

Применение нейронной карты для вспомогательного управления в работе портального манипулятора

В. С. Кувшинников, Е. Е. Ковшов

*Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии – Атомстрой»
127410, Москва, Алтуфьевское шоссе, 43, стр. 2*

e-mail: ek177@bk.ru

Аннотация. В статье рассматривается система управления перемещением специализированного промышленного манипулятора. Проводится анализ ключевых особенностей системы, рассматривается и формулируется задача повышения эффективности управления. На основании существующих в мобильной и промышленной робототехнике решений, включающих использование искусственных нейронных сетей, предлагается подход к формированию траектории перемещения манипулятора.

Ключевые слова: система управления, манипулятор, искусственная нейронная сеть, нейронная карта.

1. Введение

Среди всего множества промышленных манипуляторов отдельным классом стоят портальные манипуляторы больших габаритов и масс. При управлении такими манипуляторами стратегия перемещения и выбор траектории оказывают большое влияние на эффективность работы. Специализированные манипуляторы, в свою очередь, обладают набором дополнительных особенностей, которые нередко накладывают существенный отпечаток на всю систему управления (СУ).

Рассматриваемым объектом управления оператора является специализированный портальный манипулятор (ПМ), расположенный над бассейном выдержки (БВ) АЭС и предназначенный для выполнения следующих функций: поиск и выявление мест течей в сварных швах облицовки БВ; зачистка околодефектных мест; ремонт выявленных нецелостностей облицовки БВ заплаточным методом с применением клеевых композиций; проведение контроля установленных заплаток на герметичность; проведение повторного ремонта облицовки БВ при возникновении необходимости.

Обследование и контроль стенок БВ осуществляются поэтапно, по мере частичного освобождения пространства дна и стенок бассейна от хранимых теплоделяющих сборок (ТВС). Характерные особенности установки обусловлены такими

параметрами, как: большие габариты установки и обслуживаемой рабочей зоны: более 14 метров в длину, 6.5 метров в ширину и 20 метров в глубину (рис. 1); большая масса конструкции манипулятора: до 20 тонн; работа в условиях температур до 60 °С; работа в условиях гидростатического давления: до 2 атмосфер; работа в условиях повышенного радиационного фона: мощность поглощенной дозы 30 000 Грей в час; переменный характер расположения и размеров рабочей зоны в рамках рабочего пространства манипулятора; наличие сменных узкоспециализированных модулей рабочего органа (РО) манипулятора; ограниченность обзора оператора, осуществляемого с помощью камер видеонаблюдения.

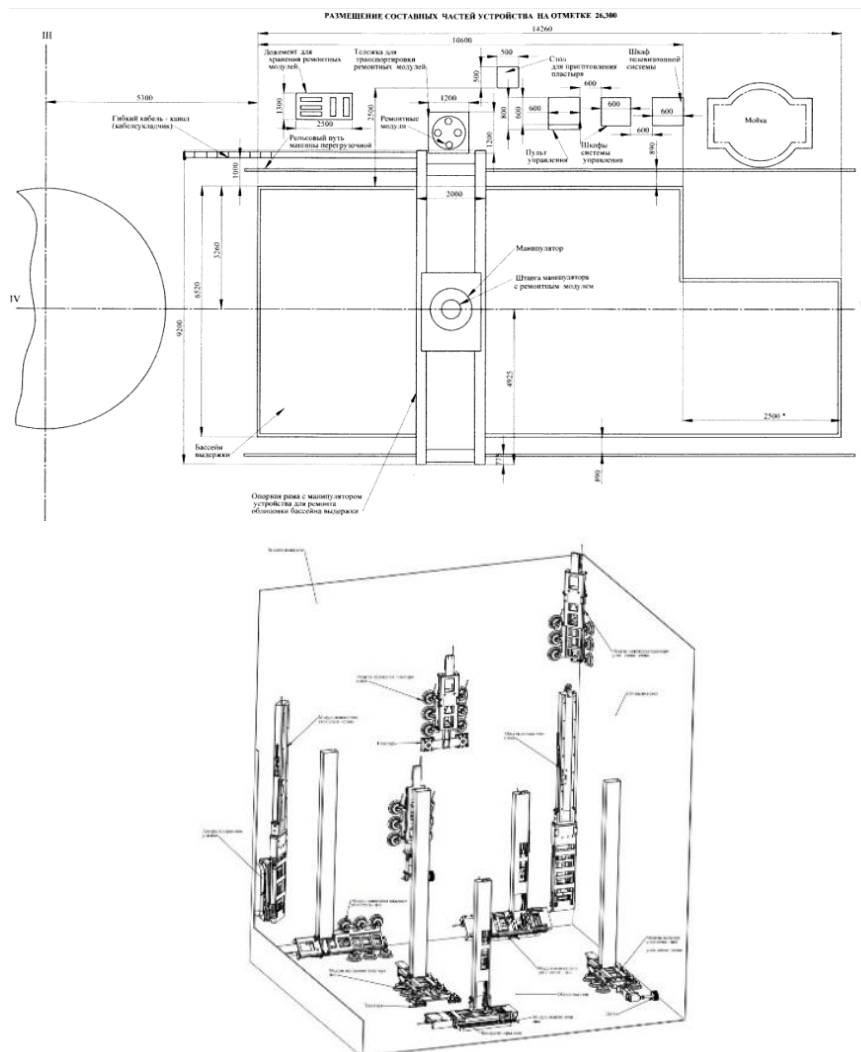


Рисунок 1. План компоновки составных частей установки, положения рабочего органа

Управление осуществляется оператором со специально оборудованного рабочего места при помощи персонального компьютера со специализированным программным обеспечением, как в других интерактивных системах неразрушающего контроля [1]. СУ портального манипулятора является распределенной мультикомпонентной системой, обмен управляющей информацией и данными производится по шинам интерфейсов Ethernet, CAN, RS-485 и дискретным каналам датчиков с помощью протоколов Modbus TCP, CANOpen, FHPP, Modbus ASCII.

При управлении манипулятором по выбранной схеме (рис. 2) все функции стратегического планирования траектории и режима движения РО берет на себя оператор. Формирование оптимальной траектории перемещения РО манипулятора является задачей, которую оператор не в силах решить эффективно в силу ряда причин, обусловленных человеческим фактором, особенностями интерактивного взаимодействия [2] и ограниченностью обзора.

В процессе управления будут возникать отклонения от желаемой траектории движения, перебеги, требующие осуществления дополнительных перемещений для достижения желаемой конечной точки. Подобное управление может привести к следующим нежелательным эффектам: повышенный перегрев и износ обмоток электродвигателей; повышенный износ механической части манипулятора; повышенное энергопотребление; увеличение вспомогательного времени работы манипулятора; увеличение времени обслуживания объекта (БВ).

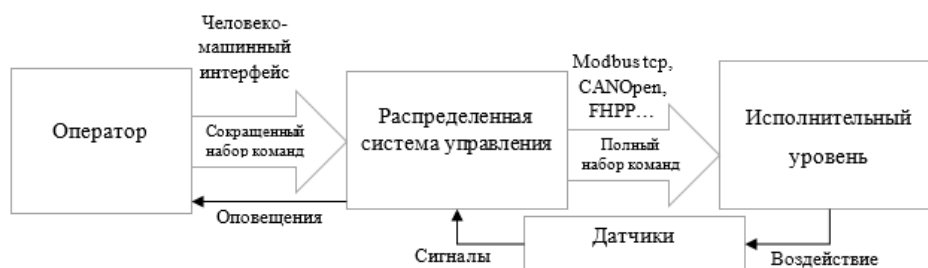


Рисунок 2. Схема управления оператором манипулятором

Таким образом, требуется решить многокритериальную оптимизационную задачу для снижения негативных эффектов управления, осуществляемого оператором ПМ.

Обозначенная выше задача усложняется тем, что, в отличие от существующих решений [3], система не располагает информацией о недопустимых конфигурациях в рассматриваемой системе. Периодическое изменение расположения ТВС не позволяет однозначно определить границы рабочей области, а РО манипулятора не оборудован сенсорами препятствий. В таких условиях СУ располагает данными,

полученными при ручном управлении. Множество допустимых конфигураций манипулятора формируется на основании записанных перемещений, а из полученного множества системой планирования выбирается траектория. Такой подход уступает в эффективности ранее упомянутому, но позволяет без вмешательства в конструкцию ПМ и состав СУ повысить эффективность работы манипулятора, снижая вспомогательное время и время обслуживания БВ.

2. Структура системы планирования перемещения

Процесс получения траектории является многоэтапным процессом обработки данных о текущем положении РО, о форме и размерах рабочего пространства, о конечной точке. Для получения траектории и вспомогательного перемещения рабочего органа ПМ предлагается использовать структуру на базе трех подсистем: нейронной сети, генератора траектории и генератора управляющего сигнала. Разработана архитектура системы управления (рис. 3).

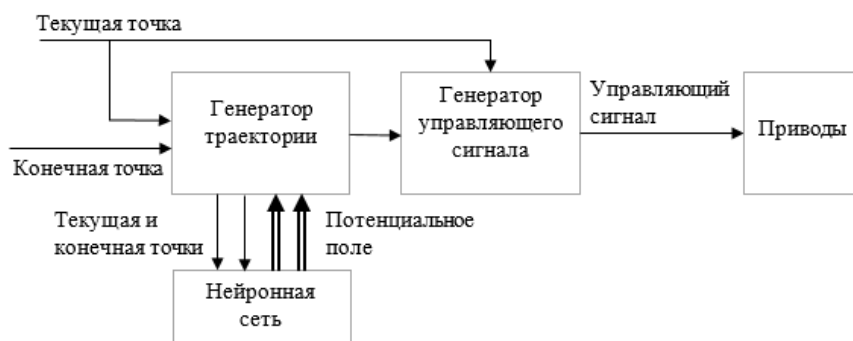


Рисунок 3. Архитектура системы вспомогательного управления движением РО

Существуют решения для формирования траекторий и управления движением мобильных роботов на базе подобной архитектуры [4]. Различия между представленными решениями основаны на особенностях управляемых систем.

С одной стороны, как объект управления, промышленный манипулятор проще: не требуется согласовывать траектории нескольких одновременно управляемых объектов, нет необходимости динамически корректировать траекторию в связи с изменчивыми препятствиями [5], а простой характер рабочей зоны способствует решению большинства задач достижения конечной точки без попадания в сложно определяемые локальные минимумы (рис. 4).



Рисунок 4. Пример локального минимума при поиске траектории на плоскости

С другой стороны, задача управления ПМ осложняется тем, что требуется формировать трехмерную траекторию, нет возможности получать информацию об окружающем пространстве в процессе перемещения РО, а также необходимость работать на больших глубинах под водой требует формирования более сложного потенциального поля стоимости перехода для каждой дискретной конфигурации манипулятора.

3. Этапы планирования перемещения

Определение положения РО манипулятора в пространстве обеспечивается за счет получения информации с датчиков абсолютных линейных координат. Установка манипулятора оснащена датчиками, обеспечивающими информацию об обобщенных координатах X , Y и Z по осям вдоль бассейна, поперек и в вертикальной плоскости соответственно. Рабочую зону ПМ можно условно разделить на несколько областей: воздушная область свободного перемещения, водная область свободного перемещения и потенциально недоступная водная область. Воздушная область свободного перемещения находится над поверхностью воды бассейна выдержки. Эта область характеризуется постоянными размерами и наименьшими затратами на перемещение в связи с низкими силами вязкого трения в воздухе по сравнению с водой. Водная область свободного перемещения — это обширный объем, расположенный в заполненном водой бассейне и ограниченный умозрительными плоскостями, расположенными параллельно стенам и дну бассейна на некотором удалении от них. Эта область свободна от препятствий, но полностью заполнена водой, что формирует градиент стоимости перехода вдоль горизонтальной плоскости в зависимости от глубины погружения штанги ПМ. Потенциально недоступная водная область — это область, заполненная водой, расположенная между водной областью свободного перемещения и стенами/дном бассейна. Ее размеры определяются размерами максимально выступающих технологических конструкций, а также размерами хранимых ТВС. По ряду причин возможности получить сенсорную информацию о форме и размерах этой зоны нет. При формировании траектории имеет

смысл руководствоваться записанной информацией о доступе к внутренней поверхности бассейна, полученной при ручном управлении оператором.

С учетом отмеченных особенностей, задачу планирования перемещения целесообразно декомпозировать на уровни планирования: стратегическое, тактическое, детальное. Подобный подход применяется в том числе в мобильной робототехнике [6] и подходит для планирования перемещений ПМ. Характер рабочей зоны предусматривает либо наличие доступа к участку поверхности бассейна напрямую из области свободного перемещения, либо его полное отсутствие, что упрощает потенциальные траектории достижения любой доступной точки поверхности БВ. По этим причинам основной задачей стратегического уровня планирования будет формирование набора трехмерных векторов направления, задающих последовательность из перемещений к целевым точкам. Tактический уровень планирования подразумевает поиск кратчайшей траектории движения по нейронной карте, сформированной с учетом весовой функции в условиях заданного параметра дискретизации. Детальный уровень планирования призван сгладить траекторию перемещения.

4. Стратегия выбора траектории

Кинематическая схема ПМ включает 3 управляемых поступательных сочленения и одно поворотное, неуправляемое. Неуправляемое поворотное сочленение позволяет монтировать специализированные модули в различных ориентациях, что влияет на габариты РО и определяет координату рабочей точки.

Если дискретизировать конфигурационное пространство манипулятора с разрешением N , то координата в каждом из сочленений j_1, j_2 и j_3 может принимать дискретные значения из диапазона $q_{xj} (xj \in \{1, \dots, N\})$, где q_{1j} и q_{Nj} — нижнее и верхнее конструктивные ограничения линейного перемещения в сочленениях. Пусть все множество конфигураций РО, обусловленное набором модулей и доступных ориентаций, составляет O дискретных вариантов, тогда координата в сочленении j_4 может принимать значения $q_{o4} (o4 \in \{1, \dots, O\})$. Дискретная модель конфигурационного пространства манипулятора в таком случае может быть представлена как множество из $N^3 \cdot O$ векторов

$$DC = \{q_a \mid a = 1 \dots N^3 \cdot O\}, \quad (1)$$

где $q_a = [q_{x1} \ q_{x2} \ q_{x3} \ q_{o4}]^T$ — дискретная конфигурация манипулятора $xj \in \{1, \dots, N\}$, где $j = 1, \dots, 3; o4 \in \{1, \dots, O\}$, a — одномерный индекс, принимающий значения $a = N^2 \cdot O \cdot (x_1 - 1) + N \cdot O \cdot (x_2 - 1) + O \cdot (x_3 - 1) + o_4$.

В связи с тем, что конфигурация сочленения j_4 изменяется только вручную на специализированном участке рабочей зоны, при формировании траектории будем исходить из конфигурации манипулятора в сочленениях j_1 , j_2 и j_3 . При этом учитывая разницу в линейных размерах БВ, величину дискретизации в каждом сочленении на практике имеет смысл выбирать отдельно N_1 , N_2 и N_3 .

Система не располагает информацией о множестве препятствий $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, что мешает определить множество свободных от столкновения конфигураций, как $DC_f = \{q_a \in DC \mid M(q_a) \cap B = \emptyset\}$, обозначив манипулятор в конфигурации q_a , как $M(q_a)$ [7]. Вместо этого определим множество известных безопасно достижимых конфигураций DC_s , как известное подмножество $DC_f \supseteq DC_s$. При этом все множество конфигураций, которые не попадают в DC_s , включая B и $DC_f \setminus DC_s$, обозначим, как множество опасных конфигураций

$$DC_d = B \cup (DC_f \setminus DC_s). \quad (2)$$

Множество безопасных конфигураций складывается из множеств конфигураций, соответствующих воздушной и водной областям свободного перемещения (DC_{fa} , DC_{fw}), а также тех конфигураций потенциально недоступной водной области, которые отнесены к безопасным в процессе наблюдения за действиями оператора при ручном управлении (DC_m):

$$DC_s = DC_{fa} \cup DC_{fw} \cup DC_m. \quad (3)$$

Ключевой стратегией при выборе траектории будет стратегия приведения манипулятора только в безопасные конфигурации, избегая остальные, потенциально опасные.

5. Представление трехмерного пространства

Для упрощения представления, снижения объема сохраняемой информации и сокращения времени доступа заведомо безопасные участки рабочей зоны задаются диапазонами координат. Потенциально недоступная водная область представляется в виде множества соответствующих конфигураций ПМ. При этом для сокращения числа вычислений при фильтрации ячеек соседние конфигурации изначально объединены в объемные группы т. к. изначально все конфигурации в рассматриваемой области считаются опасными. Размер объемных групп выбирается кратным линейному размеру минимальной, базовой группы. Пример размера для кубической группы конфигураций:

$$N_g = n_g^3; n_g = l^i, \quad (4)$$

где N_g — полный размер кубической группы; n_g — линейный размер кубической группы; l — линейный размер базовой группы; i — порядок группы. При $i=0$ рассматривается одиночная конфигурация манипулятора.

Группа конфигураций является трехмерной сверткой соседних конфигураций, которая сохраняет информацию об опасности покрываемой ячейки пространства рабочей зоны. Опасность свертки определяется коэффициентом $d \in [0, \dots, 1]$. Группы, где $d=0$ — полностью безопасны, а где $d=1$ — полностью опасны. Если группа содержит только полностью опасные/безопасные группы более низкого порядка, то она также полностью опасна/безопасна.

Проверка безопасности ячейки пространства сводится к последовательному опросу соответствующих групп по убыванию порядка до получения достаточной или исчерпывающей информации.

6. Генерация траектории

Формирование траектории движения РО манипулятора производится последовательным подъемом из начальной ячейки нейронной карты в конечную по направлению максимального градиента по следующему алгоритму генерации траектории (рис. 5).

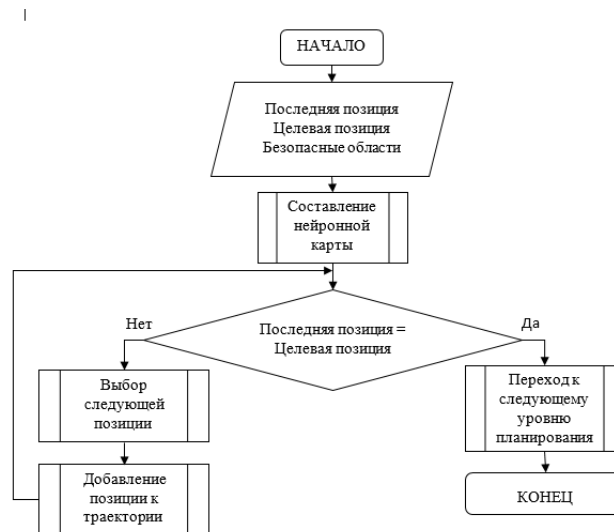


Рисунок 5. Алгоритм генерации траектории

7. Составление нейронной карты

При поиске траектории используем специальное представление множества конфигураций манипулятора — нейронную карту. Для составления нейронной карты группе конфигураций, соответствующей ячейке пространства рабочей зоны, ставится в соответствие один нейрон. Выбор типа нейронной сети обусловлен характером решаемой задачи: фильтрация ячеек окружающего пространства по стоимости перехода из каждой рассматриваемой ячейки рабочей зоны в соседние с учетом весовой функции.

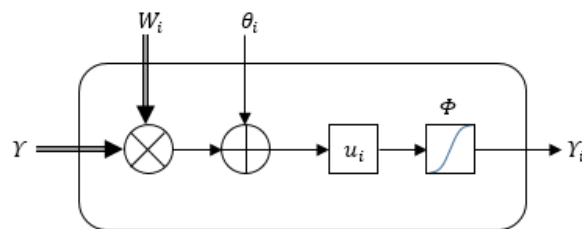


Рисунок 6. Простой блок нелинейной обработки (нейрон)

Сеть Хопфилда является одним из типов сетей, способных работать в режиме фильтрации. Используем нейронную сеть для фильтрации групп конфигураций. Схема элементарного нейрона сети представлена на рис. 6.

Нейрон i характеризуется входным вектором Y , вектором весовых коэффициентов W_i , вектором смещения θ_i , которые формируют суммарный сетевой сигнал

$$u_i = W_i + Y + \theta_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} v_j + \theta_i. \quad (5)$$

Суммарный сигнал обрабатывается нелинейной функцией активации Φ и формируется выходной сигнал нейрона Y_i . В качестве функции активации могут использоваться гиперболический тангенс, сигмоидальная функция и другие.

При составлении нейронной карты также необходимо определиться со следующими параметрами: порядок рассматриваемых групп конфигураций, размер рассматриваемой зоны, вид весовой функции и топология связи соседних ячеек.

Порядок рассматриваемых групп конфигураций определит линейные размеры ячейки рабочей зоны, принимаемой за единичную позицию манипулятора, которой ставится в соответствие один нейрон. Этот параметр можно назвать разрешающей способностью нейронной карты. Чем ниже порядок, тем больше нейронов будет включать в себя нейронная карта, что повысит дискретизацию траектории и позволит лучше огибать потенциально опасную зону БВ. Снижение порядка увеличивает

число нейронов в нейронной карте кратно l^3 , где l — линейный размер базовой группы конфигураций.

Размер рассматриваемой при формировании карты зоны обусловлен относительным расположением начальной и целевой точек траектории. В связи с простой конфигурацией рабочей зоны ПМ не возникает необходимости перемещаться далеко за пределы параллелепипеда, полностью включающего в себя вектор направления из начальной точки в целевую. Достаточно убедиться, что карта заведомо включает достаточную часть зоны свободного перемещения для прокладывания траектории, также обладая запасом по высоте (координата z) для учета градиента стоимости линейного перемещения в водной среде, размер которого зависит от вязкого трения конструкции.

В качестве весовой функции связи i -го и j -го нейрона выбрана кусочно-заданная функция

$$w_{ij} = \begin{cases} 0, & \rho(q_i, q_j) \cdot k_f(z, \varphi) = 0, \\ f(\rho(q_i, q_j)), & 0 < \rho(q_i, q_j) \cdot k_f(z, \varphi) < r, \\ 0, & r < \rho(q_i, q_j) \cdot k_f(z, \varphi), \end{cases} \quad (6)$$

где $\rho(q_i, q_j)$ — евклидово расстояние между конфигурациями, соответствующими нейронам i и j ; $k_f(z, \varphi)$ — функция, описывающая влияние сил вязкого трения на стоимость перехода при заданной глубине в заданном направлении; z — глубина в выбранной конфигурации; φ — полярный угол между осью x до направления движения из q_i в q_j , откладываемый в плоскости XOY ; $f(\rho(q_i, q_j))$ — убывающая функция вида $f(x) = 1/x$; r — радиус нейронной области, т. е. как далеко каждый нейрон воздействует на другие нейроны через весовые функции [8].

Составление нейронной карты возможно на основе структур с различными топологиями связей между нейронами. На плоскости наиболее распространены шестигранная (рис. 7а) или прямоугольная (рис. 7б). Для трехмерной задачи удобно выбрать связь в форме параллелепипедов с диагоналями (рис. 7в).

Каждый нейрон имеет 6, 18 или 26 связей с ближайшими нейронами в зависимости от выбранного радиуса нейронной области, что связано с различными величинами расстояний между узлами по линии ребра фигуры a , диагонали грани фигуры $a\sqrt{2}$ и диагонали самой трехмерной фигуры $a\sqrt{3}$.

После операции масштабирования вектором весовых коэффициентов W_i учитывается вектор смещения i -го нейрона θ_i . Значение смещения определяется входными данными нейронной карты:

$$\theta_i = \begin{cases} +\infty & i\text{-й нейрон соответствует целевой группе конфигураций,} \\ +\infty, & i\text{-й нейрон соответствует группе конфигураций } c \ d > d_{\max}, \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (7)$$

где d и d_{\max} — коэффициент опасности группы конфигураций, соответствующих i -му нейрону и максимально допустимый коэффициент соответственно.

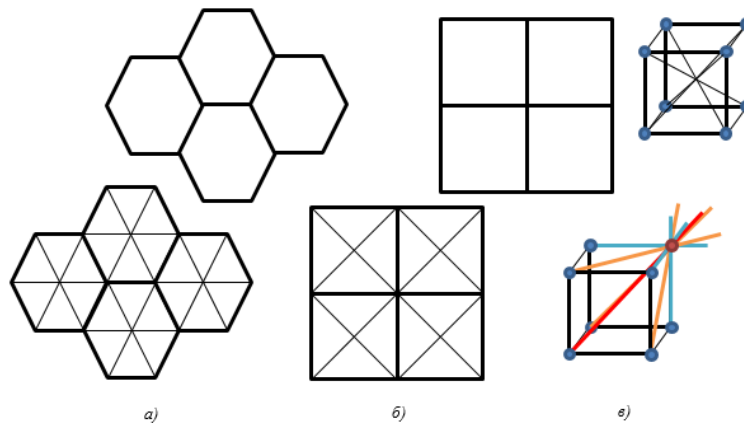


Рисунок 7. Топологии связей между нейронами

Благодаря работе вектора смещения, целевой нейрон всегда будет максимально активирован, а нейроны, соответствующие потенциально опасным группам конфигураций манипулятора — всегда деактивированы. В других случаях возможно задать величину смещения в виде функции от параметра d .

Активация остальных нейронов, не обусловленных внешними данными напрямую, может производиться несколькими способами. Одним из способов является распространение активации от нейрона, соответствующего целевой конфигурации. Активация нейронов распространяется во всех направлениях с применением метода одновременной активации до тех пор, пока сигнал активации не достигнет нейрона, соответствующего начальному положению манипулятора, либо активируются все нейроны. Другой способ подразумевает последовательное активирование нейронов растрами, например перекрестным способом [8]. Влияние нейронов не распространяется через нейроны со смещением $\theta_i = -\infty$ (нейроны потенциально опасных конфигураций), что позволяет достичь целевого нейрона путем восхождения из начального нейрона в направлении максимального градиента всегда, когда это возможно.

8. Результаты и выводы

Метод планирования траектории при помощи нейронной карты предлагается расширить с двумерного представления до трехмерного. Современные вычислительные мощности ЭВМ выросли во много раз по сравнению с ЭВМ, успешно применяемыми в прошлом для вычислений траектории на плоскости. Кроме того, современные ЭВМ поддерживают параллельную обработку информации на многих уровнях, начиная с аппаратного.

Разработаны специальные программные и программно-аппаратные средства распределения вычислительных мощностей для параллельной обработки, такие как CUDA [9, 10] и OpenCL [11]. Нет ничего удивительного в том, что использовать эти средства для проведения объемных вычислений, связанных с обучением [12, 13] и возбуждением нейронных сетей, уже предлагалось не раз [14]. Таким образом, возможности проведения расчетов, сопровождающих возбуждения нейронной сети во всех направлениях одновременно [15], значительно увеличены.

Для более наглядного представления процессов формирования траектории представляется целесообразным провести компьютерное моделирование с возможностью гибкого изменения параметров нейросети. В настоящий момент для этих целей облачный сервис NVIDIA GPU Cloud (NGC) предоставляет доступ к полному перечню программных средств для глубокого обучения нейронных сетей (Deep Learning) и высокопроизводительных вычислений, оптимизированных для графических процессоров (GPU) [16].

Литература

- [1] Kosach A., Kovshov E. Development of a Computer Based Problem-Oriented Automated Remote Leakage Detection Control System // *ITM Web of Conferences*. 2017. Vol. 10. P. 01005.
- [2] Борисенко Е. В., Мартынов П. Н., Ковшов Е. Е. Оценка эффективности интерактивного взаимодействия пользователя с компьютерной системой // *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2009: Международная науч.-практ. конф.: сб. научных трудов*. — Одесса : Черноморье, 2009. Т. 2, № 2. С. 47–49.
- [3] Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Подходы к улучшению управления перемещением крупногабаритного порталного манипулятора // Блок по управлению инновациями Госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://innov-rosatom.ru>
- [4] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота // *Искусственный интеллект*. 2009, № 3. С. 300–307.
- [5] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Система планирования движения группы мобильных микроботов на основе генетических алгоритмов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2007, № 3. С. 163–173.

- [6] *Большаков А. А., Степанов М. Ф., Степанов А. М., Ульянина Ю. А.* Планирование траектории движения мобильного робота // *Вестник СГТУ*. 2010. Т. 4, № 3. С. 176–180.
- [7] *Лоборева Л. А., Кожевников М. М.* Поиск траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки*. 2017, № 11. С. 43–50.
- [8] *Лагодакис М.* Локальная навигация мобильного робота с помощью полярной нейронной карты. — Центр перспективных компьютерных исследований университета Юго-Западной Луизианы, 1999.
- [9] CUDA Toolkit Documentation v. 9.1.85. [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://docs.nvidia.com/cuda/>
- [10] NVIDIA Accelerated Computing. Deep learning. [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://developer.nvidia.com/deep-learning>
- [11] The open standard for parallel programming of heterogeneous systems [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://www.khronos.org/OpenGL/>
- [12] *Маткова Е. А., Ковшов Е. Е.* Классификатор интегрированной системы биомедицинского назначения на базе нейросетевых модулей // *Информационные технологии*. 2008, № 12. С. 42–45.
- [13] *Ли Цзяцзюнь, Цян Лю.* Ускорение обучения нейронной сети на графическом ускорителе с помощью OpenCL и метода роя частиц // *Восьмой Международный Симпозиум HEAT*. 2017. С. 17.
- [14] *Зойкан С., Зойкан Р., Галачи Д.* Реализация маршрутизации нейронных сетей с использованием технологии CUDA // *Передовые технологии, системы и услуги в области телекоммуникаций (TELSIKS)*. 2017.
- [15] *Глусиус Р., Комода А., Гилен С.* Динамика нейронных сетей для планирования пути и обхода препятствий // *Нейронные сети*. 1995, № 8 (1). С. 125–133.
- [16] NVIDIA GPU Cloud. [Электронный ресурс], 2018. URL: <https://www.nvidia.ru/gpu-cloud/>

Авторы:

Владимир Сергеевич Кувшинников — инженер-технолог, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии — Атомстрой» (АО «НИКИМТ-Атомстрой»)

Евгений Евгеньевич Ковшов — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии — Атомстрой» (АО «НИКИМТ-Атомстрой»)

Neural map application for auxiliary control in portal manipulator operation

V. S. Kuvshinnikov, E. E. Kovshov

JSC "NIKIMT-Atomstroy"
Altufevskoe highway, 43/2, Moscow, Russia 127410

e-mail: ek177@bk.ru

Abstract. This article deals with the specialized portal manipulator motion control. The key features of the system are analysed, management efficiency improvement task is considered and formulated. An approach to the manipulator trajectory formation is proposed, based on existing mobile and industrial robotics solutions including artificial neural networks.

Key words: specialized portal manipulator, motion control, trajectory formation, multicriteria optimization, artificial neural network card.

References

- [1] Kosach A., Kovshov E. E. (2017) *ITM Web of Conferences*, **10**:01005.
- [2] Borisenko E. V., Martynov P. N., Kovshov E. E. (2009) Otsenka effektivnosti interaktivnogo vzaimodeystviya pol'zovatelya s komp'yuternoy sistemoy. In Proc. Perspektivnyye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte `2009: Odessa, vol. 2, pp. 47–49.
- [3] Kuvshinnikov V. S., Kovshov Ye. Ye. (2018) Podkhody k uluchsheniyu upravleniya peremeshcheniyem krupnogabaritnogo portal'nogo manipulyatora. In Blok po upravleniyu innovatsiyami Goskorporatsii «Rosatom». URL: <http://innov-rosatom.ru>. [In Rus]
- [4] Darintsev O. V., Migranov A. B. (2009) *Iskusstvennyy intellekt*, 3:300–307. [In Rus]
- [5] Darintsev O. V., Migranov A. B. (2007) *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 3:163–173. [In Rus]
- [6] Bol'shakov A. A., Stepanov M. F., Stepanov A. M., Ulyanina Yu. A. (2010) *Vestnik SGTU*. **4**(3):176–180. [In Rus]
- [7] Loboreva L. A., Kozhevnikov M. M. (2017) *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 11:43–50. [In Rus]
- [8] Lagodakis M. (1999) Local navigation of the mobile robot using the polar neural map. Center for advanced computer science, University of Southwest Louisiana.
- [9] <https://docs.nvidia.com/cuda/>
- [10] <https://developer.nvidia.com/deep-learning>
- [11] <https://www.khronos.org/opencv/>
- [12] Matkova E. A., Kovshov E. E. (2008) *Informatsionnyye tekhnologii*, 12:42–45. [In Rus]

- [13] *Li Jiajun, Qian Liu* (2017) The acceleration of training the neural network on a GPU using OpenCL and the method of particle swarm In 8 International Symposium of HEAT. P. 17.
- [14] *Zoykan S., Zoykan R., Galachi D.* (2017) Realizatsiya marshrutizatsii neyronnykh setey s ispol'zovaniyem tekhnologii CUDA. In *Peredovyye tekhnologii, sistemy i uslugi v oblasti telekommunikatsiy (TELSIKS)*. [In Rus]
- [15] *Glusius R. Komoda A., Gilen S.* (1995) *Neyronnyye seti*. **8**(1):125–133.
- [16] <https://www.nvidia.ru/gpu-cloud/>