УДК 004.8

КОЛЛЕКТИВНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК СИСТЕМНОЕ СВОЙСТВО

Д.Ю. Максимов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dmmax@inbox.ru

Ключевые слова: коллективный интеллект, линейная логика, решетка целей, игровая семантика.

Аннотация: Явления коллективного интеллекта обсуждаются в рамках подхода Artificial General Intelligence (Universal AI), в котором интеллект рассматривается как информационный процессор, потребляющий и выдающий информацию, которая определяет поведение системы. Рассматриваются способ выбора целей (или задач, требующих выполнения) группой агентов и способ выбора такой группой оптимальной траектории движения к выбранным целям в среде. В первой из этих задач используется логическая структура на решетке задач/целей системы, а во второй задаче используется логическая структура, возникающая в категории игр, которая описывает всевозможные пути движения агентов группы. Выигрыши позиций в этой категории представляются элементами решеток образов целей и выбирается маршруты агентов с наибольшим совокупным выигрышем. Таким образом, поведение группы агентов определяется чисто системными свойствами как самой группы — ее решеткой целей/задач, так и среды, такими как видимость и возможность перемещения.

1. Введение

При описании поведения системы агентов в [1–3] выяснолось, что достаточно только наличия структуры (решеточной или еще и моноида, т.е. линейной логики) на множестве задач ([2, 3]) или целей ([1]) системы для того, чтобы система вела себя вполне разумно и даже похоже на поведение, например, колонии муравьев [3]. Такой подход к явлениям коллективного интеллекта аналогичен подходу Artificial General Intelligence (AGI).

В AGI искусственный интеллект представляется как информационный процессор, потребляющий и выдающий информацию, и исследования в этом направлении фокусируются на системах, действующих разумно. В рамках AGI предложено формальное описание поведения «наиболее интеллектуального агента», в смысле некоторой меры интеллектуальности [6]. Эта модель основана на вероятностном моделировании среды, определении следующего движения системы на основании предыдущего опыта, числовой оценке вознаграждения позиций системы и максимизации предполагаемого будущего вознаграждения вдоль траектории. Однако способ получения этой числовой оценки отсутствует. Также, нет моделей, представляющих поведение групп таких агентов.

В этом докладе предлагается развитие темы исходя из идеи, что параллельное выполнение процессов достижения разных целей и разными агентами в среде можно представить как тензорное произведение в линейной логике, которая моделируется в определенной категории игр [8]. Т.е. процесс достижения в среде системой интеллектуальных агентов своих целей формально можно описать как некоторую игру. Вознаграждение позиций представляется множествами, описывающими информацию о целях (степень их определенности). Т.о. вознаграждения предоставляются средой и являются элементами решетки множеств, а не числами, как в [6]. Приоритеты различных параллельных процессов в такой категории игр, аналогично [1–3], определяются с использованием структуры решетки и линейной логики на множествах целей агентов и системы. Эти структуры задаются исходя из представлений о назначении системы, в отличие от аналогичных структур в категории игр, которые задаются средой.

2. Используемые понятия

2.1. Линейная логика

В фазовой модели линейной логики [5] операции задаются на решетке[1] с дополнительно определенным умножением ее элементов (моноидом). При этом, в дополнение к решеточным операциям дизъюнкции и конъюнкции, определяются через умножение еще мультипликативные такие же операции, например тензорное произведение: $X \otimes Y = (X \cdot Y)^{\perp\perp}$. Здесь знак $\perp$ обозначает дуальность и является заменой решеточного отрицания. Также этим знаком обозначается элемент *false*, которым может быть выбран произвольный элемент решетки. Дуальный элемент определяется как $X^{\perp} \multimap \perp$, где линейная импликация $\multimap$ определяется как $X \multimap Y = \{z | x \cdot z \subset Y; \forall x \subset X\}$. Выполняются свойства: $\perp^{\perp} = I$, $X \multimap Y^{\perp} = (X \cdot Y)^{\perp}$ и $X^{\perp} = X^{\perp\perp\perp}$. *Фактами* называются такие $X : X = X^{\perp\perp}$.

Определены два взаимно-дуальных класса открытых Op и замкнутых Cl фактов. Класс Op замкнут относительно объединения $\cup$ и тензорного произведения $\otimes$, его наибольший элемент — I, который является нейтральным для тензорного произведения. Класс Cl замкнут относительно дуальных операций (рис. 1).

2.2. Игровая семантика в категории линейной логики

Игра (game) Конвея X определяется [8] как корневой граф, в котором вершины являются позициями игры, дуги — ее движениями и каждой дуге присвоена полярность ± 1 в зависимости от того, движение это игрока или оппонента. *Траектория* (play) — это путь из корня * графа. Путь *альтернирован*, если полярности на соседних ребрах чередуются. *Стратегия* определяется как непустое множество альтернированных путей четной длины, которые начинаются движением оппонента (в нашем случае системы, игрок — это среда, предоставляющая информацию), замкнуто по

[1] Решеткой называется частично-упорядоченное множество, в котором для любых подмножеств определены операции объединения и пересечения. В полных решетках, которые мы рассматриваем, есть наибольший элемент T и наименьший 0.

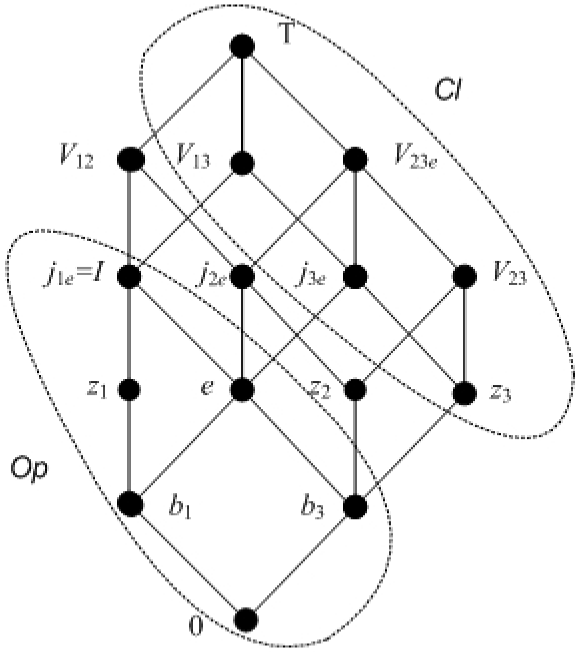

Рис. 1. Пример решетки целей/задач системы со структурой линейной логики

префиксу четной длины и детерминировано. Детерминированность означает, что два разных пути с общим префиксом должны совпадать. *Дуальная* игра $X^{\perp}$ определяется как игра, в которой полярности у всех дуг обращены. Тензорное произведение $X \otimes Y$ двух игр Конвея определяется так: позиции $x \otimes y$ are $V_{X\otimes Y} = V_X \times V_Y$ с корнем $*_{X\otimes Y} = * \times *_Y$, движения $x \otimes y \to \begin{cases} z \otimes y; x \to z \ in \ X \\ x \otimes z; y \to z \ in \ X \end{cases}$, полярность наследуется из соответствующего движения. В категории таких игр моделируется линейная логика (обобщенная). Объектами этой категории являются игры Конвея, а морфизмами — $X \multimap Y$ стратегии в $X^{\perp} \otimes Y$ (с точностью до обозначений), которые являются линейными импликациями. Игра Конвея с вознаграждением — это игра, с дополнительным весом в каждой вершине $\{1, 0, -1\}$, в зависимости от выигрышности позиции. В тензорном произведении веса вершин подчиняются правилам булевской конъюнкции и импликации. Можно доказать, что если веса заменяются множествами с операциями объединения, пересечения и линейной импликации на некоторой решетке, то вся категорная конструкция не меняется. Позиция считается тем более выигрышной, чем большее множество с ней связано (подразумевается наличие универсального множества, включающего все остальные, т.е. такие множества образуют полную решетку).

3. Определение поведения системы

3.1. Выбор целей

Будем представлять цели системы процессами их достижения. Примем, что наиболее желательное поведение системы состоит в достижении всех целей, а наименее желательное поведение состоит в бездействии. В таким случае ценности различных вариантов поведения системы, т.е. ценности разных наборов возможных процессов, образуют решетку целей M. Чем выше в диаграмме решетки расположен набор выполняемых процессов, тем такое поведение более ценно, однако не все элементы решетки сравнимы между собой. (рис. 1).

Определим на решетке умножение элементов и классы открытых Op и замкнутых Cl фактов исходя из соображений, чтобы при этом выполнялись свойства линейной логики и количество элементов, не являющихся фактами, было бы минимальным [3, 7]. В этом случае параллельно выполняемым процессам достижения разных целей будет соответствовать тензорное произведение соответствующих элементов решетки. Приоритеты различных параллельно выполняемых процессов и, соответственно, выбор наиболее предпочтительного варианта определяются из сравнения оценок соответствующих тензорных произведений.

Именно, линейную импликацию $X \multimap Y = (X \cdot Y^{\perp})^{\perp} = (X \otimes Y^{\perp})^{\perp}$ можно рассматривать как переход от выполнения одного набора процессов X к другому Y. Значения таких импликаций можно сравнивать и выбирать наиболее предпочтительный вариант перехода в случае необходимости выбора целей.

3.2. Выбор маршрутов

В исходном состоянии предполагается некоторое начальное распределение целей между агентами. Агенты находятся в конфигурационном пространстве в корне $* = *_1 \otimes *_1 \otimes ... \otimes *_l$ игры системы $A = A_1 \otimes ... \otimes A_l$, которая является тензорным произведением параллельных игр l агентов. Игра (game) A_j представляет возможные движения агента j в среде. Траектория (play) выбирается из требования максимального суммарного вознаграждения позиций. Вознаграждение $k(p_i, a_j)$ в позициях p_i оценивается в соответствии с критерием оптимальности движения агента в среде. Это может быть, например, наибольшая свобода в дальнейших передвижениях, или наибольшая степень видимости из позиции, или и т.п. Предполагается, что агенты видят среду, чем дальше, тем с меньшей степенью определенности, и есть некоторый горизонт видимости по каждому направлению. Таким образом, у системы есть еще l целей (задач) a_j движения в среде, которые входят в образующие решетки целей/задач.

При обнаружении n целей $b_1 ... b_n$ с информацией о них (или другим вознаграждением) $k(p_i, b_j)$ в позициях p_i игры $A = A_1 \otimes ... \otimes A_l$ l агентов, выигрышная стратегия игры $A' = A_1 \otimes ... \otimes A_l \multimap B_1 \otimes ... \otimes B_k$ определяет переход (морфизм) к новой игре A' достижения k целей. Траектория (play) выбирается из требования максимизации вознаграждения в пределах «горизонта видимости»:

$$
(1) \qquad k^{play}_{A_1 \otimes ... \otimes A_l \multimap B_1 \otimes ... \otimes B_k}(a_1 \otimes ... \otimes a_l \multimap b_1 \otimes ... \otimes b_k) = \\
= \max_{plays}[\bigcup_{play}(\neg k_{A_1}(a_1) \wedge ... \wedge \neg k_{A_l}(a_l)) \bigcup_{play}(k_{B_1}(b_1) \wedge ... \wedge k_{B_k}(b_k))]
$$

в игре (game) A', где процесс $a_1 \otimes ... \otimes a_l \multimap b_1 \otimes ... \otimes b_k$ достижения соответствующих k целей l агентами имеет наибольший приоритет в решетке целей системы из всех возможных параллельных процессов достижения обнаруженных n целей. При наличии несравнимых по приоритету процессов или неоднозначного выбора траектории можно воспользоваться большей степенью видимости какой-то цели по сравнению с другими при выборе целей (и выбрать вариант перехода, включающий достижение этой цели) и разной ценностью целей в решетках намерений отдельных агентов при выборе маршрута (как в [1]).

Информация о целях $k(p_i, b_j)$ оценивает степень соответствия видимого в позиции p_i образа цели b_j оригиналу и представляется некоторым множеством, как и образ цели, и оригинал. Эти множества образуют брауэрову решетку, в которой определены псевдодополнения $\neg k$. При этом максимизируется информация о целях $k_{B_j}(b_j)$ и минимизируется информация о свободном движении $k_{A_j}(a_j)$ (поскольку максимизируются псевдодополнения $\neg k_{A_j}(a_j)$). Такие k и $\neg k$ можно рассматривать как аргументы и контраргументы для соответствующего движения в соответствии с идеями ДСМ-метода правдоподобного вывода [4]: чем лучше цель видна (т.е. чем больше о ней информации), тем сильнее аргументы для перехода на ее достижение. Также чем сильнее контраргументы против свободного движения (т.е. чем меньше информации о возможности такого движения), тем сильнее аргументы для перехода от свободного движения к достижению какой-либо цели.

Таким образом, играется игра A l параллельных процессов движений агентов, на позициях которой возможны еще оценки вознаграждения k игр B. Возможность связана с тем, что графы игр B и A не обязательно совпадают: например, цель может быть видна (в B), но пути в A (т.е. в среде) к ней может не быть.

4. Заключение

В этом докладе представлен подход к описанию поведения группы интеллектуальных агентов только на основании информации, которую агенты получают от среды, и информации о целевом назначении системы агентов, которая заложена в систему изначально и представлена структурой линейной логики на множестве целей системы. Эта структура получается из общих требований выполнения свойств линейной логики на решетке целей системы и представляет внутреннюю логику, присущую системе. Таким образом, поведение группы агентов может определяться чисто системными свойствами как самой группы агентов, так и среды.

Список литературы

1. Легович Ю.С., Максимов Д.Ю. Выбор исполнителя в группе интеллектуальных агентов // Управление большими системами. 2015. № 56. С. 78-94.
2. Максимов Д.Ю. Реконфигурирование системной иерархии методами многозначной логики // Автоматика и телемеханика. 2016. № 3. С. 123-136.
3. Максимов Д.Ю., Легович Ю.С., Рывкин С.Е. Влияние структуры системных задач на поведение системы // Автоматика и телемеханика. 2017. № 4. С. 135-148.
4. Anshakov O.N, Finn V.K., Vinogradov D.V. Logical Means for Plausible Reasoming of JSM-type // Многозначные логики и их применение. Т. 2: Логики в системах искусственного интеллекта / Под ред. В.К. Финна. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 226-236.
5. Girar J.-Y. Linear logic // Theoretical Computer Science. 1987. No. 50. P. 1-102.
6. Hutter M. One Decade of Universal Artificial Intelligence // Theoretical Foundations of Artificial General Intelligence. Atlantis Press, 2012. P. 66-88.
7. Maximov D., Legovich Y., Goncharenko V. A Way to Facilitate Decision Making in a Mixed Group of Manned and Unmanned Aerial Vehicles // ArXiv.org. 2018. https://arxiv.org/abs/1809.10441
8. Mellies P.-A., Tabareau N. Resource modalities in tensor logic // Ann. Pure. Appl. Logic. 2010. No. 5. P. 632-653.