

Моей жене, Кэтрин, и нашим детям — Саре, Дэвиду и Питеру.

Si quid est in me ingenii, iudices...

Цицерон (Cicero)

— Джордж Люгер (George Luger)

Предисловие

*Чтобы научиться что-то делать,
надо делать это.*

— Аристотель (Aristotle), *Этика*

Добро пожаловать в четвертое издание!

Предложение о выпуске четвертого издания книги по искусственному интеллекту я принял с удовольствием. Я расценил его как комплимент предыдущим изданиям, первое из которых вышло более десяти лет назад. Это предложение означает, что наш подход к искусственному интеллекту был широко поддержан. В новом издании представлены самые современные наработки в этой области. Спасибо читателям, коллегам и студентам за высокую оценку книги и неослабевающий интерес к ее теме.

Многие разделы прежних изданий замечательно выдержали проверку временем. Это главы, посвященные логике, алгоритмам поиска, представлению знаний, продукционным системам, машинному обучению и технологиям программирования на языках LISP и PROLOG. Эти вопросы остаются центральными в области искусственного интеллекта, поэтому существенной доработки соответствующих глав не потребовалось. Однако некоторые главы, в том числе связанные с вопросами понимания естественного языка, обучения с подкреплением и неточными рассуждениями, были подвергнуты значительной переработке. Часть вопросов, которые в первых изданиях были лишь слегка затронуты, но впоследствии доказали свою актуальность, описаны более детально. К ним относятся эволюционирующие вычисления, рассуждения на основе логических доказательств и решение задач на базе моделей. Эти изменения отражают современные тенденции и состояние области искусственного интеллекта.

В ходе проекта мы получили поддержку от наших издателей, редакторов, друзей, коллег, а главное — читателей, которым наша работа обязана своей долгой и продуктивной жизнью. Мы были очень рады представившейся возможности — ученым очень редко удается вырваться за рамки своей узкой специализации. Благодаря издателям и читателям у нас это получилось.

Несмотря на то что искусственный интеллект, как и большинство инженерных дисциплин, должен подтвердить свою значимость в коммерческом мире путем решения важных практических задач, мы рассматриваем его с тех же позиций, что и многие наши коллеги и студенты. Мы хотим понять и исследовать механизмы работы мозга, обеспечивающие возможности интеллектуального мышления и осмысленной деятельности. Отвергая несколько наивное утверждение о том, что интеллект — это исключительная пре-

рогатива человека, мы допускаем возможность эффективного исследования области интеллекта, а также разработки интеллектуальных артефактов. В предыдущих изданиях были отмечены три отличительные черты предлагаемого подхода к изучению искусственного интеллекта. Поэтому имеет смысл в предисловии к четвертому изданию вернуться к этой теме и оценить, насколько наши взгляды выдержали проверку временем в процессе активного развития этой области знаний.

Основной целью мы считали “объединение разрозненных областей искусственного интеллекта с помощью детального описания его теоретических основ”. В процессе ее реализации оказалось, что главная проблема — примирить исследователей, уделяющих основное внимание изучению и анализу различных теорий интеллекта (*чистых теоретиков*), с их коллегами, рассматривающими интеллект как средство решения конкретных прикладных задач (*практиками*). Эта простая дихотомия оказалась на деле далеко не такой простой. На современном этапе развития искусственного интеллекта жаркие споры между теоретиками и практиками ведутся по множеству вопросов из самых разных областей. Приверженцы символического подхода спорят с почитателями нейронных сетей, ученые-логики дискутируют с разработчиками форм искусственной жизни, эволюционирующей вопреки логическим принципам, архитекторы экспертных систем противостоят разработчикам программ на основе логических доказательств. И, наконец, самые непримиримые дебаты ведутся между теми, кто считает задачу создания искусственного интеллекта уже решенной, и пессимистами, вообще не верящими в возможность ее решения. Наше исходное видение искусственного интеллекта как пограничной области науки, призванной укротить бунтовщиков, прорицателей, старателей и других безудержных мечтателей с помощью формализма и эмпиризма, трансформировалось в другую метафору. Искусственный интеллект — это большой, хаотичный, но в целом мирный город, который законопослушные горожане разделили на отдельные деловые и богемные районы в соответствии со своими жизненными принципами. За годы работы над разными изданиями книги у авторов начинает появляться общее видение архитектуры искусственного интеллекта, отражающее структуру, культуру и жизненный уклад этого города.

Интеллект — это очень сложная область знаний, которую невозможно описать с помощью какой-то одной теории. Ученые строят целую иерархию теорий, характеризующих его на разных уровнях абстракции. На самом нижнем уровне этой иерархии находятся нейронные сети, генетические алгоритмы и другие формы эволюционирующих вычислений, позволяющие понять процессы адаптации, восприятия, воплощения и взаимодействия с физическим миром, лежащим в основе любой формы интеллектуальной деятельности. С помощью некоторого частично понятного процесса разрешения эта хаотическая популяция “слепых” и примитивных действующих лиц превращается в более строгие шаблоны логического вывода. Работая на этом уровне, последователи Аристотеля изучают схемы дедукции, абдукции, индукции, поддержки истинности и другие бесчисленные модели и принципы рассуждений. На более высоком уровне абстракции разработчики экспертных систем, интеллектуальных агентов, систем понимания естественного языка пытаются определить роль социальных процессов в создании, передаче и подкреплении знаний. В четвертом издании книги мы рассмотрим все эти уровни иерархии искусственного интеллекта.

Второй тезис, высказанный в предыдущих изданиях, касался центральной роли “расширенных формализмов представления и стратегий поиска” в методологии искусственного интеллекта. Это, пожалуй, наиболее спорный аспект наших предыдущих рассуждений и раннего этапа развития искусственного интеллекта вообще. Многие исследова-

тели, работающие в области эволюционирующих вычислений ставят под сомнение роль символических рассуждений и семантики ссылок с процессе мышления. Несмотря на то что идея представления как процедуры присвоения имен некоторым объектам во многом утратила свою уникальность с появлением неявных представлений, обеспечиваемых нейросетевыми моделями или системами искусственной жизни, по мнению автора, понимание вопросов представления и алгоритмов поиска остается очень важным моментом для специалистов-практиков в области искусственного интеллекта. Более того, автор считает, что навыки и знания, приобретенные при изучении способов представления и механизмов поиска, являются неоценимым средством анализа таких аспектов несимволических областей искусственного интеллекта, как нейронные сети или генетические алгоритмы. Сравнение, противопоставление и критические замечания в адрес различных подходов современного искусственного интеллекта приводятся в главе 16.

Третье утверждение, сформулированное в начале жизненного цикла этой книги, — “рассматривать искусственный интеллект в контексте эмпирической науки” осталось неизменным. Здесь уместно привести цитату из предисловия к третьему изданию. Автор продолжает верить, что искусственный интеллект — это не

“...некое странное ответвление от научной традиции, а... часть общего пути к знанию и пониманию самого интеллекта. Более того, наши программные средства искусственного интеллекта наряду с исследованием методологии программирования... идеально подходят для изучения окружающего мира. Эти средства создают почву и для понимания и для появления вопросов. Мы приходим к оценке и знанию феномена конструктивно, т.е. путем последовательной аппроксимации.

Каждую разработку и программу можно рассматривать как эксперимент с природой: мы предлагаем представление, генерируем алгоритм поиска, а затем ставим вопрос об адекватности нашей характеристики некоторой части феномена интеллекта. И реальный мир дает ответ на этот вопрос. Наш эксперимент можно проанализировать, модифицировать, расширить и возобновить. Нашу модель можно подкорректировать, а понимание — расширить”.

Что нового в этом издании

Я, Джордж Люгер (George Luger), — единственный автор четвертого издания. Несмотря на то что интересы Билла Стабблефилда (Bill Stubblefield) сместились в сторону новых областей компьютерных наук, его след останется и в настоящем, и в последующих изданиях книги. На самом деле эта книга является результатом моей работы в качестве профессора компьютерных наук в университете Нью-Мексико и труда моих коллег, аспирантов и друзей — членов сообщества специалистов в области искусственного интеллекта, а также многих читателей, направивших по электронной почте свои комментарии, пожелания и уточнения. Данная книга продолжает традиции предыдущих изданий, поэтому, чтобы отразить коллективный вклад в ее написание, при изложении материала я буду по-прежнему употреблять местоимение “мы”. Отдельные слова благодарности за участие в подготовке четвертого издания приводятся в соответствующем разделе этого предисловия.

Мы переделали многие разделы этой книги, чтобы отразить возрастающую роль агентного подхода к решению задач как новой технологии искусственного интеллекта (ИИ). При обсуждении основ ИИ мы определяем интеллект как физически воплощенный и расположенный в природном и социальном мире контекст. В соответствии с этим определением в главе 6 описывается эволюция схем представления ИИ, начиная от ассо-

циативного и раннего логического представлений через слабые и сильные методы решения, включая коннекционистские и эмерджентные модели, и заканчивая ситуативными и социальными подходами к решению задач ИИ. В главе 16 содержатся критические замечания по каждой из парадигм.

При работе над четвертым изданием мы проанализировали все вопросы, представленные ранее, и изложили их в более современной интерпретации. В частности, в главу 9 добавлен раздел, посвященный обучению с подкреплением. Описаны алгоритмы такого обучения (метод временных разностей и Q-обучения), получающие сигналы из внешней среды и формирующие на их основе политику изменения состояний.

Помимо содержащегося в предыдущих изданиях анализа систем вывода от данных и от цели, в главе 7 представлены рассуждения на основе модели и опыта, в том числе примеры из космической программы NASA. В эту главу добавлен раздел, посвященный обсуждению преимуществ и недостатков каждого из этих подходов для решения задач, интенсивно использующих знания.

В главе 8 описан подход к реализации рассуждений при неточной или неполной информации. Представлено множество важных подходов к решению этой задачи, включая байесовский подход к рассуждениям, сети доверия (belief network), модель Демпстера–Шафера и неточный вывод с использованием фактора уверенности. Описаны также приемы поддержания истинности в немонотонных ситуациях, а также рассуждения на основе минимальных моделей и логической абдукции. В заключении главы глубоко проанализированы байесовские сети доверия и алгоритм дерева клик для распространения меры правдоподобия по сети доверия в контексте новой информации.

В главе 13 обсуждаются вопросы понимания естественного языка, включая раздел по стохастическим моделям для постижения языка. Здесь описаны марковские модели, CART-деревья, метод взаимной кластеризации информации и статистического грамматического разбора. В заключении главы приводятся несколько примеров, в том числе приложения по восполнению текста и методы реферирования текстов для WWW.

И, наконец, в обновленной главе 16 мы снова возвращаемся к вопросам природы интеллекта и возможности создания интеллектуальных машин. Последние достижения ИИ рассматриваются с точки зрения психологии, философии и нейрофизиологии.

Содержание книги

В главе 1 дается введение в теорию искусственного интеллекта, предваренное краткой историей попыток понять принципы работы мозга и сущность интеллекта с позиций философии, психологии и других наук. Важно понимать, что ИИ — это старая наука, уходящая корнями как минимум к трудам Аристотеля. Осмысление этого опыта играет важную роль в понимании результатов современных исследований. В этой главе также приводится обзор некоторых важных приложений ИИ. Цель главы 1 — обеспечить основу и мотивацию для излагаемой далее теории и ее приложений.

В главах 2, 3, 4 и 5 (часть II) описаны средства решения задач ИИ. К ним относятся язык теории предикатов, предназначенный для описания основных свойств предметной области (глава 2), методы поиска, применяемые для рассуждения об этих описаниях (глава 3), а также алгоритмы и структуры данных, используемые для реализации этого поиска. В главах 4 и 5 обсуждается важная роль эвристики в фокусировке и ограничении пространства поиска. Представлено множество архитектур, предназначенных для построения алгоритмов поиска, включая методологию “классной доски” и продукционные системы.

Главы 6, 7 и 8 составляют третью часть книги. В них описаны представления для задач искусственного интеллекта и методы решения задач, интенсивно использующих знания. В главе 6 рассматривается эволюция схем представлений для ИИ. Сначала обсуждаются семантические сети и расширение этой модели на теорию концептуальной зависимости, фреймы и сценарии. Затем глубоко анализируется конкретный формализм — концептуальные графы. Основное внимание уделяется вопросам образования понятий в процессе представления знаний и решению этих вопросов в современном языке представления. В главе 13 показано, как концептуальные графы можно использовать для реализации интерфейса с базой данных, работающего на основе естественного языка. В заключении главы 6 рассмотрены более современные подходы к представлению, включая агентно-ориентированные архитектуры и систему *Сорусат*.

В главе 7 рассмотрена основанная на правилах экспертная система, а также системы рассуждений на основе моделей и опыта, включая примеры из космической программы NASA. Эти подходы к решению задачи представлены как естественное продолжение материала, изложенного в первых пяти главах книги: производственная система на основе выражений из теории предикатов гармонично сочетается с алгоритмами поиска на графах. В заключении главы анализируются преимущества и недостатки каждого из этих подходов к решению задач, интенсивно использующих знания.

В главе 8 приводятся модели рассуждений в условиях неопределенности и методы использования ненадежной информации. Здесь обсуждаются байесовские модели, сети доверия (*belief network*), модель Демпстера–Шафера и неточный вывод с учетом фактора уверенности, применяемые для рассуждения в условиях неопределенности. Описаны приемы поддержания истинности, рассуждения на основе минимальных моделей и логической абдукции, а также алгоритм дерева клика для байесовских сетей доверия.

В части IV (главы 9–11) подробно изложены вопросы машинного обучения. В главе 9 детально изучаются алгоритмы символьного обучения — обширной области исследований, связанной с решением множества различных задач. Эти алгоритмы различаются по своему назначению, используемым обучающим данным, стратегиям обучения и представлениям знаний. К символьным алгоритмам обучения относятся индукция, концептуальное обучение, поиск в пространстве версий и ID3. Подчеркивается роль индуктивного порога, обобщения на основе реальных данных и эффективного использования знаний при обучении на единственном примере на основе объяснения. Изучение категорий и кластеризация понятий представлены в ракурсе обучения без учителя. Главу завершает раздел, посвященный обучению с подкреплением, — способности интегрировать обратную связь от внешней среды и политику принятия новых решений.

В главе 10 описаны нейронные сети, которые зачастую называют *суб-символьными*, или *коннекционистскими*, моделями обучения. В нейронной сети информация структурирована неявно. Она распространяется между набором взаимосвязанных процессоров с учетом весовых коэффициентов, а обучение сводится к пересортировке и модификации весов узлов сети. Рассмотрено множество нейроподобных архитектур, включая обучение персептрона, метод обратного распространения ошибки и встречного распространения. Изучены модели Кохонена, Гроссберга и Хебба. Описана аттракторная модель и ассоциативное обучение, в том числе сети Хопфилда.

Генетические алгоритмы и эмерджентный подход к обучению представлены в главе 11. С этой точки зрения обучение — это процесс адаптации и эволюции. После нескольких примеров решения задач на основе генетических алгоритмов рассматривается возможность применения этой методологии для решения более общих проблем. К ним

относятся системы классификации и генетическое программирование. Затем описывается “социальное” обучение с примерами из области “искусственной жизни”. В заключение приводится пример эмерджентных вычислений, реализованных в институте Санта-Фе. В главе 16 сравниваются и противопоставляются три подхода к машинному обучению (символьный, коннекционистский и эмерджентный).

В части V (главы 12 и 13) продолжается представление важных областей применения технологий ИИ. Одной из старейших областей является автоматическое доказательство теорем, которое зачастую называют *автоматическими рассуждениями*. В главе 12 описываются первые программы, реализующие этот подход, включая Logic Theorist и General Problem Solver. В этой главе основное внимание уделяется разрешающим процедурам доказательства теорем, а особенно резолюции на основе опровержения. Рассмотрены также более сложные методы вывода на основе гиперрезолюции и параметризации. В заключении интерпретатор PROLOG описан как система вывода на основе хорновских выражений и резолюции, а вычисления на PROLOG — как пример парадигмы логического программирования.

Глава 13 посвящена проблеме понимания естественного языка. Традиционный подход к пониманию языка, проиллюстрированный с использованием многих описанных в главе 6 семантических структур, в этом издании дополнен описанием стохастического подхода. Здесь рассмотрены марковские модели, CART-деревья, метод взаимной кластеризации информации и статистического грамматического разбора. В заключении главы приводятся несколько примеров, включая приложения по восполнению текста и методы реферирования текстов для использования в WWW.

В части VI описаны языки LISP и PROLOG. В главе 14 рассматривается PROLOG, а в главе 15 — LISP. Эти языки представлены как средства решения задач искусственного интеллекта на основе изложенных в предыдущих главах методов поиска, включая алгоритмы поиска в ширину, глубину и “жадный” алгоритм. Реализация этих методов поиска проблемно-независима, поэтому ее можно применять для создания оболочек поиска в экспертных системах на основе правил построения семантических сетей, систем понимания естественного языка и обучения.

И, наконец, глава 16 служит эпилогом этой книги. В ней рассмотрены возможности науки об интеллектуальных системах, а также альтернативные современные подходы. Обсуждаются современные рамки искусственного интеллекта и перспективы его развития.

Использование книги

Искусственный интеллект — это обширная область, поэтому объем этой книги достаточно велик. Хотя для детального изучения всего материала потребуется не один семестр, мы скомпоновали книгу таким образом, чтобы ее можно было читать по частям. Выбирая отдельные части материала, можно сформировать семестровый и годичный (двухсеместровый) курс изучения предмета.

Предполагается, что студенты уже прослушали курсы дискретной математики, включая теорию предикатов и теорию графов. Если это не так, то при изучении начальных разделов (2.1 и 3.1) необходимо уделить этим теориям больше внимания. Надеемся также, что студенты изучили курс по структурам данных, в том числе деревьям, графам, методам рекурсивного поиска с помощью стеков, очередей и приоритетных очередей. Если это не так, то обратите особое внимание на начальные разделы глав 3, 4 и 5.

В семестровом курсе мы кратко останавливаемся на первых двух частях книги. После такой подготовки студенты готовы к восприятию материала части III. Затем мы изучаем PROLOG и LISP (часть VI) и требуем от студентов построения различных представлений и реализации стратегий поиска, описанных в первых главах. Один из языков, к примеру PROLOG, можно ввести в первой части курса, а затем использовать его при изучении структур данных и алгоритмов поиска. По нашему мнению, полезным средством построения систем решения задач на основе правил и знаний являются метаинтерпретаторы, представленные в главе, посвященной обработке естественного языка. PROLOG, в свою очередь, — отличное средство для построения систем понимания естественного языка.

В двухсеместровом курсе имеется возможность рассмотреть области применения ИИ, описанные в частях IV и V. Особенно это касается машинного обучения. Кроме того, студенты реализуют гораздо более серьезные программные проекты. На наш взгляд, во втором семестре очень важно, чтобы студенты познакомились с основными первоисточниками знаний по искусственному интеллекту. Студенты должны понимать, где мы находимся в данный момент, как мы к этому пришли, и представлять себе перспективы развития ИИ. Для этой цели мы используем обзор [Luger, 1995].

Упомянутые в книге алгоритмы написаны на паскалеподобном псевдокоде. При этом используются управляющие структуры языка Паскаль (Pascal) и описания проверок и операций на родном языке. К числу управляющих структур Паскаля мы добавили две новые полезные конструкции. Первая из них — модифицированный оператор `case`, который не просто сравнивает значение переменной с постоянной меткой, как в обычном Паскале, но и позволяет связывать с каждым элементом произвольную логическую проверку. Оператор `case` по порядку выполняет эти проверки до тех пор, пока результат одной из них не примет значение “истина”. Тогда выполняется соответствующее действие. Все остальные действия игнорируются. Читатели, знакомые с языком LISP, сразу же заметят, что этот оператор обладает той же семантикой, что и оператор `cond` из LISP.

Вторым нововведением является оператор `return`, зависящий от одного аргумента. Он может встречаться в любом месте процедуры или функции. При достижении этого оператора программа немедленно завершает выполнение функции и возвращает результат. Остальной стиль псевдокода соответствует синтаксису языка Pascal.

Дополнительный материал, доступный через Internet

Представленный в книге код на языках PROLOG и LISP читатели могут получить через Internet. Там же можно найти подробные методические рекомендации по использованию этой книги для преподавателей. Эти файлы находятся по адресу www.booksites.net/luger или на личной странице автора www.cs.unm.edu/~luger/.

Дополнительные материалы и программные средства, в том числе публикуемые издательствами Addison-Wesley и Pearson Education, находятся по адресу www.aw.com/cs/ и www.pearsoneduc.com/computing. Автор с удовольствием ожидает электронных писем читателей по адресу luger@cs.unm.edu.

Благодарности

Во-первых, мы хотим поблагодарить Билла Стабблефилда — соавтора первых трех изданий за более чем десятилетний труд над этой книгой. Спасибо также многим рецензен-

там, которые помогли подготовить эти четыре издания. В их числе Дэннис Бахлер (Dennis Bahler), Скона Бриттэн (Skona Brittain), Филипп Чен (Philip Chan), Питер Колингвуд (Peter Collingwood), Джон Дональд (John Donald), Сара Дуглас (Sarah Douglas), Кристоф Жиред-Карьер (Christophe Giraud-Carrier), Эндрю Косорезов (Andrew Kosoresov), Крис Малкольм (Chris Malcolm), Рэй Муни (Ray Mooney), Брюс Портер (Bruce Porter), Джуд Шавлик (Jude Shavlik), Карл Стерн (Carl Stern), Марко Валторта (Marco Valtorta) и Боб Верофф (Bob Veroff). Мы также благодарны за многочисленные предложения и комментарии, направляемые непосредственно авторам книги ее читателями по электронной почте.

За помощь в реорганизации материала автор признателен своим аспирантам. Благодаря им была переработана часть III, в которой впервые описана эволюция схем представлений для задач искусственного интеллекта, создан отдельный раздел по машинному обучению, а вопросы понимания естественных языков перенесены в конец книги. Мы благодарны Дану Плессу (Dan Pless) за его вклад в подготовку материала по абдуктивному выводу для главы 8, Карлу Стерну (Carl Stern) за помощь в написании главы 10, посвященной коннекционистскому обучению, Яреду Сайа (Jared Saia) за помощь в описании стохастических моделей для главы 13. “Внешними” рецензентами четвертого издания стали Леон ван дер Торре (Leon van der Torre) и Мехди Дастанани (Mehdi Dastani) из Нидерландов, а также Леонардо Боттачи (Leonardo Bottaci) и Джулиан Ричардсон (Julian Richardson) из Великобритании. Среди американских рецензентов следует отметить Марека Перковски (Marek Perkowski) из портлендского университета и Джона Шеппарда (John Sheppard) из университета имени Джона Хопкинса. Барак Пермуттер (Barak Pearmutter) рецензировал главы по машинному обучению. И, наконец, Джозеф Льюис (Joseph Lewis), Крис Малкольм (Chris Malcolm), Брэнден Мак-Гоннигл (Brendan McGonnigle) и Акаша Танг (Akasha Tang) приняли участие в обсуждении главы 16.

Автор благодарен издательству Academic Press за разрешение на перепечатку большей части материала из главы 10, которая была ранее опубликована в [Luger, 1994]. И, наконец, большое спасибо студентам университета Нью-Мексико, которые более десяти лет изучали эту книгу и описанные в ней программные средства. Они существенно расширили наш горизонт, а также позволили избавиться от опечаток и неточностей.

Спасибо моим друзьям из издательства Addison-Wesley за поддержку при написании книги, особенно Алану Апту (Alan Apt) за помощь в подготовке первого издания, Лизе Моллер (Lisa Moller) и Мэри Тюдор (Mary Tudor) за участие в подготовке второго, Виктории Хендерсон (Victoria Henderson), Луизе Вилсон (Louise Wilson) и Карен Мосман (Karen Mosman) за содействие в работе над третьим, а также Кэйт Мансфилд (Keith Mansfield), Карен Сюзерланд (Karen Sutherland) и Аните Аткинсон (Anite Atkinson) за поддержку этого четвертого издания. Особая благодарность Линде Цицарелле (Linda Ciacarella) из университета Нью-Мексико за помощь в подготовке рисунков.

Спасибо большое Томасу Бэрроу (Thomas Barrow) — всемирно признанному художнику и профессору искусств университета Нью-Мексико, который сделал семь фотографий для этой книги.

Во многих местах мы использовали рисунки и цитаты из работ других авторов. Мы благодарны авторам и издателям за разрешение на использование этого материала.

Искусственный интеллект — это увлекательная и благодарная дисциплина. Осознав его силу и глубину, вы получите удовольствие от изучения этой книги.

Джордж Люгер
1 июля 2001 года