

Система управления положением шара на наклонной плоскости

А. В. Девяткин, Т. М. Сагаян,
Н. П. Сорокина, Т. П. Руднева
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

T. Minav
Aalto University

М. С. Волкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Abstract. In this paper, ball on the plate control system realization is considered. Real physical prototype was used as a base of computer virtual model. The computer model is realized with python programming language and Bullet physical engine framework. The realization of the control system uses the approaches of PID-controller. For the control system optimization genetic algorithm was used. Fitness function of genetic algorithm optimization process is considered and optimized for faster learning and better performance. Neuroevolution approach is used in comparison with classical linear control with nonlinear plant.

Keywords: Machine learning; PID-controller; genetic algorithm; ball on the plate; neuroevolution

I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Алгоритмы управления, разработанные для платформы с параллельной кинематикой, применяются в различных областях: системы стабилизации в морских судах, системы стабилизации подвеса камеры беспилотных летательных аппаратов и т.д. Система шар на плоскости представляет из себя свободно катающийся шар на плоскости. Относительно системы координат в плоскости он имеет две степени свободы. Главной целью управления является перемещение шара в заданную точку и удержание.

Выделяют три основных подхода к решению задачи стабилизации шара на плоскости:

- традиционные методы линейного управления, основанные на построении точной математической модели,
- оптимальные и нелинейные законы управления, также требующие точного мат. описания,
- адаптивные (нечеткие модели, нейронные сети) методы, основанные на подстройке коэффициентов модели, регуляторов и т.д.

К первому классу систем управления относится широко применяемый алгоритм пропорционального интегрального дифференциального управления (ПИД) [1]. Также широко распространен метод линейно-квадратичного регулирования (LQR) [2].

Ко второму классу относятся методы робастного управления, такие как скользящий режим [3, 5], управление Н-бесконечность [3, 4].

К третьему классу систем управления относятся адаптивные и интеллектуальные системы. Применяются различные техники для настройки параметров ПИД регулятора на основе нейронной сети [6], системы с нечеткой логикой [3, 7, 8].

В данной работе рассматривается разработка системы управления положением шара на наклонной плоскости с применением нейроэволюционных алгоритмов. Разработка системы основывается на большом количестве моделирования поведения шара на плоскости с системой управления. Для реализации используется виртуальная модель, основанная на физическом прототипе системы позиционирования шара на плоскости.

II. 2. ФИЗИЧЕСКАЯ И ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛИ

В основе разработки виртуальной модели лежит разработанный прототип системы позиционированием шара на плоскости, изображенный на рис. 1.

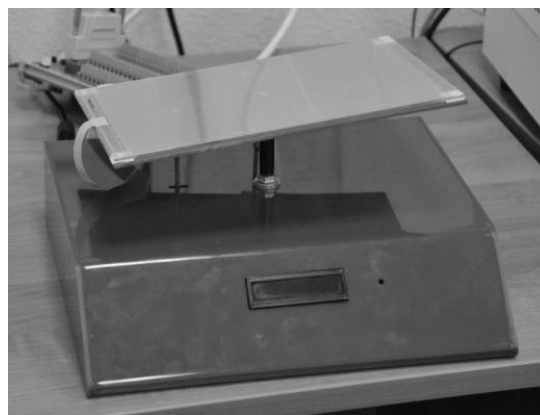


Рис. 1. Физический прототип системы

Созданный макет представляет собой неподвижное основание и подвижную платформу, закрепленную при помощи стойки с шарниром, обладающим двумя степенями свободы. Изменение положения плоскости в пространстве осуществляется посредством системы механических тяг, соединенных с качалками двух сервомашин.

Параметры прототипа представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ

Параметр	Значение
Диаметр шара	52.2 мм
Вес шара	205 г
Габариты платформы	3 x 190 x 250 мм
Вес платформы	415 г

Модификация системы управления с использованием генетического алгоритма, а также использование нейроэволюции, предполагает проведение большого количества экспериментов. Для увеличения скорости разработки была построена компьютерная модель (рис. 2) на основе модификации библиотеки Bullet для языка Python.

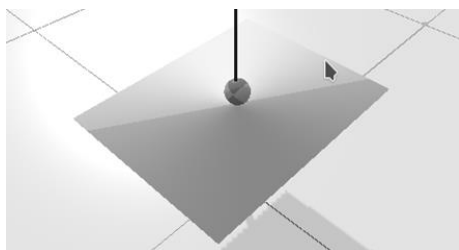


Рис. 2. Виртуальная модель системы

Разработанная виртуальная модель позволит в дальнейшем производить разработку и анализ системы с использованием современных подходов и математических пакетов.

III. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Использование системы на основе ПИД-регулятора имеет преимущества с точки зрения встраиваемости и реализации. Указанный линейный закон управления имеет малое количество настраиваемых параметров и прост в понимании действия. Однако, поскольку объект управления является системой нелинейной, использование линейного регулятора в качестве конечной системы управления не целесообразно, тем не менее данный закон управления отлично подходит в качестве отправной точки (baseline) для исследования разрабатываемой системы.

Разработанная виртуальная модель позволяет использовать итеративные методы оптимизации с целью нахождения параметров системы управления, отвечающих заданным требованиям. Одним из таких методов является применение генетических алгоритмов. Для его использования необходимо задать функцию оценки системы, которая позволит алгоритму менять параметры, двигаясь в сторону экстремума данной функции, поэтому чаще всего данную функцию принимают в следующем виде (1):

$$fit = f(x) \quad (1)$$

где fit – численный показатель «хорошести» (goodness) системы, x – параметры системы для оптимизации.

Для динамической системы позиционирования типа шара на плоскости лучше всего подходит интегральный критерий оценки, основанный на показателе ошибки системы, который вычисляется исходя из расхождения задания положения и реального положения шара на плоскости. Интегральный критерий имеет следующий вид (2):

$$fit = \int_0^T (ref - d(x, t))^2 dt \quad (2)$$

где T – период моделирования системы, ref – задание положения шара на плоскости, d – функция положения шара на плоскости от параметров системы.

В критерии (2) квадрат использован с целью получения абсолютного значения. Минимизация данного критерия позволяет получить минимальное время переходного процесса без учета статической ошибки позиционирования, а также затрат энергии для управления положением плоскости.

Для усиления влияния статической ошибки по положению в критерий (2) добавляется множитель, который увеличивает влияние ошибки с течением времени (3):

$$fit = \int_0^T t * (ref - d(x, t))^2 dt \quad (3)$$

Данный критерий (3) был использован при оптимизации параметров ПИД-регулятора, а также при разработке системы управления на основе нейроэволюции.

Оптимизация параметров генетическим алгоритмом проводилась с использованием генома типа списка вещественных чисел с длиной три, которые являлись параметрами пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих регулятора.

Для оптимизации работы алгоритма были выбраны задания переходов из одного квадранта плоскости в другой, при этом переход должен был соответствовать переходу через центр координатной плоскости. Схема переходов изображена на рис. 3.

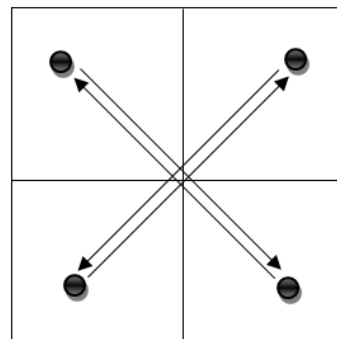


Рис. 3. Схема обучающих переходов

При использовании генетического алгоритма было использовано 30 популяций генов в одной эпохе.

Для использования генетического алгоритма с виртуальной моделью был использован фреймворк DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) [9].

В результате выполнения четырех испытаний результаты функций оценки усредняются и представляются в качестве результата оценки всей системы для дальнейшей работы генетического алгоритма. По результатам оптимизации в течение 20000 эпох генетическим алгоритмом была

получена относительная оценка 51.7, которая будет далее использоваться для сравнения работы разрабатываемой системы управления с системой управления на основе нелинейного закона управления.

IV. НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Основным недостатком использования системы управления на основе закона ПИД-регулятора в системе позиционирования шара на плоскости является его линейность. Перемещение шара создает нелинейные эффекты, которые можно описать как параметрические возмущения. В связи с этим имеет смысл создания системы управления на основе нелинейного закона управления. При этом необязательно отходить от закона ПИД-регулирования. Один из распространенных подходов в модификации указанного закона является динамическое регулирование его параметров в зависимости от состояния среды и системы в целом. Такой подход предполагает создание закона изменения параметров на основе сведений о состоянии системы.

Разработка закона динамической модификации параметров может быть реализована с использованием аналитического подхода, что является весьма трудоемкой задачей. С другой стороны, задачу создания закона преобразования одного вектора данных в другой можно описать с точки зрения аппроксимации. Таким образом, для реализации закона управления необходимо создание такой функции, которая позволила бы минимизировать функцию оценки системы, тем самым улучшить показатели качества системы.

Решение задачи универсальной аппроксимации может быть получено с использованием нейросетей. В свою очередь, отсутствие статических данных и необходимость взаимодействия с динамической системой вынуждает к использованию подхода нейроэволюции, который заключается в использовании подхода генетического алгоритма для модификации структуры сети. В данной работе разработка виртуальной модели позволила использовать фреймворк NEAT (NeuroEvolution of Augmenting Topologies).

В разработке нейронной сети была использована следующая конфигурация:

ТАБЛИЦА II

Тип сети	Прямое распространение (feedforward)
Размер популяции	30
Вероятность создания связи/узла	0.7
Вероятность удаления связи/узла	0.5
Функция активации	ReLU
Вероятность мутации веса	0.8
Максимальная стагнация	40 эпох
Элитизм видов	1 вид

В результате генерации сети в течение 100000 эпох функция оценки приняла значение 38.5, что ниже основного показателя линейного закона управления.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы было подтверждено предположение о возможности создания системы на осно-

ве нелинейного закона управления использованием нейросетевой структуры. Применение рассматриваемого закона управления позволило улучшить систему по сравнению с классическим ПИД регулятором, параметры которого настраивались с помощью генетического алгоритма.

Также можно сделать ряд предположений для дальнейшей разработки системы управления. Так, например, для улучшения конкретных показателей системы необходимо модифицировать функцию оценки, что изменит направление движения генетического алгоритма как в оптимизации параметров ПИД-регулятора, так и при нейроэволюционном подходе. Также в дальнейшем предполагается использовать критерий оценки затрачиваемой энергии, что позволит оптимизировать работу алгоритма динамической модификации параметров для снижения потребляемой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Luis Alberto Morales Escobar; Marco Anthony Gordón Almeida; Oscar Eduardo Camacho Quintero; Jorge Andrés Rosales Acosta; David Fernando Pozo Espín, «A Comparative Analysis among Different Controllers Applied to the Experimental Ball and Plate System», 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), Quito, Ecuador, Ecuador, DOI: 10.1109/INCISCOS.2017.27
- [2] Lubos Spacek, Vladimir Bobal, Jiri Vojtesek, «Digital control of Ball & Plate model using LQ controller», 2017 21st International Conference on Process Control (PC), Strbske Pleso, Slovakia, DOI: 10.1109/PC.2017.7976185
- [3] Prasanta Roy, Soumitra Acharjee, Arjun Ram, Arindam Das, Tanmoy Sen, Binoy K Roy, «Cascaded sliding mode control for position control of a ball in a ball and plate system», 2016 IEEE Students Technology Symposium (TechSym), Kharagpur, India, DOI: 10.1109/TechSym.2016.7872659
- [4] Hai-Qi Lin, Shi-Gang Cui, Li-Hui Geng, Yong-Li Zhang, «H_∞ controller design for a ball and plate system using normalized coprime factors», The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), Changsha, China, DOI: 10.1109/CCDC.2014.6852194
- [5] Jung-Hyeon Jeon, Chang-Ho Hyun, «Adaptive sliding mode control of ball and plate systems for its practical application», 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Bangkok, Thailand, DOI: 10.1109/ICCRE.2017.7935054
- [6] D. Xiucheng, Z. Zhang, C. Chao, «Applying genetic algorithm to on-line updated PID neural network controllers for ball and plate system», IEEE International Conference of Innovative Computing Information and Control, Kaohsiung, Taiwan, pp. 751-755, 2009, DOI: 10.1109/ICICIC.2009.113
- [7] Roya Khaje Pour, Hassan Khajvand, S. Ali A. Moosavian, «Fuzzy logic trajectory tracking control of a 3-RRS ball and plate parallel manipulator», 2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), Tehran, Iran, DOI: 10.1109/ICROM.2016.7886762
- [8] Prasanta Roy, Soumitra Acharjee, Arjun Ram, Arindam Das, Tanmoy Sen, Binoy K Roy, «Cascaded sliding mode control for position control of a ball in a ball and plate system», 2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Harbin, China, DOI: 10.1109/ICICIP.2011.6008337
- [9] Félix-Antoine Fortin, François-Michel De Rainville, Marc-André Gardner, Marc Parizeau and Christian Gagné, "DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy", Journal of Machine Learning Research, vol. 13, pp. 2171-2175, jul 2012