

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ – АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Дивеев

Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН

Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2

E-mail: aidiveev@mail.ru

Ключевые слова: машинное обучение управления, символьная регрессия, эволюционные вычисления.

Аннотация: Сегодня система автоматического управления любого современного устройства, например робота, представляет собой программу, работающую на бортовом процессоре этого устройства или робота. Машинное обучение управления согласно определению представляет собой некоторое автоматическое средство или тоже программу для написания или изменения программы системы управления. В работе рассмотрены существующие технологии для автоматического написания программ или их компонент, определены их общие характеристики, достоинства, недостатки и ограничения применения. Выделены методы символьной регрессии, как наиболее перспективное направление для машинного обучения управления. Перечислены примеры успешного решения задач управления на основе машинного обучения методами символьной регрессии. Приведены основные проблемы, возникающие при использовании методов символьной регрессии для машинного обучения управления, и перспективные указаны направления для их преодоления.

1. Введение

Сегодня система автоматического управления любого современного устройства, например робота, представляет собой программу, работающую на бортовом процессоре этого устройства или робота. Машинное обучение управления согласно определению представляет собой некоторое автоматическое средство или тоже программу для написания или изменения программы системы управления. В работе рассмотрены существующие технологии для автоматического написания программ или их компонент, определены их общие характеристики, достоинства, недостатки и ограничения применения. Выделены методы символьной регрессии, как наиболее перспективное направление для машинного обучения управления. Перечислены примеры успешного решения задач управления на основе машинного обучения методами символьной регрессии. Приведены основные проблемы, возникающие при использовании методов символьной регрессии для машинного обучения управления, и перспективные указаны направления для их преодоления. В настоящий период развития технологий техническое создание любого автоматического устройства не представляет особой трудности.

Робототехническое устройство, реализующее практически любые возможные действия, задуманные разработчиком, технически выполняются в короткий период. Основная проблема и время создания автоматических устройств, в том числе и различных роботов состоит в построении их систем управления. В результате практических реализаций различных систем управления сложилось мнение, что разработка систем управления любого автоматического устройства включает следующие обязательные этапы. Определение состава, месторасположения и установка датчиков для получения информации о текущем состоянии объекта управления. Исследование модели объекта и определение каналов управления. Разработка системы управления за счет установки в каналы управления регуляторов, иногда специально разработанных для этого объекта, обеспечивающих необходимые и качественные действия объекта управления для достижения им цели управления с заданным или оптимальным значением критерия качества.

Как видим, процесс создания системы управления включает обязательные «ручные» этапы, это исследование модели, определение каналов управления, разработка и установка регуляторов. Более того в теории управления наличие «ручных» этапов разработки систем управления всячески поощряется, так как это является предметом научных исследований, темой научных работ и стимулом для разработки новых математических теорий в области управления. Человечество на протяжении своего технологического развития пришло к выводу, что основным подходом к ускорению процесса производства является его автоматизация, т.е. исключение ручного труда. В технологии создания автоматических устройств основным «тормозом» является процесс создания систем автоматического управления для этих устройств. В данном случае по аналогии с развитием технологического процесса создания технических устройств, очевиден вывод, что для ускорения процесса создания автоматических устройств необходимо автоматизировать этап построения систем автоматического управления для этих автоматических устройств, причем также за счет исключения ручного труда.

Современные системы автоматического управления для автоматических устройств в подавляющем большинстве случаев представляют собой программы, работающие на бортовом процессоре этих устройств. Отсюда следует, что процесс автоматизации создания систем управления состоит в автоматическом написании программ. Но такая задача в общем случае сейчас далека от решения. Если рассматривать программу, как код математических выражений некоторых функций, и считать, что написание кода не представляет особой сложности, то для автоматизации процесса создания программ достаточно автоматизировать процесс нахождения математических выражений для функции. В общем случае процесс автоматического поиска функций сегодня является ключевым во многих областях человеческой деятельности. Если же рассматривать историю, то процесс подбора функций для описания закономерностей, наблюдаемых в природе, всегда был главной целью исследований во всех областях науки.

2. Проблема поиска математического выражения функции

Для поиска математического выражения функции необходимо определить ее структуру и записать функцию с точностью до значений параметров. Затем найти значения этих параметров, чтобы функция соответствовала решаемой задаче. Построение структуры функции выполняется, как правило вручную исследователем на основе анализа решаемой задачи. Процесс поиска структуры функции сложный базируется на интуиции и опыте исследователя. Поэтому часто в задачах поиска функции использовались универсальные структуры функций, которые в зависимости от значений параметров позволяют описывать любые возможные функции. В качестве таких структур при поиске одномерных функций с одним аргументом использовали различные ряды, Тейлора, Фурье и др. В двадцатом веке для аппроксимации многомерных функций со многими аргументами была создана искусственная нейронная сеть (ИНС) [1].

Различные типы ИНС всегда представляют собой функцию с заданной структурой и большим количеством неопределенных параметров. Поиск значений этих параметров называется обучением ИНС. В последнее время применение ИНС в различных областях дало существенные прорывы [2], но в области создания систем управления ИНС практически не используется. Проблема здесь состоит том, что для систем управления в процессе их создания невозможно получить достаточную обучающую выборку потому, что любая функция управления существенно меняет его динамику. С математической точки зрения, если модель объекта управления описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений со свободным вектором управления в правой части, то замена этого вектора управления на любую функцию, в том числе аппроксимируемую ИНС существенно меняет решения системы дифференциальных уравнений и поэтому невозможно заранее получить достаточную обучающую выборку по модели без функции управления.

Альтернативой ИНС при создании систем управления является символьная регрессия. Кстати, первый и наиболее известный метод символьной регрессии генетическое программирование [3] был создан для решения задачи автоматического написания программ и был реализован на языке функционального программирования. В работе [4] символьная регрессия предложена как инструмент для машинного обучения управления, хотя ее использование для решения задач управления, в том числе и для решения задачи синтеза управления началось раньше [5]. В настоящий период использование методов символьной регрессии для решения задач управления является главным направлением к автоматизации процесса создания систем автоматического управления [6].

Преимущество применения символьной регрессии для функции управления состоит в том, что в результате решения получаем математическое выражение функции управления в явном виде и поиск не требует использования обучающей выборки. Методы символьной регрессии кодируют математическое выражение в форме специального кода. Для этой цели используется алфавит элементарных функций, в который могут входить достаточно разнообразный вид функций. Далее осуществляется поиск оптимальной согласно заданному критерию функции на пространстве кодов. При поиске используется специальный генетический алгоритм, который выполняет основную операцию скрещивания, специально разработанную

для кода символьной регрессии так, чтобы в результате скрещивания получить новые корректные коды математических выражений. Основная проблема поиска математического выражения на пространстве кодов состоит в том, что данное пространство не является числовым, т.е. метрика расстояний между кодами не совпадает с метрикой расстояний между кодируемыми функциями, т.е. коды могут отличаться незначительно, а кодируемые ими функции различаться существенно и наоборот. Для решения этой проблемы. Для повышения эффективности поиска предложено использовать принцип малых вариаций базисного решения [7]. Согласно этому принципу кодируется только одно возможное решение, которое называется базисным. Остальные возможные решения кодируются в форме упорядоченных мультимножеств малых вариаций базисного решения. Операции генетического алгоритма выполняются над этими мультимножествами. Такой подход сокращает область поиска, а малые вариации сохраняют свойство наследования, согласно которому часть возможных решений-потомков, полученных в результате операции скрещивания, должны иметь значения целевой функции близкие к значениям целевой функции родительских возможных решений. К тому же специалисты, разработчики систем управления всегда способны интуитивно или на основе опыта, а также на основе упрощения модели объекта и применения аналитических методов построить достаточно близкую к оптимальной функцию управления, которую при поиске следуют принять за базисную.

3. Пример машиной функции управления

Приведем пример найденной одним из методов символьной регрессии, методом сетевого оператора, функции управления для пространственной стабилизации квадрокоптера.

Математическая модель объекта управления имеет соледующий вид:

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4; \\ \dot{x}_2 &= x_5; \\ \dot{x}_3 &= x_6; \\ \dot{x}_4 &= u_4(\cos(u_1) \sin(u_3) \cos(u_2) + \sin(u_1) \sin(u_2)); \\ \dot{x}_5 &= u_4 \cos(u_1) \cos(u_3) - g; \\ \dot{x}_6 &= u_4(\cos(u_1) \sin(u_3) \sin(u_2) + \sin(u_1) \cos(u_2)). \end{aligned}$$

где $g = 9.80665$, \mathbf{x} – вектор пространства состояний, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^6$, \mathbf{u} – вектор управления \mathbf{u} in $U \in \mathbb{R}^4$. U – компактное множество, определяющий ограничения на значения компонент вектора управления,

$$(2) \quad \begin{aligned} u_1^- &= -\pi/12 \leq u_1 \leq \pi/12 = u_1^+ \\ u_2^- &= -\pi \leq u_2 \leq \pi = u_2^+, \\ u_3^- &= -\pi/12 \leq u_3 \leq \pi/12 = u_3^+, \\ u_4^- &= 0 \leq u_4 \leq 12 = u_4^+. \end{aligned}$$

Метод сетевого оператора нашел следующее решение

$$(3) \quad u_i = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } \hat{u}_i > u_i^+ \\ u_i^-, & \text{если } \hat{u}_i < u_i^- \\ \hat{u}_i, & \text{иначе} \end{cases}, i = 1, \dots, m = 4,$$

где

$$(4) \quad \begin{aligned} \hat{u}_1 &= \mu(C), \quad \hat{u}_2 = \hat{u}_1 - \hat{u}_1^3, \\ \hat{u}_3 &= \hat{u}_2 + \rho_{19}(W + \mu(C)) + \rho_{17}(A), \\ \hat{u}_4 &= \hat{u}_3 + \ln(|\hat{u}_2|) + \operatorname{sgn}(W + \mu(C))\sqrt{|W + \mu(C)|} + \rho_{19}(W) + \\ &\quad \arctan(H) + \operatorname{sgn}(F) + \arctan(E) + \exp(q_2(x_2^f - x_2)) + \sqrt{q_1}, \\ C &= q_6(x_6^f - x_6) + q_3(x_3^f - x_3), \quad W = V + \tanh(G) + \exp(D), \\ A &= q_1(x_1^f - x_1) + q_4(x_4^f - x_4), \quad H = G + \tanh(F) + \rho_{18}(B), \\ F &= E + C + \arctan(D) - B, \quad E = D + \operatorname{sgn}(x_5^f - x_5) + (x_2^f - x_2)^3, \\ V &= \exp(H) + \cos(q_6(x_6^f - x_6)) + \operatorname{sgn}(D)\sqrt{|D|}, \quad G = F + \sqrt[3]{E} + \sin(A), \\ B &= \sin(q_6(x_6^f - x_6)) + q_5(x_5^f - x_5) + q_2(x_2^f - x_2) + \cos(q_1) + \vartheta(x_2^f - x_2), \\ D &= \rho_{17}(C) + B^3 + A + \vartheta(q_5(x_5^f - x_5)) + (x_5^f - x_5)^2, \\ \mu(z) &= \begin{cases} z, & \text{если } |z| < 1 \\ \operatorname{sgn}(z), & \text{иначе} \end{cases}, \quad \vartheta(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad \rho_{17}(z) = \operatorname{sgn}(z) \ln(|z|+1), \\ \rho_{18}(z) &= \operatorname{sgn}(z)(\exp(|z|) - 1), \quad \rho_{19}(z) = \operatorname{sgn}(z) \exp(-|z|), \end{aligned}$$

$$q_1 = 7.26709, \quad q_2 = 11.46143, \quad q_3 = 12.77026, \quad q_4 = 3.20630, \quad q_5 = 8.38501, \quad q_6 = 5.56250.$$

Как видим, метод символьной регрессии нашел достаточно сложное математическое выражение, но поскольку оно было найдено в форме кода, то в программе управления в бортовом процессоре объекта следует также использовать код этого выражения.

4. Выводы

В качестве основного направления исследований в области управления сегодня предложена автоматизация процесса создания систем автоматического управления. В качестве основного инструмента для автоматизации предложено использовать методы символьной регрессии.

Список литературы

1. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.-С.Пб.-Киев: Вильямс, 2003. 287 с.
2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвиль А. Глубокое обучение. М.: ДМК-Пресс, 2017, 652 с.
3. Koza J.R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, 1992. 819 p.
4. Duriez, T., Brunton, S.L., Noack, B.R. Machine Learning Control—Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence. Cham, Switzerland: Springer, 2017.
5. Diveev A., Sofronova E. Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system // IFAC Proceedings Volumes. 2008. Vol. 41, No. 2. P. 6106–6113.
6. Diveev A.I., Shmalko E.Y. Machine Learning Control by Symbolic Regression. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 155 p.
7. Diveev A.I. Small variations of basic solution method for non-numerical optimization // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, No. 25. P. 028-033.
8. Diveev A., Shmalko E. Adaptive Synthesized Control for Solving the Optimal Control Problem // Mathematics. 2023. Vol. 11. P. 4035.