

УДК 007.51:621.865.8:681.525

Управление эргатической манипуляционной системой с шестью степенями свободы и хватом на основе машинного зрения

*Титков И.П., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

*Научный руководитель: Карпунин А.А., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru*

Системы машинного зрения применяются в промышленности и производстве для контроля качества и производственного оборудования, например, роботоманипуляторов. Дистанционное управление робототехническими системами требует взаимодействия робота с человеком-манипулятором. Такие системы применяются в экстремальных условиях и условиях динамического окружения: открытом космосе, под водой, при воздействии высоких температур, при работе с подвижными объектами. Применение подобных систем обусловлено не только сложностью возникающих ситуаций, но и экономическими соображениями, поскольку применение интеллектуальных систем не всегда является обоснованным и возможным. Системы копирующего управления применяют при обучении и управлении роботами специального назначения. Применение машинного зрения в контуре управления призвано заменить или существенно облегчить получение информации о движении, прийти на смену многостепенным рукояткам и пультам управления, расширить интерактивность робототехнической системы на основе обрабатываемой визуальной информации.

В качестве примера рассматривается алгоритм распознавания жестов для управления роботом-манипулятором типа РМ-01, аналога PUMA-560. Робот РМ-01 представляет собой универсальный электромеханический промышленный робот с управлением от ЭВМ. Рассматриваемый в данной статье робот состоит из четырех частей: манипулятора («руки»), хвата («кисти») и системы управления, состоящей из ЭВМ с установленным математическим пакетом MATLAB, в котором выполняется обработка изображений с камер и микроконтроллером (например, на основе платформы Arduino), осуществляющим связь выдаваемых с ЭВМ команд управления и их исполнением.

Рассматриваемый манипулятор – антропоморфный манипулятор с шестью степенями подвижности и линейным хватом. Звенья манипулятора соединены друг с другом в суставах и вращаются вокруг осей систем координат, проходящих через центры суставов.

Степени подвижности манипулятора показаны на рис. 1.

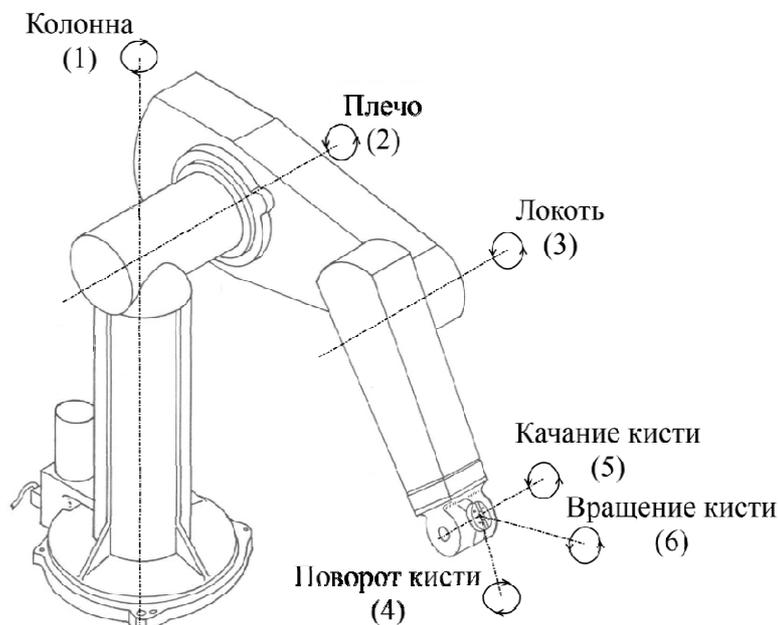


Рис. 1. Степени подвижности манипулятора (хват не показан)

Каждое звено манипулятора имеет свой следящий привод (сервопривод). Текущее положение манипулятора определяется по отношению к известному абсолютному положению.

Установка абсолютного положения производится с помощью команд, поступающих с ЭВМ на микроконтроллер. Микроконтроллер устанавливает требуемые углы поворотов сервоприводов. Таким образом, реализуется ангулярная система координат – перемещение объекта манипулирования обеспечивается согласованным взаимным поворотом звеньев манипулятора, имеющих постоянную длину.

Система координат хвата состоит из линейной координаты, определяющей расстояние между створками хвата.

Положение руки, кисти и хвата в пространстве однозначно определяется углами поворотов соответствующих сервоприводов. Общее число сервоприводов – 7: 6 – управление рукой и кистью, 1 – управление хватом.

Алгоритм управления состоит из нескольких основных этапов.

Этап 1. Получение и обработка изображений с одной или нескольких камер.

Этап 2. Распознавание жестов (меток).

Этап 3. Формирование управляющих команд.

Рассматривается алгоритм управления по изображению, получаемого с одной камеры, обеспечивающей вид сверху (вертикальную проекцию) от плеча до кисти оператора. Дополнительный вид сбоку (горизонтальная проекция) применяется для получения информации о положении меток при ограничении видимости в результате наложения или выходе метки из области видимости одной камеры.

На первом этапе выполняется получение и предварительная обработка получаемых изображений.

На втором этапе выполняется нахождение и определение положения меток для вычисления углов ориентации руки оператора.

На третьем этапе производится выработка команд управления – последовательных углов поворота сервоприводов, обеспечивающих перемещение манипулятора и управление хватом.

Вертикальная проекция расположения меток на операторе представлена на рис. 2. Метки 0–1 обеспечивают определение ориентации корпуса оператора и поворот всей платформы, 1–2 – определение поворота в плечевом суставе в двух плоскостях, 2–3 – определение угла сгиба в локтевом суставе, 4–5 – определение углов поворота кисти, 6–7 – определение линейного перемещения хвата. В зависимости от типа применяемого хвата по меткам 4–7 определяются углы поворота отдельных элементов и кисти в целом.

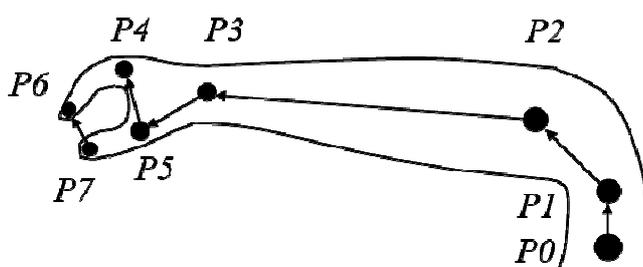


Рис. 2. Расположение меток на операторе

В качестве меток могут использоваться как цветные маркеры, размещенные на коже и одежде оператора, так и точечные источники света – лампы и светодиоды. Для построения быстродействующей системы необходимо использовать минимально-возможный набор признаков, пригодный для решения задачи выделения, обнаружения и распознавания объекта.

Уменьшение вычислительной сложности задачи достигается при использовании естественных признаков, позволяющих распознать метку за минимальное число операций.

При использовании черно-белой камеры единственным естественным признаком является яркость; если датчик изображения представляет собой цветную видеокамеру, то набор включает в себя интенсивности светового излучения в красном, синем и зеленом оптических диапазонах.

В работе рассматривается применение светодиодов в качестве маркеров. Известная яркость или цвет, отличные от фонового, позволяют за одну операцию бинаризации по заданным цветам получить изображение с областями интереса из заданного диапазона яркости. Выбор диапазона осуществляется по двум гистограммам – с включенными и выключенными метками. Положительный пик разности гистограмм представляет собой яркость меток. Цвет меток подбирается для обеспечения наибольшей разности, например, черные метки на засвеченной руке оператора на монотонном ярком фоне или зеленые светодиоды на темном фоне.

Фильтрация помех и восстановление целостности меток выполняется с помощью морфологических операций над бинарным изображением.

Программная реализация выполняется в среде MATLAB с применением пакета Image Processing Toolbox. Обработка заключается в получении изображений с камер, переводе в оттенки серого с последующей бинаризацией по уровню. Фильтрация и морфологическая обработка бинарного изображения применяются при необходимости удаления шумов и пробелов в метках. Основными операциями являются эрозия объекта, наращение, эрозия и наращение по преобладанию пикселей объекта. Рекомендуется выбирать освещение, цвета и тип меток таким образом, чтобы дополнительных операций после бинаризации не требовалось.

Нахождение меток с последующим вычислением признаков осуществляется поиском связных областей пикселей и созданием матрицы связности, каждый элемент которой равен номеру метки, которой принадлежит соответствующий пиксел исходного бинарного изображения. Для классификации найденных объектов применяется морфологический признак «площадь объекта». Положение метки задается координатами центра масс.

Альтернативным подходом к решению данной задачи является решение задачи классификации набора объектов или сравнение областей с эталоном.

Первичная нумерация меток выполняется в режиме калибровки с установлением руки оператора и приведением манипулятора в угловое положение в форме буквы «Г», где короткая сторона – участок 0, 1, 2, а длинная – участок с 3 по 7. Нумерация участка с 3 по 7 в калибровочном положении выполняется по правилу «4 – левее и выше 3, 5 – левее 3 и

ниже 4, 6 – левее 4, 7 – левее 7». Возможно использование исходного цветного изображения для получения информации о цвете меток. Методы построения «скелета» являются темой отдельных исследований и в рамках данной статьи не рассматриваются.

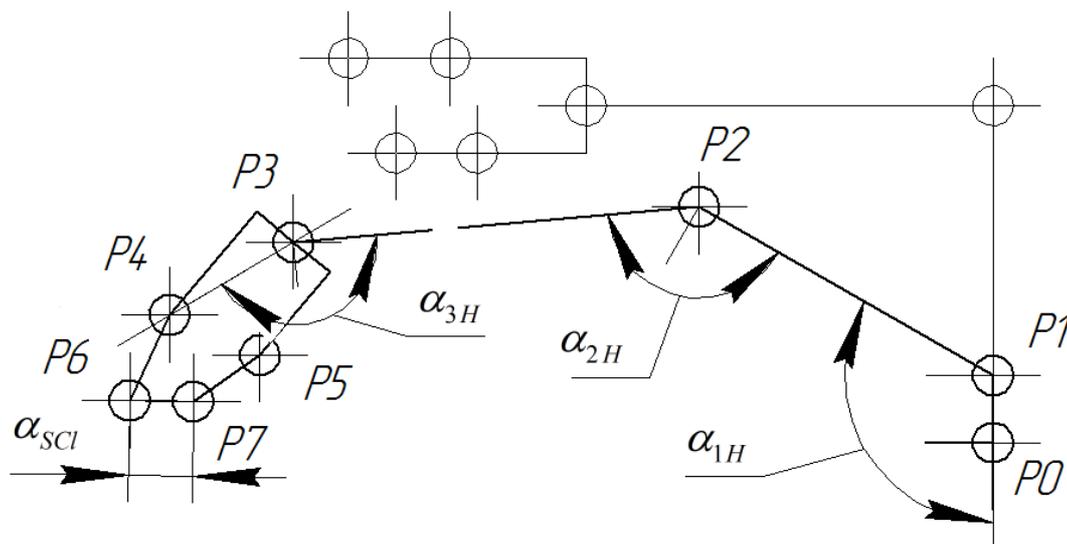


Рис. 3. Определение углов поворота

Определение углов поворота выполняется между векторами, соединяющими центры масс меток на изображения, полученных после фильтрации.

Положение меток определяется положением центров масс в системе координат, связанной с изображением. Для устранения связи между углом поворота камеры и поворотом корпуса оператора введем базис, связанный с плечевым суставом оператора, состоящий из вектора $\overline{L}_{01} = \overline{OP}_1 - \overline{OP}_0$ и нормали \overline{L}_{01}^n . Угол поворота последующих звеньев определяется углом относительно предыдущего звена.

Далее рассматривается только изображение с камеры «вид сверху» – горизонтальная проекция руки оператора. Для проекции на вертикальную плоскость операции выполняются аналогичным образом.

Принятые обозначения:

α_{1H} – угол между векторами в узле 1 на горизонтальной проекции;

α_{s1H} – командный угол поворота сервопривода, установленного в узле 1 и обеспечивающего поворот в плоскости горизонта.

Командные углы поворота задаются относительно абсолютного исходного положения в форме буквы «Г».

Углы ориентации и командные углы поворота сервоприводов в узлах $i = \{1, 2, 3\}$ определяются следующим образом:

$$\alpha_{iH} = (\overline{P_{i-1}P_i} \wedge \overline{P_iP_{i+1}}),$$

$$\overline{P_{i-1}P_i} = \overline{OP_i} - \overline{OP_{i+1}},$$

$$\alpha_{SiH} = 180^\circ - \alpha_{iH}.$$

Управление хватом осуществляется на основании расстояния между метками 6 и 7:

$$\alpha_{SCL} = \frac{|\overline{P_6P_7}| - |\overline{P_6P_7}|_{\min}}{|\overline{P_6P_7}|_{\max}} \alpha_{SCL_{\max}},$$

где $|\overline{P_6P_7}|_{\min}$, $|\overline{P_6P_7}|_{\max}$ – наименьшее и наибольшее управляющее положение меток для хвата соответственно;

$\alpha_{SCL_{\max}}$ – наибольший угол поворота сервопривода для полного хвата;

α_{SCL} – командный угол;

$|\overline{P_6P_7}|$ – текущее расстояние между метками. Наибольшее и наименьшее расстояния между метками 6 и 7 соответствуют разжатому и сжатому хвату.

Подъем руки (кисти) осуществляется в плечевом суставе сервоприводом 1 (3). Командный угол поворота определяется по меткам 1 и 2 (3 и 4)

$$\alpha_{SIV} = \frac{|\overline{P_1P_2}| - |\overline{P_1P_2}|_{\min}}{|\overline{P_1P_2}|_{\max}} \alpha_{SIV_{\max}}.$$

Использование одной или двух проекций накладывает ограничение на направление и угол поворота из-за ограничения видимости и проблемы разрешения меток. Для ухода от обозначенных ограничений необходимо использовать боковые проекции руки и кисти для определения углов поворота.

Условием перехода к рассмотрению другой проекции является условие разрешения двух меток.

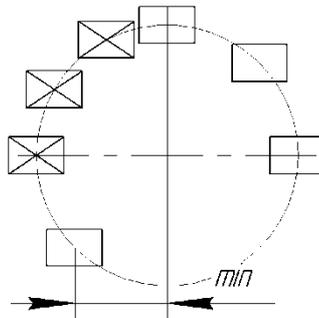


Рис. 4. Условие разрешения меток

Расстояние между метками должно превосходить наибольшую из проекций метки, взятую с коэффициентом запаса. При достижении критического расстояния между метками выполняется переход на изображение с боковой камеры (рис. 4).

На рис. 5 приводятся тестовые снимки и результаты обработки. В качестве тестового примера рассматривается определение углов поворота частей манипулятора. Оценка точности производится по снимкам, сделанным двумя камерами, с разрешением 0,3 Мп (рис. 5 а, в, д) и 6 Мп (рис. 5 б, г, е) с одинаковой высоты, но с небольшим отклонением.

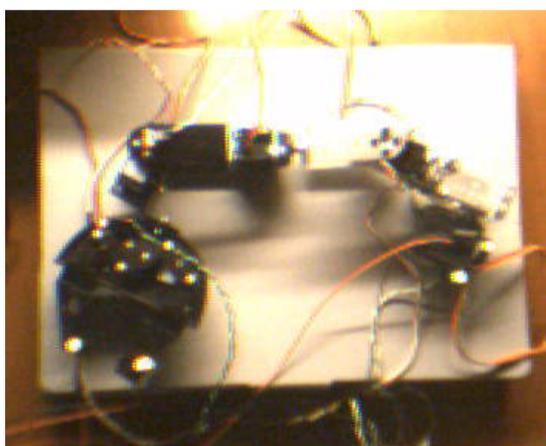
В таблице 1 представлены результаты определения углов поворота сервоприводов по кадрам рис. 5д и 5е.

Пример восстановления формы и целостности метки представлен на рис. 6.

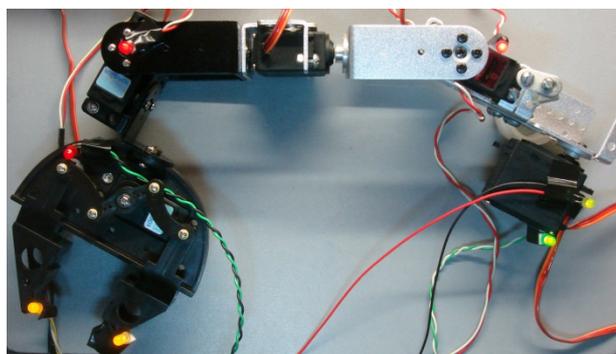
Таблица 1

Определение углов поворота в град. по рис. 5д и 5е

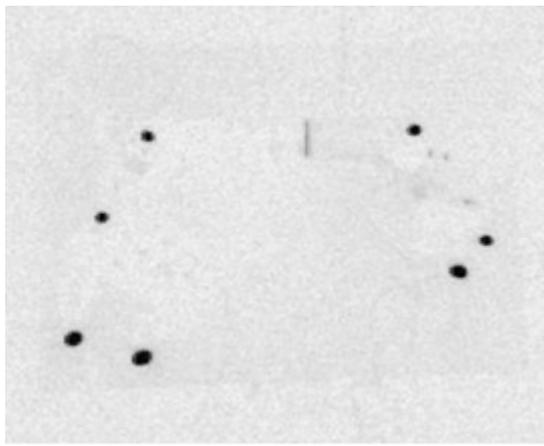
Вектор из пар меток	Камера 1	Камера 2
01-12	17.8629	16.0951
12-23	31.1419	28.4669
23-34	30.8693	30.3067



а)



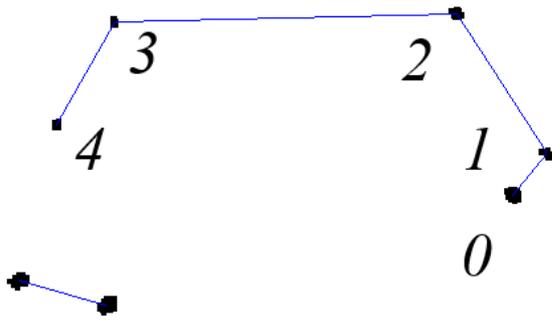
б)



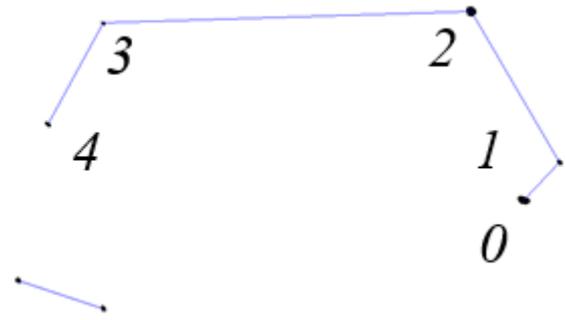
в)



г)



д)



е)

Рис. 5. Определение углов поворота манипулятора: а – кадр с камеры низкого качества; б – кадр с камеры высокого разрешения; в – кадр в низком разрешении в оттенках серого; г – кадр в высоком разрешении в оттенках серого; д – определение углов поворота по кадру низкого разрешения; е – определение углов поворота по кадру высокого разрешения



а)



б)

Рис. 6. Восстановление целостности метки: а – до восстановления; б – после восстановления

Разработанный метод может использоваться в качестве основы для проведения лабораторной работы по дисциплине основы технических средств систем автоматического управления, обработке изображений и распознавании образов; получении биометрических данных оператора; применяться в качестве обратной связи для контроля антропоморфных манипуляторов; использоваться при решении задач дистанционного управления в условиях динамической окружающей обстановки.

Тестовые модельные примеры показывают высокую точность распознавания положения меток в пространстве, что позволяет с малыми погрешностями вычислять углы

между сочленениями. Время работы предложенного алгоритма позволяет формировать команды управления практически в режиме реального времени.

Предложенный подход к определению углов между сочленениями легко адаптируется для применения в контуре дистанционного управления различными манипуляторами.

Дальнейшим развитием предложенного метода может быть исследование применения описанных методов фильтрации и обработки изображения, использования различных типов меток и влияние дополнительных ограничений на действия оператора и наличие препятствий в зоне досягаемости манипулятора, формирования интеллектуализированной системы управления манипулятором на основе машинного зрения.

Список литературы

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
2. Воробьев Е.И., Попов С.А., Шевелева Г.И. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: В 3 кн. Кн. 1: Кинематика и динамика. М.: Высшая школа, 1988. 304 с.
3. Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 416 с.
4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.