
14
             Update P.solution by invoking low level(a_{\{i,j\}})
15
16
             if P.cost < \infty // A solution was found then
              Insert P to OPEN
17
18
             continue // go back to the while statement
19
        foreach agent a; in C do
20
             A \leftarrow \text{new node}
21
             A.constraints \leftarrow P.constraints + (a_i, v, t)
22
             A.solution \leftarrow P.solution
             Update A. solution by invoking low level(a_i)
23
24
             A.cost = SIC(A.solution)
25
             if A.cost < \infty // A solution was found then
               Insert A to OPEN
26
```

Низкий уровень

На низкий уровень подается агент со своими ограничениями, для которого ищется оптимальный путь, который удовлетворял бы всем ограничениям, при этом наличие остальных агентов игнорируется. В данной работе для этого применяется алгоритм A*.

CBS с приоритизацией конфликтов (CBS+PC)

Проблема

CBS чувствителен к тому, на каком конфликте останавливать валидацию и делать разделение (то есть порождать потомков N). Базовый CBS выбирает первый найденный конфликт, что может приводить к медленной работе (алгоритм «застревает» в области, где N.cost схожи и порождать большое количество лишних вершин дерева конфликтов.

Решение: приоритизация конфликтов (РС)

Для решения проблемы вводится приоритизация конфликтов. Рассматриваются 3 типа конфликтов для 2 агентов:

- Кардинальный конфликт. Конфликт (a1, a2, v, t) называется кардинальным для вершины N дерева ограничений, если добавление любого из двух ограничений, полученных из этого конфликта, к N и выполнению нового поиска на низком уровне для агента аі приводит к увеличению стоимости его пути по сравнению с исходным значением в N. Эквивалентное определение: конфликт кардинален, если все состоятельные пути для a1 и a2 содержат вершину v в момент времени t.
- Полукардинальный конфликт. Полукардинальный конфликт определяется аналогично, но к увеличению стоимости приводит только одно из двух ограничений.
- Некардинальный конфликт. Некардинальный конфликт определяется аналогично, но ни одно из двух ограничений не приводит к увеличению стоимости.

MDD - многозначная диаграмма выбора - структура, которая хранит все возможные пути стоимости с для данного агента. Каждая ее вершина соответствует возможному положению агента в момент t и находится на определенной глубине по отношению к стартовой вершине. Если существует кардинальный конфликт (ai, aj, v, t), то ширины диаграмм для каждого агента и их путей оптимальной длины в момент времени t равны 1.

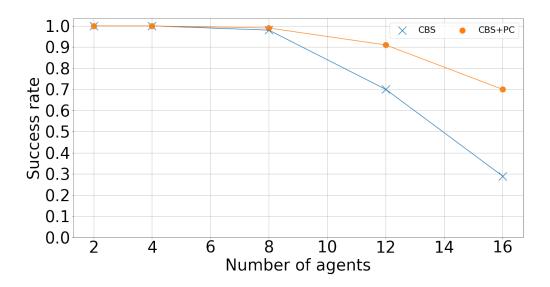
В данной работе используется упрощенный аналог MDD - ищутся все решения, стоимость которых равна первому найденному оптимальному. Для каждого из таких решений получается его путь из узлов (v1, v2 ...). Для каждого момента времени t создается множество из узлов. Для каждой найденной цепочки узлов узел добавляется в множество, соответствующее моменту времени. По размеру множества можно определить ширину.

Таким образом, для каждого текущего N конфликты проверяются на кардинальность (тестируется каждый конфликт (ai, aj, v, t), то есть каждая пара агентов в конфликте). Если найден кардинальный конфликт, используется он. Если нет кардинальных конфликтов, берется первый найденный полукардинальный. В противном случае берется произвольный некардинальный конфликт.

Результаты экспериментов

В работе исследовалось движение агентов по двумерной карте; агентам позволено перемещаться в 4 направлениях: вверх, вниз, влево, вправо. В А* на нижнем уровне использовалось расстояние Манхеттена.

Сравнивались оба алгоритма: CBS и CBS с приоритизацией конфликтов.



На графике показана доля успехов (доля задач, решенных алгоритмом за 5 минут) для CBS и CBS+PC на 100 случайных картах 8х8 с 15% препятствий в зависимости от числа агентов (2, 4, 8, 12, 16; задачи для агентов также генерировались случайным образом). CBS+PC превосходит CBS по доле успехов.

	Время, с (СВС)	Время, с (СВС+РС)	CTNodes (CBS)	CTNodes (CBS+PC)
k				
2	0.001437	0.002621	1.900000	1.900000
4	0.007425	0.011000	6.800000	5.560000
8	3.085565	0.243648	2193.938776	93.612245
12	20.321756	1.345496	13922.614286	504.785714
16	79.022291	11.631259	69603.206897	3230.827586

В таблице представлены средние времена работы и числа сгенерированных вершин дерева ограничений для этих алгоритмов (усреднение шло по задачам, с которыми справились оба алгоритма) для разного числа агентов. Виден выигрыш CBS+PC как и в числе CTNodes, так и во времени работы. Таким образом, с помощью приоритизации конфликтов можно добиться повышения эффективности CBS.