

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки**

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

(назва навчальної дисципліни)

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з навчальної дисципліни**

підготовки _____ *спеціаліста*
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

напряму _____ *7.05010301 Програмна інженерія*
(шифр і назва)

**програми
професійного
спрямування** _____ *Програмне забезпечення систем*
(шифр і назва)

Методи та системи штучного інтелекту / Конспект лекцій з навчальної дисципліни.
Укладач д о ц . Баклан І.В.

© НТУУ «КПІ», 2014 рік

Лекція 1. Введення до штучного інтелекту

Інтелектуальність в основному пов'язана з раціональною діяльністю. У ідеальному випадку інтелектуальний агент в будь-якій ситуації робить найкращу можливу дію. У подальшому викладі розглядається проблема створення агентів, які є інтелектуальними саме в цьому сенсі.

Філософи заклали основи штучного інтелекту, сформулювавши ідеї, що мозок в певних стосунках нагадує машину, що він оперує знаннями, закодованими на якійсь внутрішній мові, і що мислення може використовуватися для вибору найкращих дій, що робляться.

Математиків надали інструментальні засоби для маніпулювання висловами, що володіють логічною достовірністю, а також недостовірними ймовірнісними висловами. Крім того, вони заклали основу не лише розуміння того, що є обчисленнями, але і формування міркувань про алгоритми.

Економісти формалізували проблему ухвалення рішень, що максимізували очікуваний виграш для особи, що приймає рішення.

Психологи підтвердили ідею, що люди і тварини можуть розглядатися як машини обробки інформації. Лінгвісти показали, що процеси використання природної мови укладаються в цю модель.

Комп'ютерні інженери надали артефакти, завдяки яким стало можливим створення додатків штучного інтелекту. Зазвичай програми штучного інтелекту мають великі розміри, і не могли б працювати без тих значних досягнень в підвищенні швидкодії і об'єму пам'яті, які були досягнуті в комп'ютерній індустрії.

Теорія управління присвячена проектуванню пристроїв, які діють оптимально на основі зворотного зв'язку з середовищем. Спочатку математичні інструментальні засоби теорії управління вельми відрізнялися від вживаних в штучному інтелекті, але ці наукові області все більше зближуються.

Історія штучного інтелекту характеризується періодами успіху і невинуватого оптимізму, за якими слідувало зниження інтересу і скорочення

фінансування. У ній також були періоди, коли з'являлися нові творчі підходи, а потім кращі з них систематично удосконалювалися.

Штучний інтелект розвивався швидше, ніж зазвичай, в минуле десятиліття, оскільки в цій області стали ширшими застосовуватися наукові методи експериментування і порівняння підходів.

Останні досягнення на дорозі розуміння теоретичних основ інтелектуальності нерозривно пов'язані з розширенням можливостей реальних систем. Окремі підобласті штучного інтелекту стали більшою мірою інтегрованими, а сам штучний інтелект успішно знаходить загальне підґрунтя з іншими науковими дисциплінами.

Лекція 2. Інтелектуальні агенти

Агентом є щось сприймає і діє в певному середовищі. Функція агента визначає дію, що робиться агентом у відповідь на будь-яку послідовність актів сприйняття.

Показники продуктивності оцінюють поведінку агента в середовищі. Раціональний агент діє так, щоб максимізувати очікувані значення показників продуктивності, з врахуванням послідовності актів сприйняття, отриманої агентом до даного моменту.

Специфікація проблемного середовища включає визначення показників продуктивності, зовнішнього середовища, виконавчих механізмів і датчиків. Першим етапом проектування агента завжди має бути визначення проблемного середовища з найбільшою можливою повнотою.

Варіанти проблемного середовища класифікуються по декільком важливій розмірності. Вони можуть бути повністю або частково спостережуваними, детермінованими або стохастичними, епізодичними або послідовними, статичними або динамічними, дискретними або безперервними, а також одноагентними або мультіагентними.

Програма агента реалізує функцію агента. Існує цілий ряд основних проектів програм агента, відповідних характеру явно сприйманої інформації, яка використовується в процесі ухвалення рішення. Різні проекти характеризуються різною ефективністю, компактністю і гнучкістю. Вибір найбільш відповідного проекту програми агента залежить від характеру середовища.

Прості рефлексні агенти відповідають безпосередньо на акти сприйняття, тоді як рефлексні агенти, засновані на моделі, підтримують внутрішній стан, досліджуючи ті аспекти середовища, які не спостерігаються в поточному акті сприйняття. Агенти, що діють на основі мети, організовують свої дії так, щоб досягти своїх цілей, а агенти, що діють з врахуванням корисності, намагаються максимізувати свою власну очікувану "задоволеність". Всі агенти здатні покращувати свою роботу завдяки навчанню.

Лекція 3. Технології пошуку - основа систем розв'язання задач

Перш ніж агент зможе приступити до пошуку рішень, він повинен сформулювати мету, а потім використовувати цю мету для формулювання завдання. Завдання складається з чотирьох частин: початковий стан, безліч дій, функція перевірки мети і функція вартості дороги. Середовище завдання представлене простором станів, а дорога через простір станів від початкового стану до цільового стану є рішенням.

Для вирішення будь-якого завдання може використовуватися єдиний, загальний алгоритм Tree-search; конкретні варіанти цього алгоритму втілюють різні стратегії. Алгоритми пошуку оцінюються на основі повноти, оптимальності, тимчасової і просторової складності. Складність залежить від коефіцієнт галуження в просторі станів, b , і глибини самого поверхневого рішення, d .

При пошуку завширшки для розгортання вибирається самий поверхневий нерозгорнений вузол в дереві пошуку. Цей пошук є повним, оптимальним при одиничних вартостях етапів і характеризується тимчасовою і просторовою складністю $O(b^d)$. У зв'язку з такою просторовою складністю в більшості випадків він стає практично не застосовним. Пошук по критерію вартості аналогічний пошуку завширшки, але передбачає розгортання вузла з найнижчою вартістю дороги, $g(n)$. Він є повним і оптимальним, якщо вартість кожного кроку перевищує деяке позитивне граничне значення e .

При пошуку в глибину для розгортання вибирається найглибший нерозгорнений вузол в дереві пошуку. Цей пошук не є ні повним, ні оптимальним, і характеризується тимчасовою складністю $O(b^m)$ і просторовою складністю $O(bm)$, де m — максимальна глибина будь-якої дороги в просторі станів.

При пошуку з обмеженням глибини на пошук в глибину накладається встановлена межа глибини.

При пошуку з ітеративним поглибленням викликається пошук з обмеженням глибини і кожного разу встановлюються межі, що збільшуються,

до тих пір, поки мета не буде знайдена. Цей пошук є повним і оптимальним при одиничних вартостях етапів і характеризується тимчасовою складністю $O(b^m)$ і просторовою складністю $O(bm)$.

Двонаправлений пошук здатний надзвичайно зменшити тимчасову складність, але він не завжди застосовний і може зажадати надто багато простору. Якщо простором станів є граф, а не дерево, то може виявитися доцільною перевірка полягань, що повторюються, в дереві пошуку. Алгоритм Graph-search усуває всі дублюючі стани.

Якщо середовище є частково спостережуваним, то агент може застосувати алгоритми пошуку в просторі довірчих станів, або безлічі можливих станів, в яких може знаходитися агент. В деяких випадках може бути сформована єдина послідовність рішення; у інших випадках агентові потрібний план дій в непередбачених ситуаціях, щоб мати можливість впоратися зі всіма невідомими обставинами, які можуть виникнути.

Лекція 4. Інформований пошук на просторі станів

Пошук по першому найкращому збігу зводиться просто до вживання алгоритму Graph-search, в якому для розгортання вибираються нерозгорнені вузли з мінімальною вартістю (відповідно до деякого критерію). У алгоритмах пошуку по першому найкращому збігу зазвичай використовується евристична функція $h(n)$, яка оцінює вартість досягнення вирішення з вузла n .

При жадібному пошуку по першому найкращому збігу розгортаються вузли з мінімальним значенням $h(n)$. Цей пошук не оптимальний, але часто є ефективним.

При пошуку A^* розгортаються вузли з мінімальним значенням $f(n) = g(n) + h(n)$. Алгоритм A^* є повним і оптимальним, за умови, що гарантована допустимість (для алгоритму Tree-search) або спадкоємність (для алгоритму Graph-search) функції $h(n)$. Просторова складність алгоритму A^* все ще залишається дуже високою.

Продуктивність алгоритмів евристичного пошуку залежить від якості евристичної функції. Інколи хороші евристичні функції можна скласти шляхом ослаблення визначення завдання, попереднього обчислення вартості вирішення підзадач і збереження цієї інформації в базі даних шаблонів або навчання на основі досвіду вирішення даного класу завдань.

Алгоритмами RBFS і SMA* є надійні, оптимальні алгоритми пошуку, в яких використовуються обмежені об'єми пам'яті; за наявності достатньої кількості часу ці алгоритми можуть вирішувати такі завдання, які не дозволяють вирішувати алгоритм A^* , оскільки вичерпує доступну пам'ять.

Такі методи локального пошуку, як пошук зі сходженням до вершини, діють на основі формулювань повного стану і передбачають зберігання в пам'яті лише невеликої кількості вузлів. Було розроблено також декілька стохастичних алгоритмів, включаючи пошук з емуляцією відпалу, які повертають оптимальні рішення за наявності відповідного графіка "охолодження" (тобто графіка поступового зменшення величини випадкового розкиду). Крім того, багато методів локального пошуку можуть

використовуватися для вирішення завдань в безперервних просторах.

Генетичним алгоритмом є стохастичний пошук зі сходженням до вершини, в якому супроводиться велика популяція станів. Нові стани формуються за допомогою мутації і схрещування; у останній операції комбінуються пари станів, узятих з цієї популяції.

Проблеми дослідження виникають, якщо агент не має жодного уявлення про те, які полягання і дії в його середовищі. Для безпечно досліджуваних варіантів середовища агенти, що виконують пошук в оперативному режимі, можуть скласти карту і знайти мету, якщо вона існує. Ефективним методом виходу з локальних мінімумів є оновлення евристичних оцінок на основі досвіду.

Лекція 5. Завдання задоволення обмежень

Завдання задоволення обмежень (Constraint Satisfaction Problems — CSP) складаються із змінних з обмеженнями, що накладаються на них. У вигляді завдань CSP можуть бути описані багато важливих завдань реального світу. Структуру будь-якого завдання CSP можна представити у вигляді її графа обмежень. Для вирішення завдань CSP зазвичай застосовується пошук з поверненнями — одна з форм пошуку в глибину.

Незалежними від області визначення методами виявлення того, яка змінна має бути вибрана наступною в ході пошуку з поверненнями, є евристики, засновані на визначенні мінімальної кількості значень, що залишилися, і статечні евристики. Для впорядкування значень змінною може застосовуватися евристика з найменш обмежувальним значенням.

У алгоритмі пошуку з поверненнями можна набагато скоротити коефіцієнт галуження завдання, поширюючи наслідки часткових привласнень, сформованих в ході роботи цього алгоритму. Простим методом такого поширення є попередня перевірка. Потужнішим методом є забезпечення сумісності дуг, але вживання цього методу може виявитися дорожчим.

Повернення відбувається після того, як для змінної не можна більше знайти допустиме привласнення. При використанні зворотного переходу, керованого конфліктами, повернення відбувається безпосередньо до джерела проблеми, що виникла в процесі пошуку. Для вирішення завдань з обмеженнями вельми успішно використовується локальний пошук на основі евристики з мінімальними конфліктами.

Складність рішення задачі CSP в значній мірі залежить від структури її графа обмежень. Завдання з деревовидною структурою можуть бути вирішені за лінійний час. Метод визначення умов формування безлічі розриву циклу дозволяє перетворити завдання CSP загального вигляду в завдання з деревовидною структурою і є дуже ефективним, якщо існує можливість знайти невелику безліч розриву циклу. Методи деревовидної декомпозиції передбачають перетворення завдання CSP в дерево підзадач і є ефективними,

якщо ширина дерева графа обмежень мала.

Лекція 6. Пошук рішення в умовах протидії

Будь-яка гра може бути визначена за допомогою початкового полягання (яке показує, як здійснюється підготовка дошки до гри), допустимих дій в кожному стані, перевірки термінального стану (що дозволяє визначити, коли гра закінчена) і функції корисності, яка застосовується до термінальних станів.

У іграх з двома гравцями і нульовою сумою, що характеризуються повною інформацією, для вибору оптимальних ходів за допомогою перебору вузлів в глибину в дереві гри може використовуватися алгоритм мінімаксного пошуку.

Алгоритм альфи-бети-пошуку обчислює такі ж оптимальні ходи, як і алгоритм мінімаксного пошуку, але дозволяє досягти набагато більшої ефективності, видаляючи піддерева, які, ймовірно, не потрібні для пошуку рішення.

Зазвичай не представляється можливим розглядати все дерево гри (навіть за допомогою альфи-бети-пошуку), тому необхідно в якійсь крапці зупиняти пошук і застосовувати функцію оцінки, що дозволяє визначити наближене значення корисності деякого стану.

Ведення ігор з елементами випадковості можна здійснити за допомогою розширення алгоритму мінімаксного пошуку, в якому оцінюються вузли жеребкування шляхом визначення середньої корисності всіх їх дочірніх вузлів з врахуванням вірогідності кожного дочірнього вузла.

Для визначення оптимальних ходів в іграх з неповною інформацією, таких як бридж, необхідно формувати міркування про поточний і майбутній довірчих станах для кожного гравця. Одна з простих апроксимацій може бути отримана шляхом усереднювання значення даної дії зі всіх можливих конфігурацій бракуючої інформації.

Лекція 7. Логічні агенти

Інтелектуальним агентам потрібні знання про світ для того, щоб вони чи міг виробляти хороші рішення. Знання містяться в агентах у формі висловів на мові представлення знань, які зберігаються в базі знань.

Агент на основі знань складається з бази знань і механізму логічного виводу. Він діє шляхом збереження висловів про світ в своїй базі знань, використання механізму логічного виводу для здобуття нових висловів і вживання цих висловів для ухвалення рішення про те, яку дію слід виконати.

Мова подання визначається за допомогою його синтаксису, який задає структуру висловів, і його семантики, яка визначає істинність кожного вислову в кожному з можливих світів, або модель цього вислову. Для розуміння процесу формування логічних міркувань украй поважно визначити, як зв'язані логічні следствия різних висловів.

З вислову α слідує інший вислів β , якщо β є достеменним у всіх світах, де істинно α . Еквівалентні визначення засновані на понятті допустимості вислову $\alpha \Rightarrow \beta$ і нездійсненності вислову $\alpha \wedge \neg\beta$.

Логічний вивід — це процес здобуття нових висловів із старих. Несуперечливі алгоритми логічного виводу забезпечують здобуття лише таких висловів, які є логічними следствиями; повні алгоритми забезпечують здобуття всіх висловів, що є логічними следствиями.

Пропозиціональна логіка — це дуже простий мова, що складається з пропозиціональних символів і логічних в'язок. Ця мова дозволяє розглядати вислови, відносно яких відомо, чи є вони достеменними, помилковими або мають повністю невідоме логічне значення.

За наявності постійного словника пропозиціональних символів безліч можливих моделей залишається кінцевою, тому логічне слідство можна перевірити, перебираючи моделі. Ефективні алгоритми логічного виводу на основі перевірки по моделі для пропозиціональної логіки включають методи пошуку з поверненнями і локального пошуку і часто дозволяють дуже швидко вирішувати крупні завдання.

Правилами логічного виводу є шаблони несуперечливого логічного виводу, які можуть використовуватися для пошуку доказів. Правило резолюції дозволяє створити повний алгоритм логічного виводу для баз знань, які представлені в кон'юнктивній нормальній формі. Прямий логічний вивід і зворотний логічний вивід — це алгоритми логічного виводу, які надзвичайно природно личать для баз знань, представлених у формі хорновських виразів.

На основі пропозиціонально логіки можуть бути створені агенти двох типів: у агентах на основі логічного виводу для стеження за світом і виявлення його прихованих властивостей використовуються алгоритми логічного виводу, тоді як в агентах на основі логічних схем вислову представлені у вигляді бітів в регістрах, а оновлення вмісту регістрів відбувається в результаті поширення сигналів за логічними схемами.

Пропозиціональна логіка є досить ефективною для вирішення деяких завдань в окремо взятому агентіві, але не дозволяє розповсюдити свою дію в масштабах таких варіантів середовища, які володіють необмеженими розмірами, оскільки не має достатньої виразної потужності, яка дозволила б коротко виразити тимчасові, просторові і інші універсальні шаблони зв'язків між об'єктами.

Лекція 8. Логіка першого порядку

Мови представлення знань мають бути декларативними, композиційними, виразними, незалежними від контексту і несуперечливими. Різні варіанти логіки відрізняються один від одного по своєму онтологічному вкладу і епістемологічному вкладу.

Пропозиціональна логіка вносить вклад лише до загального об'єму відомостей, що стосуються існування фактів, а логіка першого порядку дозволяє нарощувати об'єм відомостей, що стосуються існування об'єктів і стосунків, тому набуває значної виразної потужності.

Можливий світ, або модель, для логіки першого порядку визначається безліччю об'єктів, стосунками між ними і функціями, які можуть до них застосовуватися.

Константні символи іменують об'єкти, предикативні символи іменують стосунки, а функціональні символи іменують функції. Інтерпретація задає відображення між символами і моделлю. У складних термах функціональні символи застосовуються до термів для іменування об'єкту. Істинність вислову визначається за наявності інтерпретації і моделі.

Атомарний вислів складається з предиката, вживаного до одного або декількох термів; воно стає достеменним тоді і лише тоді, коли має місце відношення, позначене предикатом, між об'єктами, позначеними його термами. У складних висловах, так само як і в пропозиціональній логіці, використовуються в'язки, а вислови з кванторами дозволяють виражати загальні правила.

Для розробки бази знань в логіці першого порядку потрібно ретельно провести процес аналізу проблемної області, вибору словника і складання аксіом, необхідних для підтримки бажаних процедур логічного виводу.

Лекція 9. Логічний вивід в логіці першого порядку

У першому підході використовується правило логічного виводу для конкретизації кванторів в цілях перетворення завдання логічного виводу у форму пропозиціональної логіки. Як правило, цей підхід характеризується дуже низькою швидкістю.

Використання уніфікації для виявлення відповідних підстановок для змінних дозволяє усунути етап конкретизації в доказах першого порядку, внаслідок чого цей процес стає набагато ефективнішим.

У піднятій версії правила відділення уніфікація застосовується для здобуття природного і потужного правила логічного виводу — узагальненого правила відділення. У алгоритмах прямого логічного виводу і зворотного логічного виводу це правило застосовується до безлічі певних виразів.

Узагальнене правило відділення є повним стосовно певних виразів, але проблема логічного слідства залишається напіввирішеною. Для програм Datalog, що складаються з певних виразів без функцій, проблема логічного слідства вирішувана.

Прямий логічний вивід використовується в дедуктивних базах даних, де він може поєднуватися з реляційними операціями баз даних. Він також застосовується в продукційних системах, які забезпечують ефективне оновлення за наявності дуже великих наборів правив. Прямий логічний вивід для програм Datalog є повним і виконується за час, визначуваний поліноміальною залежністю.

Зворотний логічний вивід використовується в системах логічного програмування, таких як Prolog, в яких реалізована складна технологія компіляції для забезпечення дуже швидкого логічного виводу.

Недоліками зворотного логічного виводу є зайві етапи логічного виводу і безконечні цикли; ці недоліки можна усунути шляхом запам'ятовування.

Узагальнене правило логічного виводу на основі резолюції дозволяє створити повну систему доказу для логіки першого порядку з використанням баз знань в кон'юнктивній нормальній формі.

Існує декілька стратегій скорочення простору пошуку для систем з резолюцією без втрати повноти. Ефективні засоби автоматичного доказу теорем на основі резолюції використовувалися для доказу цікавих математичних теорем, а також для перевірки і синтезу програмних і апаратних засобів.

Лекція 10. Логічні моделі представлення знань

Для великомасштабного представлення знань потрібна онтологія загального призначення, що дозволяє організувати і зв'язати воєдино різні спеціалізовані галузі знань. Онтологія загального призначення повинна охоплювати широкий круг знань і бути здатною, в принципі, представити будь-яку проблемну область.

У лекції дається верхня онтологія, заснована на категоріях і численні подій. Тут розглядалися структуровані об'єкти, час і простір, зміни, процеси, речовини і переконання.

Дії, події і час можуть бути представлені або за допомогою ситуаційного числення, або із застосуванням виразніших засобів вистави, таких як числення подій і числення флюєнтних висловів. Такі вистави дають можливість агентів скласти плани за допомогою логічного виводу.

Розумові стани агентів можуть бути представлені рядками, які описують їх переконання.

У лекції представлений детальний аналіз проблемної області здійснення покупок в Internet, досліджена загальна онтологія і показано, як знання проблемної області можуть використовуватися торгівельним агентом.

Описані системи представлення загального призначення, такі як семантичні мережі і описові логіки, що дозволяють організувати ієрархії категорій. З цими системами пов'язана важлива форма логічного виводу, звана спадкоємством, дозволяюча визначати логічним шляхом властивості об'єктів на підставі даних про їх приналежність до категорій.

Припущення про замкнутий світ, будучи реалізованим в логічних програмах, надає простий спосіб уникнути необхідності задавати великі об'єми негативної інформації. Таку інформацію найпростіше інтерпретувати як задану за умовчанням, яка може бути пері визначена за допомогою додаткової інформації.

цілому для надання можливості здійснювати формування міркувань за умовчанням призначені немонотонні логіки, такі як логіка непрямого опису і

логіка умовчання. Вживання програмування безлічі відповідей дозволяє прискорити немонотонний логічний вивід, багато в чому аналогічно тому, як використання алгоритму WALKSAT прискорює пропозиціональний логічний вивід.

Системи підтримки істинності дозволяють ефективно здійснювати оновлення і передивляються баз знань.

Лекція 11. Основи планування агентів

Системи планування засновані на використанні алгоритмів вирішення завдань, які застосовуються до явних представлень станів і дій в пропозиціональній логіці (або логіці першого порядку). Такі вистави забезпечують можливість здобуття ефективних евристик, а також розробки потужних і гнучких алгоритмів для вирішення завдань планування.

У мові Strips застосовуються описи дій в термінах їх передумов і результатів, а також опису початкових і цільових станів у вигляді кон'юнкцій позитивних літералів. У мові ADL деякі обмеження мови Strips ослаблені і допускається використання диз'юнкції, заперечення і кванторів.

Пошук в просторі станів може діяти в прямому (прогресивному) напрямі або у зворотному напрямі. Ефективні евристики можуть бути отримані шляхом прийняття припущення про незалежність подцелей, а також за допомогою різних ослаблень завдання планування.

У алгоритмах планування з частковим впорядкуванням (Partial-order Planning ~ POP) простір планів досліджується без прагнення до створення повністю впорядкованої послідовності дій. Такі алгоритми діють у зворотному напрямі від мети, додаючи в план дії, потрібні для досягнення кожної подцелі. Такий підхід стає особливо ефективним при вирішенні завдань, прийнятних для використання підходу за принципом "розділяй і володарюй".

Граф планування може формуватися інкрементно, починаючи з початкового стану. Кожен його рівень містить надмножина всіх літералів або дій, які можуть виявлятися на даному тимчасовому етапі. Крім того, на кожному рівні умовно задаються стосунки взаємного виключення, або стосунки, що взаємно виключають, між літералами або діями, які не можуть відбуватися одночасно. Графи планування дозволяють отримувати корисні евристики для планувальників в просторі станів і планувальників з частковим впорядкуванням і можуть використовуватися безпосередньо в алгоритмі Graphplan.

Алгоритм Graphplan обробляє граф планування, використовуючи зворотний пошук для витягання плану. Цей алгоритм допускає певне часткове

впорядкування між діями.

У алгоритмі Satplan завдання планування перетвориться в пропозиціональні аксіоми і після цього до них застосовується алгоритм перевірки здійсності для пошуку моделі, відповідної дійсному плану. Було розроблено декілька різних пропозиціональних вистав, що володіють різною мірою компактності і ефективності.

Кожен з основних підходів до планування має свої прибічники, і ще не досягнута повна згода в тому, який з цих підходів є найкращим. Конкуренція між цими підходами і їх взаємне збагачення привели до істотного підвищення ефективності систем планування.

Лекція 12. Планування і здійснення дій на реальному світі

У багатьох діях споживаються ресурси, такі як гроші, паливо або сировина. Ці ресурси зручно в цілому розглядати як числові величини, а не намагатися міркувати, скажімо, про кожну окрему монету або купюру у всьому світі. Дії здатні виробляти і споживати ресурси, тому зазвичай дешевше і ефективніше перевіряти часткові плани на предмет задоволення в них ресурсних обмежень, перш ніж робити спроби їх подальшого уточнення.

Час — це один з найбільш важливих ресурсів. За його витрачанням можна стежити, застосовуючи спеціалізовані алгоритми складання розкладів або об'єднуючи складання розкладів з плануванням.

Планування за допомогою ієрархічної мережі завдань (Hierarchical Task Network — HTN) дозволяє агентів отримати пораду від проектувальника проблемної області у формі правил декомпозиції. Такий підхід забезпечує створення дуже великих планів, потрібних для багатьох реальних застосувань. У стандартних алгоритмах планування передбачається наявність повної і правильної інформації, а також детермінованого, повністю спостережуваного середовища. Це припущення є недійсним в багатьох проблемних областях.

З проблемою неповної інформації в плануванні можна впоратися, використовуючи дії з вживання датчиків для здобуття необхідної інформації. Умовні плани дозволяють агентів отримувати за допомогою датчиків інформацію про світ під час виконання плану для визначення того, по якій гілці плану він повинен слідувати далі. В деяких випадках може використовуватися планування без використання датчиків або погоджене планування для формування плану, який під час свого виконання не вимагає вживання результатів сприйняття. І плани без використання датчиків, і умовні плани можуть бути сформовані по методу пошуку в просторі довірчих станів.

Неправильна інформація приводить до того, що передумови дій і планів залишаються невиконаними. Контроль виконання дозволяє виявляти порушення передумов, створюючи передумови успішного здійснення плану.

У переплануючому агентів використовується контроль виконання і в

міру необхідності здійснюються відновні дії для повернення до первинного плану. Безперервно плануючий агент створює нові цілі в процесі своєї діяльності і реагує на зміни ситуації в реальному часі.

Мультиагентне планування необхідне, якщо в середовищі є інші агенти, з якими доводиться кооперувати, конкурувати або координувати свої дії. У багатотільному плануванні формуються спільні плани з використанням ефективної декомпозиції описів спільних дій, але це планування повинне доповнюватися певною формою координації, якщо два кооперативні агенти повинні погоджувати один з одним, яким із спільних планів слід виконати.

Лекція 13. Невизначеність

Невизначеність виникає і унаслідок економії зусиль, і через відсутність знань. Невизначеності не можна уникнути в складних, динамічних або важкодоступних світах. Наявність невідомості означає, що багато спрощень, можливих в дедуктивному логічному виводі, стають більше не допустимими.

У оцінках вірогідності виражається нездатність агента прийти до певного рішення, що стосується істинності вислову. Вірогідність є вираженням міри упевненості агента. До основних типів імовірнісних тверджень відносяться твердження, що стосуються апріорної вірогідності і умовної вірогідності простих і складних висловів.

У оцінках вірогідності виражається нездатність агента прийти до певного рішення, що стосується істинності вислову. Вірогідність є вираженням міри упевненості агента. До основних типів імовірнісних тверджень відносяться твердження, що стосуються апріорної вірогідності і умовної вірогідності простих і складних висловів.

Якщо повний спільний розподіл доступний, воно може використовуватися для здобуття відповідей на запити шляхом підсумовування елементів з даними про атомарні події, відповідні висловам запиту. Наявність властивості абсолютної незалежності між підмножинами випадкових змінних дозволяє факторизувати повний спільний розподіл на менші спільні розподіли. Це дає можливість значно зменшити складність, але рідко зустрічається на практиці.

Правило Байеса дозволяє обчислювати невідому вірогідність з відомої умовної вірогідності, зазвичай в причинному напрямі. За наявності багаточисельних свідочтв вживання правила Байеса, як правило, приводить до виникнення таких же проблем масштабування, які виникають при використанні повного спільного розподілу.

Властивість умовної незалежності, викликана наявністю прямих причинних зв'язків в даній проблемній області, може забезпечити факторизацію повного спільного розподілу на менші умовні розподіли. У наївній

байесовської моделі передбачається наявність умовної незалежності всіх змінних дії, якщо задана одна змінна причини; розміри цієї моделі збільшуються лінійно, залежно від кількості результатів.

Агент в печері Вія може розраховувати вірогідність спостережених об'єктів світу і використовувати їх для ухвалення кращих рішень в порівнянні з тими, які приймає простий логічний агент.

Лекція 14. Формування міркувань в умовах невизначеності

Байесовська мережа — це орієнтований ациклічний граф, вершини якого відповідають випадковим змінним; з кожною вершиною пов'язаний розподіл умовної вірогідності для цієї вершини, якщо дані її батьківські вершини. Байесовські мережі лежать в основі зручного способу представлення стосунків умовної незалежності в даній проблемній області.

Будь-яка байесовська мережа задає повний спільний розподіл; кожен елемент спільного розподілу визначається як твір відповідних елементів в локальних умовних розподілах. Байесовська мережа часто дозволяє експоненціально зменшити розміри імовірнісної вистави в порівнянні з повним спільним розподілом.

Багато умовних розподілів можуть бути представлені компактно за допомогою канонічних сімейств розподілів. Цілий ряд канонічних розподілів використовується в гібридних байесовських мережах, які включають і дискретні, і безперервні змінні.

Під імовірнісним виводом в байесовських мережах мається на увазі обчислення розподілу вірогідності безлічі змінних запиту, якщо дана безліч змінних свідчення. Алгоритми точного імовірнісного виводу, такі як алгоритм усунення змінної, дозволяють обчислювати суми творів умовної вірогідності настільки ефективно, наскільки це можливо.

У полідеревах (одинзв'язних мережах) точний імовірнісний вивід вимагає часу, лінійно залежного від розміру мережі. А в загальному випадку проблема такого виводу нерозв'язна. Методи стохастичної апроксимації, такі як оцінка ваги з врахуванням правдоподібності і метод Монте-Карло на основі ланцюга Марков, дозволяють отримати прийнятні оцінки дійсної апостеріорної вірогідності в мережі і здатні впоратися з набагато крупнішими мережами в порівнянні з точними алгоритмами.

Теорія вірогідності може застосовуватися у поєднанні з ідеями представлення знань, запозиченими з логіки першого порядку, для створення дуже потужних систем формування міркувань в умовах невизначеності.

Реляційні моделі вірогідності (Relational Probability Model — RPM) включають обмеження на засоби вистави, які гарантують здобуття повністю певного розподілу вірогідності, який може бути виражене у вигляді еквівалентної байесовської мережі.

Були запропоновані цілий ряд альтернативних систем для формування міркувань в умовах невизначеності. Взагалі кажучи, істиннісно-функціональні системи не дуже добре личать для таких міркувань.

Лекція 15. Імовірнісні міркування в часі

Зміну стану світу можна врахувати, використовуючи безліч випадкових змінних для представлення цього стану в кожен момент часу. Такі вистави можуть бути спроектовані так, щоб вони задовольняли властивості марковості, згідно з яким майбутнє не залежить від минулого, якщо дано сьогоднішнє. У поєднанні з припущенням про те, що даний процес є стаціонарним (тобто таким, що його закони не змінюються в часом), це дозволяє набагато спростити представлення.

Тимчасова імовірнісна модель може розглядатися як модель переходу, що містить, яка описує процес розвитку, і модель сприйняття, що описує процес спостереження. Основними завданнями імовірнісного виводу в тимчасових моделях є фільтрація, передбачення, згладжування і визначення за допомогою обчислень найбільш вірогідного пояснення. Кожне з цих завдань може бути вирішена з використанням простих, рекурсивних алгоритмів, час виконання яких лінійно залежить від довжини даної послідовності.

Трохи більш детально було описано три сімейства тимчасових моделей: приховані марківські моделі, фільтри Кальмана і динамічні байесовські мережі (остання модель включає дві перших як окремі випадки). Двома важливими застосуваннями для тимчасових імовірнісних моделей є розпізнавання мови і стеження.

Якщо не прийняті особливі припущення, як при використанні фільтрів Кальмана, точний імовірнісний вивід за наявності багатьох змінних стану, мабуть, стає нездійсненним. Створюється враження, що на практиці ефективним алгоритмом апроксимації є алгоритм фільтрації часток.

Лекція 16. Ухвалення простих рішень агентом

Теорія ймовірностей описує, в чому повинен бути впевнений агент згідно отриманому свідчень, теорія корисності показує, до чого повинен прагнути агент, а теорія прийняття рішень дозволяє об'єднати підходи цих двох теорій для визначення того, що повинен робити агент. Теорія прийняття рішень може використовуватися для створення систем, які приймають рішення, розглядаючи всі можливі дії і вибираючи з них саме ту, яка призводить до найкращого очікуваного результату. Така система відома під назвою раціонального агента.

Теорія корисності показує, що агент, який керується стосунками переваги між лотереями, сумісними з безліччю простих аксіом, може бути описаний як той, який володіє функцією корисності; крім того, агент вибирає дії так, щоб можна було максимізувати його очікувану корисність.

Теорія багатокритеріальної корисності присвячена вивченню корисності, яка залежить від декількох різних атрибутів станів. Стохастичним домінуванням є особливо зручний метод ухвалення несуперечливих рішень навіть за відсутності точних значень корисності для атрибутів.

Мережі ухвалення рішень є простою формальною системою для опису і вирішення завдань ухвалення рішень. Вони є природним розширенням байєсовських мереж і, крім вузлів жеребкування, містять вузли рішення і вузли корисності.

Інколи для вирішення завдання доводиться займатися пошуком додаткової інформації, перш ніж приймати рішення. Вартість інформації визначена як очікуване підвищення корисності в порівнянні з ухваленням рішень без цієї інформації. Експертні системи, в яких передбачається використання інформації про корисність, володіють додатковими можливостями в порівнянні з системами, в яких застосовується виключно імовірнісний вивід.

Вони не лише володіють здатністю виробляти рішення, але і можуть використовувати вартість інформації для визначення того, чи слід прагнути до її здобуття, а також здатні розрахувати чутливість своїх рішень до невеликих змін

в оцінках вірогідності і корисності.

Лекція 17. Ухвалення складних рішень агентом

Завдання послідовного ухвалення рішень в невизначених варіантах середовища, звані також марківськими процесами ухвалення рішень (Markov Decision Process — MDP), визначаються за допомогою моделей переходу, задаючих імовірнісні результати дій, і функції винагороди, яка показує, яка винагорода відповідає кожному стану.

Корисність послідовності станів є сумою всіх винагород уздовж цієї послідовності, яка, можливо, з часом піддається знеціненню. Рішенням задачі MDP є стратегія, в якій з кожним станом, досяжним для агента, зв'язано деяке рішення. Оптимальна стратегія максимізувала корисність послідовності станів, що зустрічається, при її здійсненні.

Корисністю стану є очікувана корисність послідовностей станів, що зустрічаються при здійсненні оптимальної стратегії, починаючи з цього стану. Алгоритм ітерації по значеннях для вирішення завдань MDP діє за принципом ітеративного вирішення рівнянь, що зв'язують корисності кожного стану з полезностями його сусідніх станів.

У алгоритмі ітерації по стратегіях чергуються етап обчислення полезностей станів згідно поточної стратегії і етап удосконалення поточної стратегії по відношенню до поточних полезностям.

Завдання MDP в частково спостережуваному середовищі, або завдання POMDP, є набагато важчими для вирішення, чим завдання MDP. Вони можуть бути вирішені шляхом перетворення в завдання MDP в безперервному просторі довірчих станів. Оптимальна поведінка при вирішенні завдань POMDP повинна передбачати збір інформації для зменшення невизначеності і тому ухвалення кращих рішень в майбутньому.

Для варіантів середовища POMDP може бути створений агент, що діє на основі теорії рішень. У такому агентові для представлення моделі переходу і моделі спостереження для оновлення його довірчого стану і проектування можливих послідовностей дій в прямому напрямі використовується динамічна мережа ухвалення рішень.

Теорія ігор описує раціональну поведінку для агентів в тих ситуаціях, в яких одночасно взаємодіють безліч агентів. Рішеннями для ігор є рівноваги Неша — профілі стратегій, в яких жоден з агентів не має стимул-реакцій, під впливом яких він міг би відхилитися від визначеної для нього стратегії.

Проектування механізму може використовуватися для визначення правил, по яких має бути організоване взаємодія агентів в цілях максимізації деякої глобальної корисності завдяки функціонуванню окремих раціональних агентів. Інколи удається знайти механізми, що дозволяють досягти цієї мети, не вимагаючи від кожного агента, щоб він враховував те, які варіанти вибрані іншими агентами.

Лекція 18. Навчання на основі спостережень

Навчання приймає багато різних форм залежно від характеру продуктивного елемента, компонента, підмета удосконаленню, і доступному зворотному зв'язку. Якщо доступний зворотний зв'язок або від вчителя, або від середовища, що дозволяє набувати правильних значень, що відносяться до прикладів, то завдання навчання відноситься до типу контрольованого навчання.

Таке завдання, зване також індуктивним навчанням, зводиться до винавчання деякої функції на прикладах її вхідних і вихідних даних. Винавчання функції з дискретними значеннями називається класифікацією; винавчання безперервної функції називається регресією.

Індуктивне навчання зводиться до пошуку сумісної гіпотези, яка узгоджується з прикладами. При цьому повинен дотримуватися принцип бритви Оккама, згідно з яким слід завжди вибирати найбільш просту сумісну гіпотезу. Складність рішення цієї задачі залежить від вибраного способу вистави.

Дерева рішень дозволяють представити будь-які булеві функції. Евристика, що визначає приріст інформації, може стати основою ефективного методу пошуку простого, сумісного дерева рішень.

Продуктивність повчального алгоритму вимірюється кривою навчання, яка показує прогностичну точність вживання алгоритму до перевірконої безлічі як функцію від розміру повчальної безлічі.

Методи навчання ансамблю дерев рішень, такі як посилення, часто показують вищу продуктивність в порівнянні з методами навчання окремих дерев рішень. Для аналізу вибіркової і обчислювальної складності індуктивного навчання застосовується теорія обчислювального навчання. Ця теорія дозволяє знайти компроміс між виразністю мови гіпотез і легкістю навчання.

Лекція 19. Вживання знань у навчанні

Успішне вживання апріорних знань у навчанні показує, що ще перспективнішим є кумулятивне навчання, в якому агенти, що виучуються, підвищують свою здібність до навчання у міру того, як набувають все більше і більше знань. Апріорні знання сприяють навчанню, оскільки дозволяють усувати помилкові гіпотези, які в іншому випадку вважалися б сумісними, а також "доповнювати" пояснення прикладами, що приводить до створення коротших гіпотез. Такі можливості часто дозволяють добитися прискореного навчання за допомогою меншої кількості прикладів.

Апріорні знання можуть виконувати різні функції в логічному виводі, а описи цих функцій, виражені у формі обмежень логічного слідства, дозволяють визначити цілий ряд всіляких методів навчання.

У методі навчання на основі пояснення (Explanation-based Learning — EBL) передбачається витягання загальних правил з окремих прикладів шляхом формування пояснень для цих прикладів і узагальнення пояснень. Методом EBL є дедуктивний метод, за допомогою якого знання основних принципів перетворюються в корисні, ефективні експертні знання спеціального призначення.

У методі навчання з врахуванням релевантності (Relevance-based Learning — RBL) використовуються апріорні знання у формі визначень для виявлення релевантних атрибутів, що приводить до створення зменшеного простору гіпотез і прискорення навчання. Метод RBL забезпечує також створення дедуктивних узагальнень на основі окремих прикладів.

У методі індуктивного навчання на основі знань (Knowledge-based Inductive Learning — KBIL) передбачається пошук індуктивних гіпотез, що дозволяють пояснювати безліч результатів спостережень за допомогою фонових знань.

У методах індуктивного логічного програмування (Inductive Logic Programming — ILP) метод KBIL застосовується до знань, виражених в логіці першого порядку. Методи ILP дозволяють отримувати в процесі навчання такі реляційні знання, яке не можуть бути виражені в системах на основі атрибутів.

Індуктивне логічне програмування може здійснюватися в рамках низхідного підходу, в якому здійснюється уточнення дуже загального правила, або висхідного підходу, зворотного по відношенню до процесу дедуктивного логічного виводу.

За допомогою методів ІЛР природним чином виробляються нові предикати, за допомогою яких можуть бути виражені нові сміливі теорії, тому вони відкривають можливість створення систем формування наукових теорій загального призначення.

Лекція 20. Статистичні методи навчання

У методах байесовського навчання завдання навчання формулюється як один з видів імовірнісного виводу, в якому спостереження використовуються для оновлення розподілів апіорної вірогідності по гіпотезах. Таким підходом є хороший спосіб реалізації принципу бритви Оккама, але швидко стає важкоздійсненним при зростанні складності простору гіпотез.

У навчанні на основі максимальної апостеріорної вірогідності (Maximum A Posteriori — MAP) вибирається єдина гіпотеза, найбільш вірогідна згідно з наявними даними. При цьому все ще використовується розподіл апіорної вірогідності гіпотези і сам цей метод часто є легше здійсненним, ніж повне байесовське навчання.

У навчанні з врахуванням максимальної правдоподібності вибирається гіпотеза, яка максимізувала правдоподібність даних; цей метод еквівалентний методу навчання MAP з рівномірним розподілом апіорної вірогідності.

У простих випадках, таких як лінійна регресія і повністю спостережувані байесовські мережі, рішення з врахуванням максимальної правдоподібності можна легко знайти в замкнутій формі. Особливо ефективним методом, який добре масштабується, є найвне байесовське навчання.

Якщо деякі змінні приховані, то рішення з локальною максимальною правдоподібністю можна знайти з використанням алгоритму ІМ. До числа додатків відповідного методу входить кластеризація за допомогою змішаних розподілів гаусів, навчання байесовських мереж і прихованих марківських моделей.

Визначенням в процесі навчання структур байесовських мереж є приклад методу вибору моделі. У цьому методі зазвичай передбачається дискретний пошук в просторі структур. При цьому необхідно якимсь чином забезпечити пошук компромісу між складністю моделі і мірою її відповідності даним.

У моделях на основі екземпляра розподіл представлений з використанням колекції повчальних екземплярів. Таким чином, кількість параметрів зростає із збільшенням розмірів повчальної безлічі. У методах найближчої сусідньої

крапки здійснюється пошук екземплярів, найближчих до даної крапки, а в ядерних методах формується комбінація всіх екземплярів, зважена по відстані.