

А.В. Солдатов, С.А. Воротников

**СИСТЕМА СИЛОМОМЕНТНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ  
МОБИЛЬНОГО МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА  
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Рассматривается вариант построения системы силомоментного очувствления мобильного манипуляционного робота в виде интеллектуального агента системы управления. При выполнении технологической операции предлагается использовать принципы ситуационного управления роботом и формировать тактильный образ в виде отношения силовых факторов, возникающих в зоне контакта. Приводятся структура нейронной сети для реализации сенсорного контроллера силомоментного датчика и результаты испытаний разработанной системы в задаче раскроя листового металла.*

**E-mail: alexandervsoldatov@gmail.com, vorotn@bmstu.ru**

**Ключевые слова:** *манипуляционный робот, замкнутая кинематическая цепь, ситуационное управление, распознавание тактильного образа, сенсорный контроллер, многослойный перцептрон.*

В последнее время при решении комплексных промышленных и специальных задач все чаще требуется применение адаптивных робототехнических систем, оснащенных развитой сетью сенсорных устройств. Среди таких устройств наибольшее распространение получили дальнометрические датчики и телевизионные камеры, позволяющие существенно повысить эффективность взаимодействия с объектами, расположенными в дальней и ближней зонах робота. Вместе с тем до настоящего времени задача манипулирования объектами при возникновении механической связи между ними остается в числе трудноразрешимых. Сложность таких задач, среди прочего, обусловлена тем, что исполнительный механизм и объекты манипулирования образуют замкнутую кинематическую цепь. Роботизация таких операций (а к ним относятся сборка, механическая обработка, резка листового металла, абразивная зачистка, упаковка и др. – всего до 40 % всех технологических операций) вызывает необходимость одновременного выполнения высоких требований по быстродействию и точности в условиях существенной недетерминированности внешней среды. Важно, что для некоторых из названных операций (например, сборочных) траектория движения исполнительного механизма формируется непосредственно в процессе выполнения сборки. Решение данной проблемы предполагает оснащение робота эффективной сенсорной системой, обрабатывающей информацию о внешней среде в реальном масштабе времени.

Существующие в настоящее время на рынке промышленные манипуляторы, языки управления роботами и средства моделирования технологических операций ориентированы исключительно на выполнение операций с разомкнутой кинематической цепью. Для таких манипуляторов подключение дополнительных сенсоров сопряжено со значительными аппаратно-программными трудностями. Кроме того, зачастую необходимо обеспечить мобильность робототехнической системы, например, когда не объект доставляется к роботу, а подвижный манипулятор перемещается вдоль соответствующего объекта.

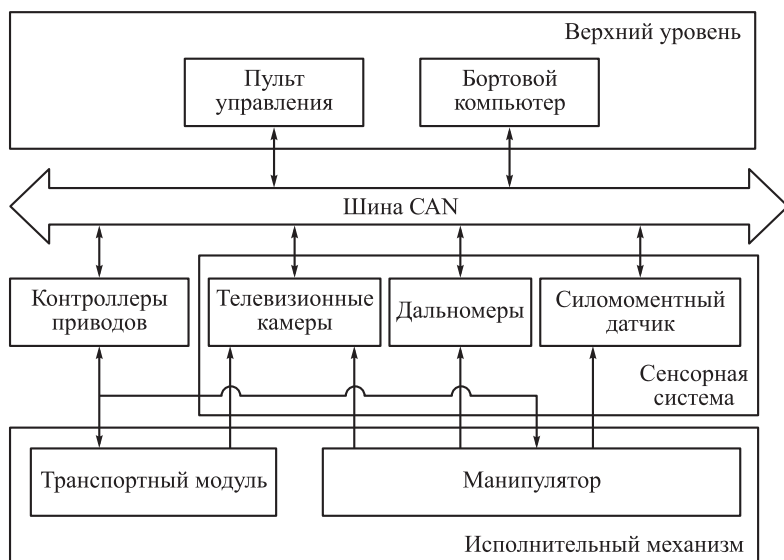
В Научно-учебном центре «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана коллективом сотрудников создан мобильный манипуляционный робот с открытой системой управления, что позволяет оснащать и программировать робот с любыми сенсорными устройствами и выполнять технологические операции как с разомкнутой, так и с замкнутой кинематической цепью (рис. 1).



**Рис. 1. Внешний вид мобильного манипуляционного робота**

Робот выполнен в виде двух модулей: транспортного и манипуляционного. Перемещение транспортного модуля осуществляется с помощью четырехколесной схемы с независимым управлением колесами, что позволяет добиться высокой маневренности. Манипулятор с шестью степенями подвижности имеет антропоморфную кинематическую схему, подобную манипулятору PUMA. Его грузоподъемность составляет 35 кг, габариты в поднятом состоянии: 1635×550×420 мм.

Структурная схема системы управления роботом приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Структурная схема системы управления роботом**

В соответствии с этой структурой система управления построена по модульному принципу и имеет общую CAN-шину, к которой подключаются все штатные и дополнительные устройства робота. При такой структуре каждый из подключаемых сенсоров целесообразно построить по принципу интеллектуального агента, работающего независимо от основной программы робота и осуществляющего ее прерывание только в отдельные моменты. Рассмотрим этот подход на примере силомоментного датчика (СМД).

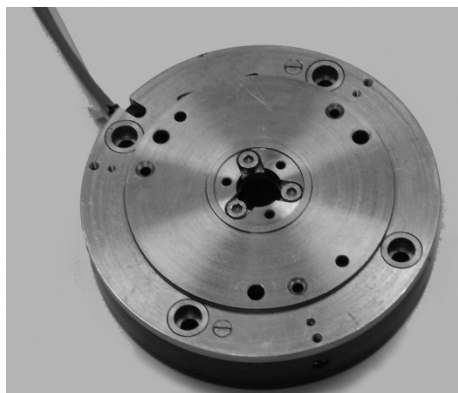
СМД – интеллектуальный агент системы, включающийся в момент замыкания кинематической цепи. После этого он начинает анализировать тактильный образ, который создают действующие на исполнительный механизм силовые факторы. Такой изменяющийся во времени образ представляет собой характеристику технологической операции и отличается, например, для сборки и механической обработки [1]. Цель агента – распознавание данного образа аналогично тому, как это осуществляется в системах технического зрения, и формирование целевых команд в систему управления роботом. В этом случае возникает возможность реализации принципов ситуационного управления в соответствии с концепцией Д.А. Поспелова [2].

Таким образом, постановка задачи управления роботом с силомоментным очувствлением предполагает управление перемещением рабочего органа по заданной траектории с одновременным измерением силовых факторов, действующих на объекты работы, и последующим формированием текущего тактильного образа. Необходимая модификация траектории осуществляется по результатам распозна-

вания тактильного образа. Этот подход позволит регулировать контурную скорость робота в зависимости от величины внешнего силового воздействия.

Для реализации названного подхода авторами была разработана система силомоментного очувствления указанного робота, включающая интеллектуальный СМД с электромеханическим разделением компонент и комплекс программных средств формирования и анализа тактильного образа. Особенностью предлагаемого решения является использование при распознавании не точных значений измеряемых силовых факторов, а качественных показателей их отношений [1]. При этом для обеспечения управления манипулятором в режиме реального времени необходимо, чтобы частота формирования целевой команды в датчике соответствовала частоте квантования приводов робота.

Внешний вид СМД, а также способ его закрепления в запястье манипулятора приведены на рис. 3.



*а*

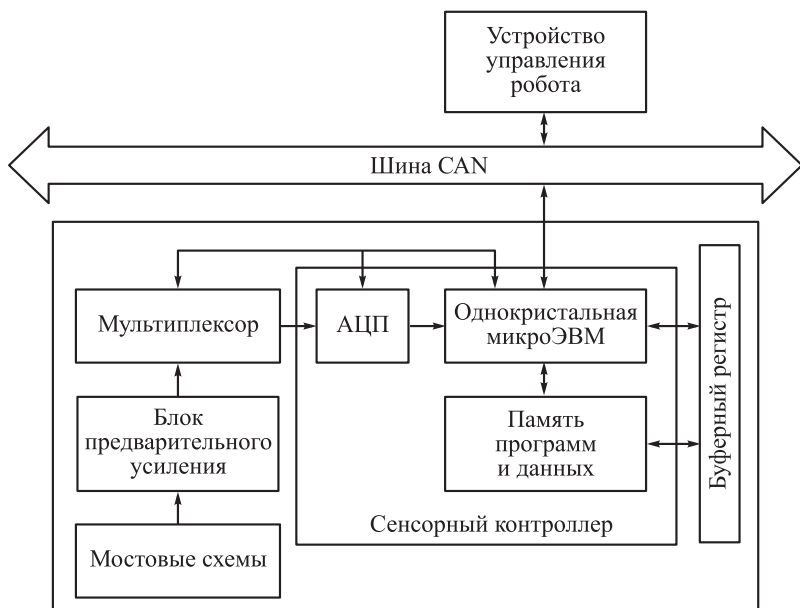


*б*

**Рис. 3. Интеллектуальный СМД (а) и способ его крепления на манипуляторе (б)**

Реализация концепции интеллектуального СМД предполагает вынесение задачи принятия решения об изменении алгоритма движения манипулятора на уровень СМД, что позволяет разгрузить бортовой компьютер системы управления роботом. Структура системы управления в данном случае является двухуровневой и строится по схеме «главная машина – спутник», где функцию последнего выполняет СМД. В режиме с замкнутой кинематической цепью он же ре-

шает задачу верхнего уровня управления, т. е. формирует стратегию движения манипулятора. Для этого в состав СМД включен сенсорный контроллер, а в памяти программ и данных может храниться база знаний (рис. 4). Нижний уровень – уровень управления приводами – реализуется традиционным образом.



**Рис. 4. Структурная схема интеллектуального СМД (АЦП – аналого-цифровой преобразователь)**

Сенсорный контроллер, построенный на базе цифрового сигнального процессора Freescale DSP56F803, производит оцифровку и дальнейшую обработку цифрового сигнала, выполняя следующие функции:

- 1) фильтрацию и сглаживание сигнала;
- 2) вычисления в режиме повышенной точности;
- 3) распознавание текущего тактильного образа;
- 4) обмен командами с устройством управления робота через шину интерфейса.

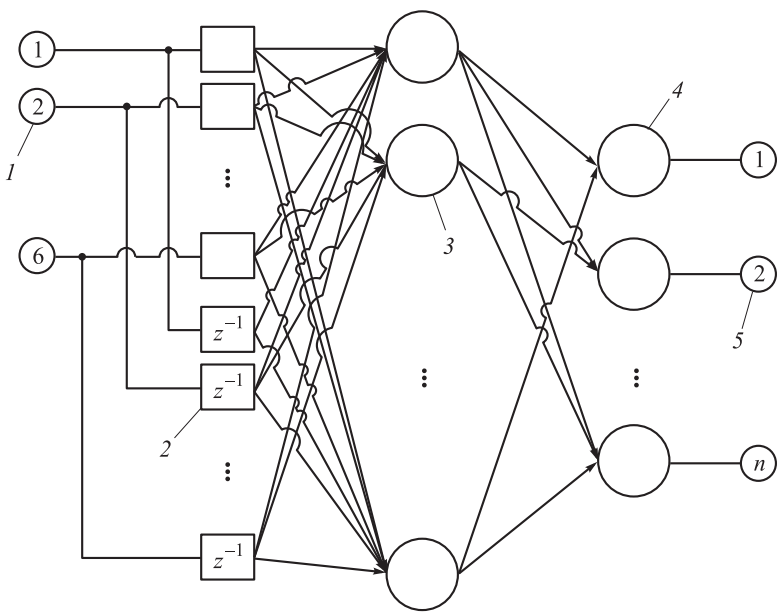
Наибольшую сложность вызывает третья функция ввиду невозможности ее алгоритмизации и, как следствие, необходимости применения специальных методов решения. Для каждого из тактильных образов, возникающих в процессе выполнения технологических операций, не определены точные значения сил и моментов, ее характеризующих, известны лишь возможные диапазоны изменения. Низкая структурированность задачи предполагает применение методов машинного обучения: деревьев решений, байесовских методов, линей-

ных алгоритмов классификации и др. По существу, задача может быть отнесена к классу задач временного распознавания образов, где текущий выходной сигнал зависит не только от текущего, но и от предыдущих значений входного сигнала. Системы, выполняющие подобные функции, относятся к классу нелинейных фильтров и могут быть реализованы с применением различных методов, наиболее эффективными из которых являются искусственные нейронные сети. Для них разработаны эффективные алгоритмы обучения и реализации, например метод обратного распространения ошибки как на микропроцессорах общего назначения, так и в виде специальных интегральных микросхем [3].

Для решения данной задачи была выбрана архитектура многослойного перцептрона. Сети такого вида, хотя и имеют недостатки, основным из которых является сложность подбора количества слоев и числа нейронов в каждом слое, в то же время не накладывают существенных ограничений на структуру решаемой задачи и позволяют учитывать ее динамическую составляющую. При этом возможны несколько вариантов построения сети. Наиболее распространенными являются включение времени в качестве входного параметра сети и подача на входы сети сигналов с определенной временной задержкой. В данном случае был выбран второй вариант, что диктуется структурой решаемой задачи: большинство возникающих ситуаций (касание инструментом поверхности, его заклинивание и т. д.) определяются по значению силовых факторов до момента события и в момент его наступления. Таким образом, на вход сети подаются значения сил и моментов в текущий момент времени и в определенное количество предыдущих моментов. Структура сети подбиралась опытным путем на основе экспериментальных данных.

Факторами, учитываемыми при оценке качества сети, выступали процент ошибок на тестовой и контрольной выборках, показатели переобученности сети, время обучения и реакции на входной сигнал. Изначально структура сети имела один слой и один оператор временной задержки для каждой компоненты главного вектора сил и моментов. В таком варианте сеть обладает максимальным быстродействием как при обучении, так и при работе. Однако при этом качество распознавания оказывалось весьма низким. В дальнейшем был добавлен второй слой нейронов и далее увеличивалось количество нейронов в скрытом слое.

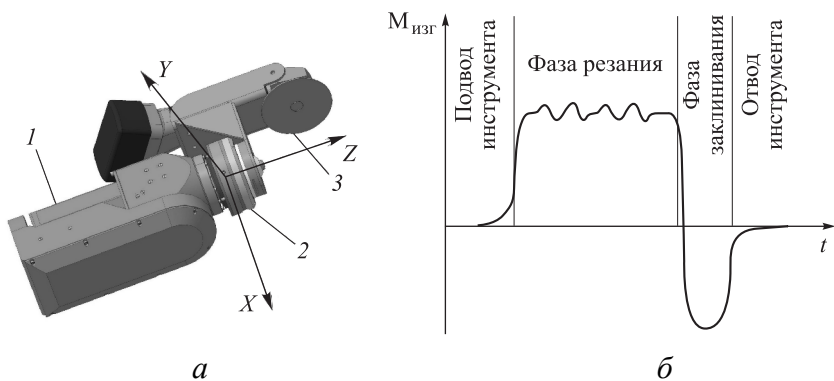
Критериями оптимальности служили процент ошибок на контрольной выборке и переобученность сети. В результате была получена следующая структура сети (рис. 5): 24 входа (текущий и три предыдущих момента времени), 2 слоя, 16 нейронов в скрытом слое.



**Рис. 5. Структурная схема нейронной сети СМД:**

1 – входной сигнал; 2 – блоки задержки; 3 – скрытый слой; 4 – выходной слой; 5 – выходной сигнал

Испытания СМД с нейронной сетью проводилось для операции раскроя листового металла (рис. 6, а). На вход сети подавались значения сил и моментов в текущий момент времени, блоки задержки формировали задержку сигнала на заданное число шагов, после чего



**Рис. 6. Схема эксперимента (а) и график изменения изгибающего момента при раскрое листа (б):**

1 – конечное звено робота; 2 – СМД; 3 – отрезная машина

сигнал поступал на входы скрытого слоя нейронов. Выходной сигнал представлял собой вектор логических значений, соответствующих каждому из распознаваемых нейронной сетью тактильных образов. Для обучения сети применялся метод обратного распространения

ошибки. Обучающая выборка состояла из 1450 значений, полученных для различных ситуаций, таких как отсутствие контакта инструмента с материалом, момент контакта, фаза резания, заклинивание инструмента, момент отрыва инструмента от поверхности и различных типов материалов (рис. 6, б). Выборка была разделена на обучающую (90 % значений) и контрольную (10 %). Ошибка распознавания на контрольной выборке после обучения составила 8 %, включая отказы от классификации.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- метод ситуационного управления показывает свою эффективность в задачах управления технологическими операциями с механическим взаимодействием объектов работ;
- выбранная структура нейронной сети позволяет с достаточной для решаемой задачи достоверностью распознавать тактильный образ и, как следствие, возникающую в процессе работы ситуацию;
- дальнейшее улучшение системы распознавания тактильного образа (снижение процента ошибок, повышение скорости распознавания и обучения новым ситуациям) требует применения более сложных методов машинного обучения, таких как бустинг или машины опорных векторов.

Проведенные исследования показали возможность применения предложенного подхода при роботизации сложных технологических операций с механическим взаимодействием объектов работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
2. Поспелов Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика. – М.: Наука, 1986.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012