1. Введение

Существует традиционное поверье в вычислимость природы и общества, но она столкнулась с серьезными трудностями. Вычислимость является простой только для линейных задач. Но большинство проблем в мире являются сложными и нелинейными, от биологической эволюции жизни до экологической, экономической и социальной динамики человеческого общества. Классическая физика и искусственный интеллект (AI) часто вдохновлены линейным мировоззрением демона Лапласа.

В конце этого века, науки о жизни занимают доминирующую или лидирующую роль. Биологические, генные исследования и исследования мозга поставляют наиболее захватывающие приложения медицинских технологий. Понимание биологоческого феномена зависит от междисциплинарного и нелинейного подхода. Науки о сложности вдохновляют вычислительные методы в исследованиях искуственной жизни. Они не просто используют искуственные средства массовой информации для моделирования, репликации и исследования жизненных процессов. Исследование искусственной жизни по-тихоньку проскальзывает в основное направление технологии. Биологически вдохновленные методы компьютерной науки используются для решения проблем, оптимизации решений, симуляции реальных жизненных ситуация и создания виртуальной реальности.

В дальнейшем я анализирую основы и перспективы вычислительных технологий в рамках линейных и нелинейных сложных динамических систем. Я заканчиваю с перспективой на техническую эволюцию в сложных обществах с помощниками в виде компьютеров на рубеже веков.

2. Вычислимость и линейное мировоззрение

Идея всеобщего вычислимости восходит к концепции mathesis universalis в 17 веке. Согласно Лейбницу, каждая научная проблема может быть решена с помощью вычисления (алгоритмического) процедуры (ars iudicandi). Каждое решение научной проблемы можно искать и перечислять по методике расчетов (ars inveniendi). Каждый законный процесс природы должен быть реализуем с помощью механической счетной машины (автомата).

Согласно тезису Черча, каждая вычислительная процедура (алгоритм) может быть рассчитана на машине Тьюринга. Таким образом, каждая рекурсивная функция, как своего рода машинная программа, может быть вычислена с помощью компьютера общего назначения. Тогда мы можем определить эффективные процедуры принятия решений и перечислимости, которые были уже востребованы программой mathesis universalis Лейбница. Можно легко доказать, что каждое рекурсивное (разрешимое) множество является рекурсивно перечислимым. Но есть перечислимые множества которые не разрешимы. Это первые намеки, что есть пределы первоначально оптимистической программы Лейбница, основанной на вере в универсальных процедуры принятия.

Очевидно, рекурсивность или вычислимость Тьюринга есть теоретический предел вычислимости в соответствии с тезисом Черча. Ниже этого предела существует много практических проблем, касающихся определенных ограничений на сколько скорость алгоритма может быть увеличена. Особенно среди математических задач есть некоторые классы задач, которые по своей природе более трудно решить алгоритмически, чем другие. Таким образом, существуют степени вычислимости для машин Тьюринга, которые сделаны точными в теории сложности информатики. Классы сложности задач (или соответствующих функций) могут быть охарактеризованы стпенями сложности, которые дают порядок функций, описывающих вычислительное время (или число элементарных вычислительных стадий) алгоритмов (или вычислительных программ) в зависимости от длины их входов. Длина входов может быть измерена по количеству десятичных цифр.

В традиции искусственного интеллекта (ИИ), парадигма эффективной вычислимости означает, что ум представлен машинами с программным управлением, и ментальные структуры относятся к символическим структурам данных, в то время как ментальные процессы реализуют алгоритмы. Даже основанные на знаниях экспертные системы зарождаются алгоритмическими представлениями высокоразвитых языков программирования ИИ. Сегодня компьютеры с программным управлением и машины обрабатывающие информацию стали инструментами в повседневной жизни. Компьютерные ученые выделяют несколько поколений оборудования и программного обеспечения в историческом развитии своих машин. В исследовании искусственного интеллекта говорят о «втором компьютерном веке", подразумевая переход от машин обрабатывающих цифры к системам обработки знаний, таким как экспертные системы, которые, как говорят, симулируют человеческих экспертов, по крайней мере частично.

В естественных науках, вычислимость отлично подходит для линейных динамических систем, таких как гармонический осциллятор с, например, линейной зависимостью между положением массы и силы. В этом случае, согласно второму закону Ньютона, получим линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Решение уравнения может быть представлено в виде временного ряда положении масс. Все состояния динамической системы с положением и скоростью в течение определенного времени могут быть представлены как точки в фазовом пространстве. Каждое решение с различными начальными условиями определяет траекторию в фазовом пространстве. Мы получаем полностью вычислимый линейный мир как демон Лапласа.

В нелинейном дифференциальном уравнения динамики Верхаюьста (например , рост населения), начальный экспоненциальный рост глушится квадратичным термом обратной связи. В 1845 году Верхюлст уже проанализировал нелинейное разностное уравнение как рекурсивную итерационную схему для моделирования роста населения в дискретных временных точках, n = 1, 2, 3, . . . Мы получаем различные временные ряды нелинейной динамики Верхюльста в зависимости от увеличения управляющего параметра роста. Слабый рост приводит к известной логистической S -образной кривой с насыщением в равновесии. Увеличение роста приводит к колеблющейся кривой между двумя локальными равновесиями . Сильный рост отображает хаотические колебания в чувствительной зависимости отт начальных сроков. Динамика Верхюльста может быть легко визуализирована в фазовом пространстве с различными аттракторами неподвижной точки, периодическими колебаниями между двумя точками, и полное неравномерности без какой-либо периодичности. Это скорее удивительно, что простой математический закон, так же как логистическое отображение производит сложность бифуркации и хаос.

Другим известным примером нелинейной динамики является небесная механика. С известной проблемой многих тел Пуанкаре, было известно среди математиков, что нелинейные механические системы могут отображать хаотическое движение. Но пока ученые не имеют подходящих инструментов для борьбы с неинтегрируемыми системами, детерминированный хаос считался простым любопытством. В первые десятилетия этого века, многие численные процедуры были разработаны для борьбы с математической сложности нелинейных дифференциальных уравнений, по крайней мере приблизительно. Расчетная мощность современных высокоскоростных компьютеров и изысканные экспериментальные методики поддержали недавние успехи нелинейного комплексного системного подхода в естественных и общественных науках.

В общем, причинная связь хаотических систем по-прежнему детерминирована: любая крошечная смена причины показывает экспоненциально растущие траектории эффектов. Степень экспоненциального отклонения может быть измерена математически при помощи (положительной) экспоненты Ляпунова. В вычислительной версии, любое изменение оцифрованных исходных данных из оцифрованных хаотической динамики приводит к экспоненциальному росту вычисления будущих данных, ограничению долгосрочных прогнозов практически.

2. Реальная жизнь и нелинейное мировоззрение

Нелинейность является необходимым условием не только хаоса, но и самоорганизации и порядка в сложных многокомпонентных системах. Мы должны разватьзличать самоорганизацию закрытых (консервативных) систем вблизи теплового равновесия и открытых (диссипативных) систем далеких от теплового равновесия. Типичным примером консервативной самоорганизации можно назвать ферромагнетик. Этот вид твердого тела является многокомпонентной система множества атомных диполей с двумя возможными состояниями, вверх и вниз . Если система очень горячая, есть почти однородное распределение состояний вверх и вниз на атомном микроуровне. Если система охлаждается до точки Кюри , диполи организуются в виде рисунка выровненных диполей с теми же оринетациями вверх или вниз в соответствии с макроскопическим состоянием намагниченности. Таким образом, функция распределения атомных состояний на микроуровне определяется как порядковый параметр, соответствующий макроскопическому формирования шаблона с низкой энергией и энтропией. Физически самоорганизация или возникновение порядка вызвано фазовым переходом с бифуркацией двух возможных состояний равновесия, вверх и вниз . Это является своего рода нарушением симметрии, потому что бифуркцация обоих возможных типов упорядочения (аттракторов) зависит от крошечных начальных флуктуаций, препятствующих их прогнозам. Другим хорошим примером консервативной самоорганизации является появление снежных кристаллов вблизи точки замерзания. Наноструктуры, такие как Buckminsterfullerenes образущие большие шары углеродных молекул являются примерами химических самостоятельной сборок вблизи теплового равновесия.

Вдали от теплового равновесия, порядок сложных систем может возникнуть за счет увеличения ввода энергии и материи. В эксперименте Бернарда, слой жидкости между двумя пластинами нагревают снизу. Если разница температуры между пластинами увеличивается до критического значения, возникает формирование порядка двух возможных рулонов конвекции. Молекулы, организуют себя в макроскопический шаблон рулонов с двумя возможными направлениями вращения. Таким образом, опять же, у нас есть схема бифуркации с двумя возможными состояниями порядка (аттракторы). Это является своего рода нарушением симметрии, так как направление рулона зависит от крошечного молекулярного колебания, в течение которого не может быть прогноз исходного состояния фазового перехода. Если система управляется все дальше и дальше от теплового равновесия, получим растущую схему бифуркации возможных состояний локального порядка от колеблющихся до хаотических шаблонов.

Макроскопические модели возникают из сложного нелинейного взаимодействия микроскопических элементов , когда энергетическое взаимодействие диссипативной (открытой) системы с ее окружением достигает некоторого критического значения . Стабильность возникающих структур гарантируется некоторым балансом нелинейности и диссипации. Слишком много нелинейного взаимодействия или рассеиваня уничтожит структуру. Так как условия диссипативного фазового перехода носят очень общий характер , существует широкий выбор междисциплинарных приложений. Типичным физическим примером является лазер. В химии, концентрические кольца или движущиеся спирали в реакции Белоусова-Жаботинского (БЖ) возникают, когда конкретные химические вещества сливаются друг с другом при критическом значении. Конкурс отделенных кольцевых волн очень ясно показывает нелинейность этих явлений, потому что в случае принципа суперпозиции кольцевые волны будут проникать друг в друга, так же как и оптические волны. На языке химика, нелинейность процесса показана автокаталитическими реакциями в схеме химической реакции. На языке математика, мы получаем нелинейных дифференциальные уравнения с процентами концентрации химических веществ. Фазовые переходы в новые состояния порядка далеко от теплового равновесия представлены в виде временных рядов (или энергетического спектра) от периодически колеблющихся и бифурцирующих до хаотическим шаблонов.

В общем, можно сказать, что старые структуры становятся нестабильными и ломаются путем изменения параметров управления. На микроскопическом уровне стабильные режимы старых состояний преобладают неустойчивые режимы. Они определяют параметры порядка, которые описывают макроскопические структуры и шаблоны систем. Существуют различные конечные шаблоны фазовых переходов, соответствующие различным аттракторам. Различные аттракторы могут быть изображены потоком, скорость которого ускоряется шаг за шагом. На первом уровне показано однородное состояние равновесия (фиксированная точка). На более высоком уровне скорости бифуркации из двух или более вихрей можно наблюдать соответствующий периодические и условно-периодические аттракторы. Наконец, порядок распадается в хаос, как фрактальный аттрактор сложных систем.

В рамках комплексных систем возникновение жизни не случайно, но необходимо и правомерно. Только условия для возникновения жизни (например на планете Земля) могут быть случайны во Вселенной. Открытые (диссипативные) физические и химические системы теряют свою структуру, когда входнаях энергия и материя остановлена или изменена (например, лазер, БЖ-реакция). Организменные системы (такие как клетки) способны сохранить большую часть своей структуры по крайней мере, в течение относительно длительного времени. С другой стороны , они нуждаются в энергии и материи в определенный промежуток времени, чтобы сохранить их структуру более или менее далеко от теплового равновесия. Таким образом, биологические системы сочетают консервативные и диссипативные структуры, которые определяются и воспроизводятся ДНК-репликацией. После термодинамической (консервативной и диссипативной) самоорганизации атомных и молекулярных систем, под ДНК-репликацией понимается новый вид клеточной самоорганизации. Это открытый вопрос пребиотической эволюции как фазовый переход из консервативных и диссипативных стрктур к ДНК-воспроизводимым структурам был устроен. В любом случае, у нас есть сложные системы, развитие которых может быть объяснено эволюцией (макроскопических) параметров порядка , вызванных нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями молекул, клеток и т.д., при фазовых переходах близких или далеких от теплового равновесия. Виды биологических систем (растений, животных и т.д.) описываются параметрами порядка. Идея Спенсера, что эволюция жизни характеризуется возрастающей сложностью может быть сделана точно в контексте сложных систем. Хорошо известно, что Тьюринг проанализировал математическую модель организмов, представленных в виде сложных клеточных систем. Эволюция параметра порядка соответствует агрегации форм при фазовом переходе макроскопического организма. Зрелый многоклеточный организм можно интерпретировать как цель или (лучше) как аттрактор органического роста .

Даже экологический рост биологических популяций может быть смоделирован с использованием понятий сложных систем. Экологические системы являются сложными диссипативными системами растений или животных с взаимными нелинейными метаболическими взаимодействиями друг с другом и с окружающей их средой. Симбиоз двух популяций с их источником питания может быть описан тремя связанными дифференциальными уравнениями, которые уже были использованы Эдвардом Лоренцом, чтобы описать развитие погоды в области метеорологии. В 19 веке итальянские математики Лотка и Вольтерра описали развитие двух популяций в экологической конкуренции. Нелинейные взаимодействия двух комплексных популяций определяются системой двух дифференциальных уравнений добычи и хищных видов. Эволюция связанных систем имеет стационарные точки равновесия. Аттракторы эволюции являются периодическими колебаниями (предельными циклами).

Организм человека является одной из самых сложных динамических систем в биологической эволюции. Нелинейная сеть обмена веществ, например, в одной ячейке печени, состоит из сложной системы с чувствительным равновесием и уклонами обратной связи. Сердце представляет собой сложный клеточный орган с колеблющимися и хаотическими шаблонами поведения. Электрические взаимодействия клеток инициируют потенциалы действия с колеблющимися сокращениями как макроскопические образцы (параметров порядка). Их периодическая структура представлена в виде временных рядов в электродиаграмме.

Пожалуй, наиболее спекулятивным междисциплинарным применением сложных систем является человеческий мозг как многоклеточная система. Появление психических состояний (для распознавания шаблонов образов , например, чувства ,мысли) объясняется эволюцией (макроскопических) параметров порядка мозговых механизмов, которые вызваны нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями нервных клеток в стратегии обучения далекой от теплового равновесия. После консервативной и диссипативной самоорганизации атомных и молекулярных систем, и после ДНК-шифрованной самоорганизации клеточных систем , стратегии обучения понимаются как нейронная самоорганизация мозга, которая не направлена на код ДНК. Клеточны механизмы с психическими состояними интерпретируются как аттракторы (фиксированные точки, периодические, квазипериодические или хаотические) фазовых переходов . Если мозг рассматривается как сложная система нервных клеток, то его динамика предполагается быть описана нелинейной математикой нейронных сетей. Распознавание шаблонов, например, интерпретируется как своего рода фазовый переход формальной аналогии с эволюционных уравнений, которые используются для шаблона возникновения в физике, химии и биологии.

В общем, целью алгоритма обучения является уменьшение теоретико-информационного критерия расхождения между внутренней моделью мира мозга и реальной среды через самоорганизацию. Недавнее возрождение интереса в области нейронных сетей в основном вдохновлено успешными техническими приложениями статистической механики и нелинейной динамики в физике твердого тела, физике развернутого стекла, химических параллельных компьютерах, оптических параллельных компьютерах и лазерных системах. К другим причнам относятся недавнее развитие вычислительных ресурсов и уровень технологий, которые делают вычислительную обработку нелинейных систем все более и более возможной.

3. Искуственная жизнь и нелинейное мировоззрение

Кроме искусственного интеллекта (ИИ) как классической дисциплины информатики искусственная жизнь (ИЖ) является новой развивающейся областью исследований в рамках наук о сложности. Природная жизнь на Земле организована на молекулярном, клеточном, организменном уровне и уровне популяции-экосистемы. Искусственная жизнь направлена на достаточно мощные инструменты моделирования, чтобы захватить ключевые понятия живых систем на этих уровнях возрастающей сложности.

Концепция Джона фон Неймана клеточных автоматов дала первые намеки на математические модели живых организмов, задуманные как самовоспроизводящиеся сети клеток. Пространством состояний является однородным решетка, которая разделена на равные клетки, как шахматная доска. Элементарным клеточным автоматом является клетка, которая может иметь различные состояния, например, "занято" (по отметке), "свободно", или "окрашено". Агрегация элементарных автоматов, называется составным автоматом. Каждый автомат характеризуется своей средой, то есть соседними клетками. Динамика автоматов определяется синхронными правилами преобразования. Фон Нейман доказал, что характерную черту живых систем, их склонность воспроизводить себя, можно имитировать автоматом с 200000 клеток (в плоскости), где каждая ячейка имеет 29 возможных состояний и четыре ортогональные соседние клетки, как среды. Хотя эта идея оправдывается математически точным доказательством, ее трудно реализовать технически на компьютере. Причиной является требование фон Неймана, что самовоспроизводящиеся структура должна быть универсальным компьютером, который имеет степень сложности универсальной машины Тьюринга. Очевидно, самовоспроизводящиеся молекулы пребиотической эволюции были едва способны для универсальных конструкций. Если отбросить требование универсальности, то очень простые клеточные автоматы могут быть разработаны для воспроизведение самих себя.

В общем, клеточные автоматы оказались дискретными моделями сложных систем с нелинейными дифференциальными уравнениями, описывающиями их динамику эволюции. Временная эволюция их правил, характеризующих динамику клеточных автоматов, производит очень разные клеточные образцы, начиная с случайных начальных условий. Компьютерные эксперименты приводят к следующим классам аттракторов, направленных на клеточные модели эволюции. Через несколько шагов, системы класса 1 достигнут однородного состояния равновесия независимо от начальных условий. Это конечное состояние равновесия визуализируется полностью белой плоскосью и соответствует фиксированной точке, как аттрактор. Системы класса 2, после нескольких шагов по времени, показывают постоянный или периодический шаблон эволюции, который является относительно независимым от начальных условий. Конкретные позиции шаблона могут зависеть от начальных условий, но не сама глобальная структура шаблона. Системы класса 3 эволюционировают к хаотическим состояниям как конечные аттракторы без глобальной периодичности. Эти хаотические шаблоны зависят чутко от начальных условий, и показывают похожее на себя поведение с фрактальной размерностью. Системы класса 4 производят весьма сложные структуры с локально распространяющимися формами. Системы класса 3 и 4 чувствительны к крошечных колебаниям, которые могут повлиять на глобальное изменение порядка (эффект бабочки). Таким образом, в этих случаях, процесс эволюции не может быть предсказан в долгосрочной перспективе.