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 $(a1, \dots ak)$. У каждого агента ai имеется стартовая вершина $starti \in V$ и целевая вершина $goali \in V$. Время дискретизируется на точки $t0$, $t1$ и т.д. В момент времени $t0$ агент ai находится в $starti$.
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 ai - последовательность действий, приводящая агента ai из $starti$ в $goali$.
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.
MAPF 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 MAPF.

Вход и выход

Вход:
1. Ориентированный граф G(V, E). Вершины графа - возможные положения агентов, ребра - возможные перемещения между местами.
2. 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 конфликтно-ориентированного поиска (CBS)

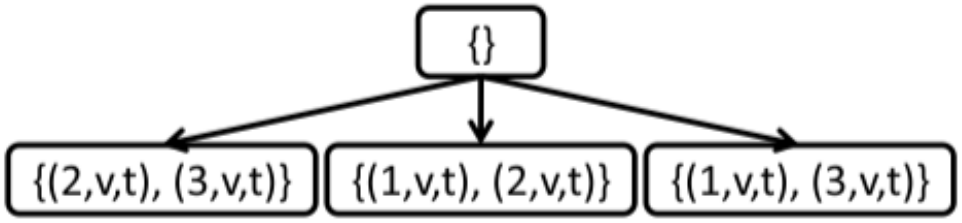
Здесь и далее будут использоваться следующие понятия и утверждения:
- Слово «путь» будет использоваться в контексте одного агента.
- Слово «решение» будет обозначать множество k путей для данного множества k агентов.
- Ограничение - набор (ai, v, t), где агенту ai запрещено занимать вершину v в момент времени t.
- Состоятельный путь для агента ai - путь, который удовлетворяет всем ограничениям для этого агента.
- Состоятельное решение - решение, которое состоит из путей таких, что каждый путь для любого агента ai 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.
В 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 C =(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 $= \emptyset$
Root.solution = find individual paths by the low level()
Root.cost = *SIC*(*Root.solution*)
insert *Root* to OPEN
while OPEN *not empty* **do**
  $P \leftarrow$ best node from OPEN // *lowest solution cost*
  Validate the paths in P until a conflict occurs.
  if P *has no conflict* **then**
    return P.*solution* // P *is goal*
  C $\leftarrow$ first conflict (a_i, a_j, v, t) in P
  if *shouldMerge*(a_i, a_j) // *Optional, MA-CBS only* **then**
    $a_{[i,j]} = merge(a_i, a_j, v, t)$
    Update P.*constraints*(external constraints).
    Update P.*solution* by invoking low level($a_{[i,j]}$)
    Update P.*cost*
    if P.*cost* $< \infty$ // *A solution was found* **then**
      Insert P to OPEN
    continue // go back to the while statement
  foreach *agent* a_i *in* C **do**
    $A \leftarrow$ new node
    A.*constraints* $\leftarrow P$.*constraints* $+ (a_i, v, t)$
    A.*solution* $\leftarrow P$.*solution*
    Update A.*solution* by invoking low level(a_i)
    A.*cost* = *SIC*(A.*solution*)
    if A.*cost* $< \infty$ // *A solution was found* **then**
      Insert A to OPEN

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 (PC)

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 ai 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 c 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 A* на нижнем уровне использовалось расстояние Манхеттена.