

МОДЕЛЬ ОЧУВСТВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Ю.Х. ХАМУКОВ, Ю.И. ПОПОВ,
Р.М. ХУЖОКОВ, А.М. КСАЛОВ, Х.К. КАЗАНОВ

ФГБНУ «Федеральный научный центр
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»
360002, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
E-mail: cgrkbncran@bk.ru

В данной статье рассмотрена задача реализации осязания антропоморфного манипулятора для робототехнических систем с целью контроля положения отдельных узлов робота относительно друг друга. Описана структура системы проприоцепции манипулятора на базе резистивных датчиков изгиба, а также схема подключения датчиков к аналогово-цифровому преобразователю, собирающему данные о положении отдельных узлов. Кроме того, проведен ряд экспериментов по оценке линейности выходного сигнала используемых датчиков. Обнаружено, что датчик изгиба имеет разную зависимость для положительных и отрицательных углов изгиба. Сопротивление заметно меняется при сгибе датчика (положительные значения угла изгиба), причем зависимость близка к линейной. А при отрицательных значениях угла изгиба изменения сопротивления незначительны. Для осязания манипулятора в форме кисти человека на базе такой системы необходимо использовать 20 датчиков изгиба.

Ключевые слова: датчик изгиба, манипуляторы, антропоморфные роботы

ВВЕДЕНИЕ

При разработке как промышленных, так и универсальных робототехнических систем необходим контроль состояния не только внешней среды, но и самой робототехнической системы, то есть положения отдельных узлов робота относительно друг друга. В биологических системах рецепторами положения тела являются мышцы и сухожилия [1]. Но в случае робототехнической системы задачу определения положения узлов робота приходится решать отдельно. В частности, при разработке антропоморфного манипулятора в виде кисти человека встала задача определения положения каждой фаланги в пространстве. Целью данного исследования является разработка и апробация модели проприоцепции антропоморфного манипулятора для робототехнических систем. При этом критерием работоспособности является возможность определения угла изгиба отдельных звеньев манипулятора. В работе поставлены следующие задачи: подбор сенсоров для определения положения отдельных узлов робототехнического манипулятора, разработка схемы подключения сенсоров к обрабатывающей системе и проведение тестовых испытаний для изучения зависимости выходного сигнала сенсоров от угла сгиба отдельных звеньев манипулятора относительно друг друга.

МОДЕЛЬ ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА В ВИДЕ АНТРОПОМОРФНОЙ КИСТИ

При разработке системы проприоцепции робототехнического манипулятора возникает задача оценки количества контролируемых степеней свободы. В человеческой кисти пять пальцев, 4 из которых состоят из трех фаланг, а пятый – из двух [2]. Всего на кисти пятна-

* Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 19-01-00648 А

дцать суставов, каждый из них имеет три ограниченные степени свободы. То есть максимально антропоморфный манипулятор- кисть должен иметь 45 степеней свободы, контролируемых по отдельности. Часть из упомянутых степеней свободы значительно ограничена в углах поворота. Для робототехнической системы схема манипулятора и количество степеней свободы определяются конкретной задачей, выполняемой данным роботом. При этом разработка антропоморфного манипулятора предполагает его универсальность и максимальную реализацию всех возможностей человеческой кисти. На данный момент существует ряд реализаций робототехнического манипулятора, в частности, промышленные роботы избыточной кинематики и модульной структуры (например, KUKA iiwa), гиперизбыточные бионические манипуляторы (Festo Bionic Handling Assistan), двурукие роботы манипуляторы (ABB Yumi), роботы-манипуляторы параллельной кинематики (Omron Delta, ABB Flex Picker), многопальцевые адаптивные схваты (трехпальцевый адаптивный хват Robotiq, пятипалая кисть Schunk SVH, кисть Shadow Dexterous Hand) [3].

Используемый манипулятор также относится к классу многопальцевых адаптивных схватов, позволяющих манипулировать инструментами, предназначенными для человека. При изготовлении робототехнического манипулятора некоторыми возможностями руки человека можно пренебречь. Поэтому при разработке системы проприоцепции рассматривалась только часть степеней свободы, использовавшихся на робототехническом манипуляторе. Все степени свободы, реализованные в антропоморфной робототехнической кисти, показаны на рис. 1.

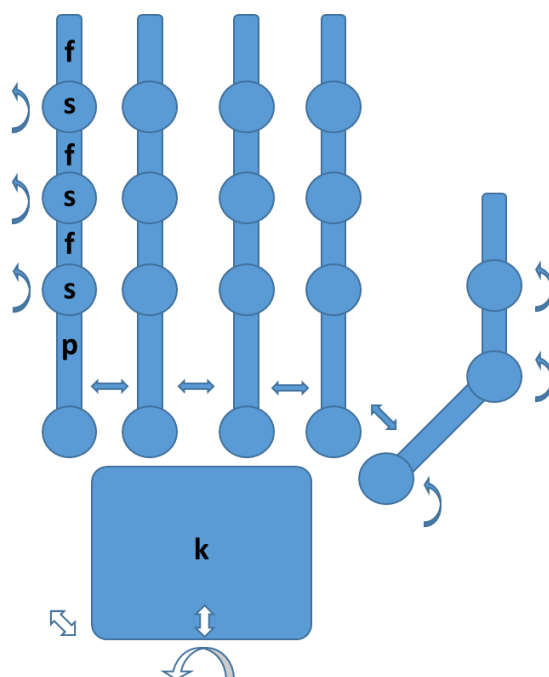


Рис. 1. Степени свободы, реализованные в антропоморфной робототехнической кисти:
f – фаланга, *s* – сустав, *p* – пястье, *k* – кисть

На рисунке видно, что каждый палец имеет три узла сгиба, соответствующих суставам между фалангами и пястной костью. Измеряется в этих местах только степень сгиба в одном направлении. Кроме того, для большей функциональности манипулятора реализована возможность раздвигания пальцев друг относительно друга. Данная степень свободы реализована за счет подвижности пястных костей в месте крепежа с запястьем. Само запястье имеет все три степени свободы (поворачивается по трем осям). Соответственно, задача

проприоцепции для подобного манипулятора сводится к измерению углов поворота по 15 осям и степени раздвижения в 4 узлах. Измерение угла поворота всей кисти возлагается на узел предплечья. Разработанная система датчиков приведена на рис. 2.

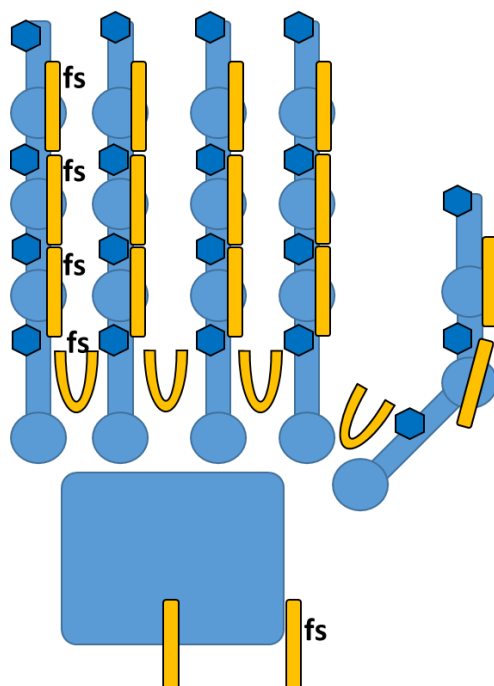


Рис. 2. Схема расположения датчиков очувствления на робототехнической кисти:
fs – резистивный датчик изгиба.

В качестве датчиков для измерения угла поворота можно использовать оптические и магнитные энкодеры, следящие гидроприводы, потенциометры, гироскопы, герконы и другие датчики [4]. Чаще всего антропоморфные манипуляторы используют энкодеры (или данные с потенциометра сервопривода) для измерения угла сгиба [5, 6]. Стоит отметить возможность использования системы компьютерного зрения для распознавания положения узлов манипулятора в пространстве [7, 8]. Но такой подход позволит контролировать манипулятор только в зоне прямой видимости камеры робота.

Для разработанного манипулятора достаточно сложно применение энкодеров, поскольку в суставе нет места для установления датчика. При этом гораздо проще и эффективнее использование датчиков, измеряющих степень изгиба. В данной работе использовались резистивные датчики изгиба, позволяющие измерять степень сгиба за счет измерения сопротивления на датчике [9]. На рис. 2 видно, что на каждом пальце (кроме большого) установлено по три датчика изгиба. Также датчики установлены между пальцами, что позволит контролировать степень сжатия растяжения руки в этой области. Еще два датчика установлены у основания кисти. Всего на реализацию проприоцепции манипулятора необходимо 20 резистивных датчиков изгиба и соответственно 20 входов АЦП.

Поскольку датчик является резистивным, для его подключения к АЦП необходимо перевести полезный сигнал в напряжение. Для этого используется схема делителя напряжения, показанная на рис. 3. Так, каждый датчик изгиба подключается к общему питанию (VCC) и через постоянное сопротивление ($R=100$ КОм) к общей земле (GND). Средняя тока такого делителя выводится на вход АЦП.

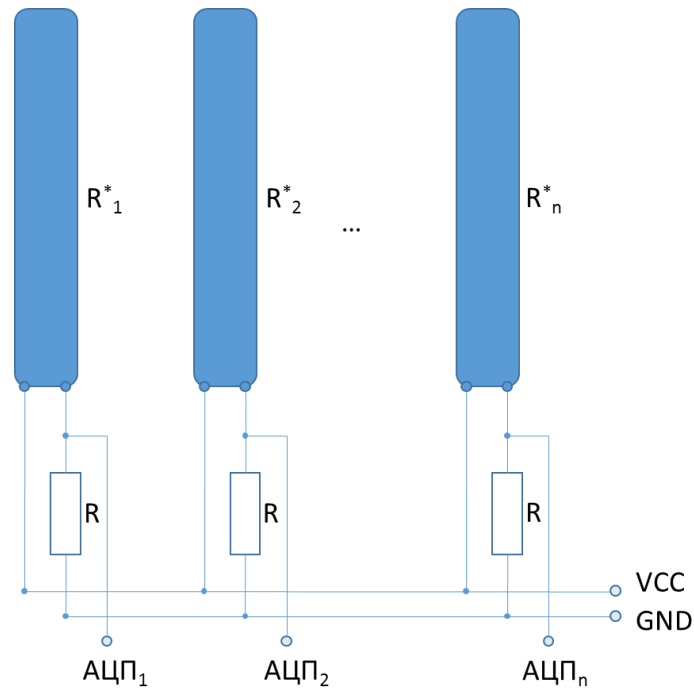


Рис. 3. Схема подключения резистивных датчиков изгиба (R^*) к системе сбора данных

Подобная схема подключения позволяет использовать общую шину питания, что уменьшает количество проводов, используемых в манипуляторе.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА

Для оценки линейности показаний датчика проводилось измерение сопротивления резистивного датчика изгиба r от угла изгиба α . Измерения проводились на 5 датчиках, каждый из которых изгибался 10 раз. Полученная за счет усреднения результатов зависимость приведена на рис. 4. Положительные углы соответствуют сгибу пальца.

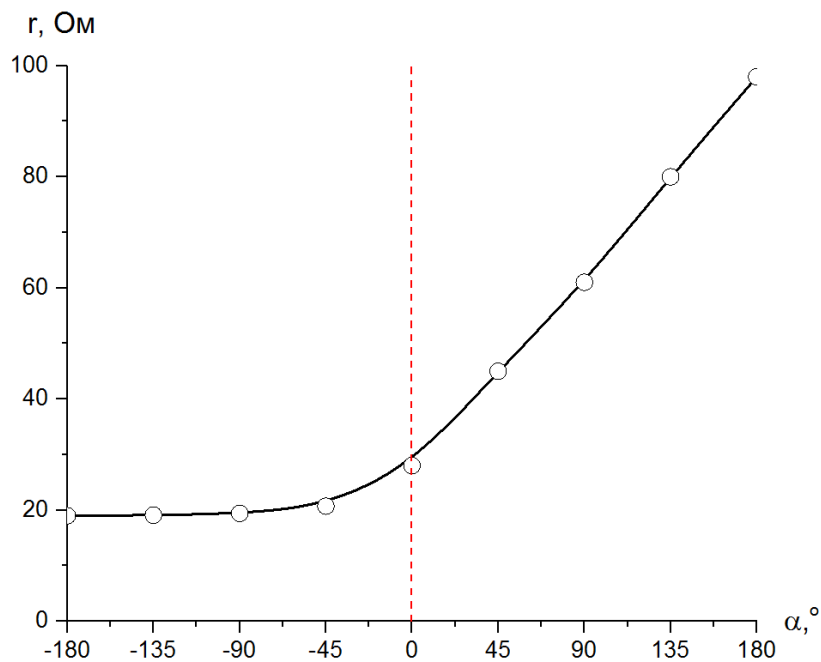


Рис. 4. Зависимость сопротивления датчика от угла изгиба

Из рисунка видно, что датчик изгиба имеет разную зависимость для положительных и отрицательных углов. Сопротивление заметно меняется при сгибе датчика, причем зависимость близка к линейной, а при отрицательных значениях изменения сопротивления незначительны. В диапазоне основных измерений (0-180°) сопротивление растет от 28 до 98 КОм.

После сборки и подключения датчиков к аналогово-цифровому преобразователю проводились измерения напряжения на входе АЦП в зависимости от угла сгиба манипулятора. Полученные данные приведены на рис. 5.

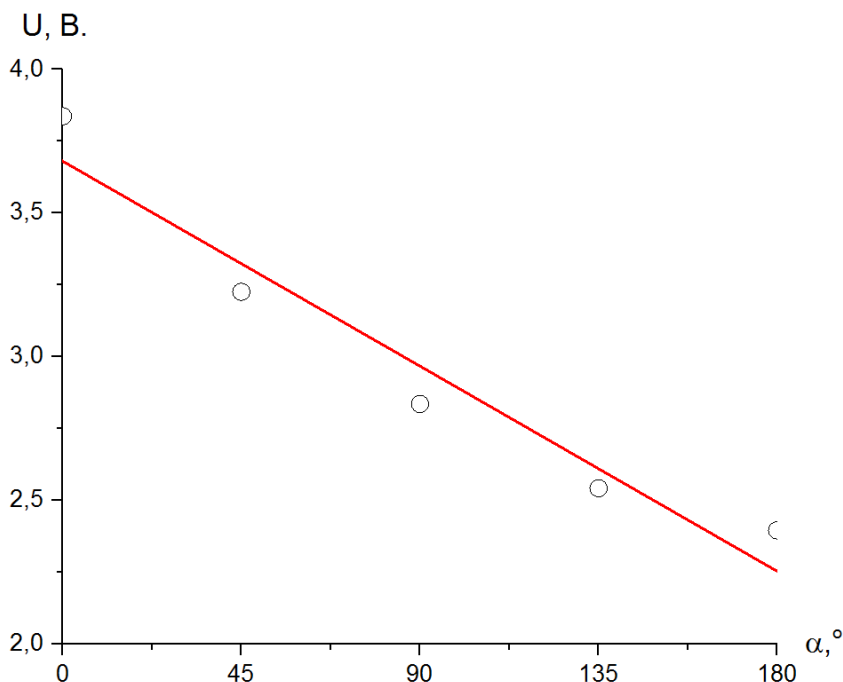


Рис. 5. Зависимость полученного интеллектуальной системой сигнала от угла изгиба пальца антропоморфного манипулятора

В случае, когда угол сгиба равен 0, на вход АЦП подается напряжение 3,7 В. Изгиб манипулятора уменьшает входное напряжение вплоть до 2,4 В. Аппроксимация полученных данных позволила получить линейную зависимость выходного напряжения от угла сгиба манипулятора:

$$U = 3,68035 - 0,00793 \cdot \alpha. \quad (1)$$

Для этой зависимости среднеквадратичное отклонение от экспериментальных данных составило $R = 0,0152$. Достаточно большая ошибка обусловлена наличием в выходном сигнале шума и нелинейностью зависимости $U = f(\alpha)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации проприоцепции на робототехническом манипуляторе, имитирующем кисть человека, необходимо разместить набор датчиков измерения угла сгиба. В данной работе для этого используется 20 резистивных датчиков изгиба, подключенных по схеме делителя напряжения. Исследования зависимости входного сигнала на АЦП от угла изгиба позволили построить линейную зависимость (1), позволяющую достаточно точно рассчитать угол сгиба по напряжению. Стоит отметить, что точность измерения положительных и отрицательных углов сгиба значительно отличается, но данный недостаток не критичен, поскольку конструкция манипулятора предполагает сгиб только в

одном направлении. Предложенная схема проприоцепции является достаточно простой и точной системой измерения положения элементов робототехнического манипулятора, а установка резистивных датчиков изгиба не потребовала значительных изменений в конструкции антропоморфного манипулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы психофизиологии: учебник / Отв. ред. Ю.И. Александров. М.: ИНФРА-М, 1997.
2. Дейкало В.П. Клиническая анатомия кисти и хирургические доступы: пособие / В.П. Дейкало, А.Н. Толстик, К.Б. Болобошко. Витебск: ВГМУ, 2013. 123 с.
3. Колубин С.А. Динамика робототехнических систем: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.
4. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. М.: Радио и связь, Горячая линия - Телеком, 2006. 96 с. (Массовая радио-библиотека. Вып. 1277).
5. L.B. Bridgwater, C.A. Ihrke, M.A. Diftler, M.E. Abdallah, N.A. Radford, J.M. Rogers, S. Yayathi, R.S. Askew, D. M. Linn The Robonaut 2 Hand – Designed To Do Work With Tools // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation - Robots and Automation: Innovation for Tomorrow's Needs; May 14, 2012 - May 18, 2012; St. Paul, MN; United States
6. J. Butterfaß, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger. Design and experiences with DLR HAND II // World Automation Congress Tenth International Symposium on Robotics with Applications Seville, Spain. June 28th-July 1st. 2004.
7. Yu She, Sandra Q. Liu, Peiyu Yu, Edward Adelson Exoskeleton-covered soft finger with vision-based proprioception and exteroception // arXiv:1910.01287v1 [cs.RO] 3 Oct 2019.
8. Лесков А.Г., Бажунова К.В. Система планирования и оценки захвата объектов манипуляционным роботом // Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург. 2016. С. 291-295.
9. FS-L-0055-253-ST Spectrasymbol resistive flex sensors datasheet URL: <https://www.spectrasymbol.com/wp-content/uploads/2019/07/flexsensordatasheetv2019revA.pdf>

REFERENCES

1. *Osnovy psikhofiziologii* [Fundamentals of Psychophysiology]: Textbook / YU.I. Aleksandrov. M.: INFRA-M, 1997.
2. Deykalo V.P. *Klinicheskaya anatomiya kisti i khirurgicheskiye dostupy* [Clinical anatomy of the hand and surgical access]: Textbook / V.P. Deykalo, A.N. Tolstik, K.B. Boloboshko. Vitebsk: VGMU, 2013. 123 p.
3. Kolyubin S.A. *Dinamika robototekhnicheskikh sistem* [The dynamics of robotic systems]: Textbook / SPb.: ITMO University, 2017. 117 p.
4. Kotyuk A. F. *Datchiki v sovremennykh izmereniyakh* [Sensors in modern measurements]. M.: Radio i svyaz, Goryachaya liniya - Telekom, 2006. 96 p. (Massovaya radio-biblioteka. V. 1277).
5. L.B. Bridgwater, C.A. Ihrke, M.A. Diftler, M.E. Abdallah, N.A. Radford, J.M. Rogers, S. Yayathi, R.S. Askew, D. M. Linn The Robonaut 2 Hand – Designed To Do Work With Tools // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation - Robots and Automation: Innovation for Tomorrow's Needs; May 14, 2012 - May 18, 2012; St. Paul, MN; United States
6. J. Butterfaß, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger Design and experiences with DLR HAND II // World Automation Congress Tenth International Symposium on Robotics with Applications, Seville, Spain. June 28th-July 1st. 2004.

7. Yu She, Sandra Q. Liu, Peiyu Yu, Edward Adelson Exoskeleton-covered soft finger with vision-based proprioception and exteroception // arXiv:1910.01287v1 [cs.RO] 3 Oct 2019.

8. Leskov A.G., Bazhinova K.V. Sistema planirovaniya i otsenki zakhvata ob"yektov manipulya-robotom [System for planning and evaluating the capture of objects by manipulator-robot] // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference, Extreme Robotics. St. Petersburg. 2016. Pp. 291-295.

9. FS-L-0055-253-ST Spectrasymbol resistive flex sensors datasheet URL: <https://www.spectrasymbol.com/wp-content/uploads/2019/07/flexsensordatasheetv2019revA.pdf>.

SENSATION MODEL OF AN ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR FOR ROBOTIC SYSTEMS

**U.H. HAMUKOV, YU.I. POPOV,
R.M. KHUZHOKOV, A.M. KSALOV, H.K. KAZANOV**

Federal state budgetary scientific establishment "Federal scientific center
"Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"
360002, KBR, Nalchik, 2, Balkarov street
E-mail: cgrkbncran@bk.ru

This article describes the task of sensing of an anthropomorphic manipulator for robotic systems in order to control the position of individual robot parts relative to each other. The structure of the proprioception system of the manipulator based on resistive flex sensors is described, as well as the connection diagram of the sensors to an analog-to-digital converter that collects data on the position of individual robot parts. In addition, a number of experiments were conducted to assess the linearity of the sensors output signal. It was found that the flex sensor has a different relationship for positive and negative bend angles. The resistance changes markedly when the sensor is bent (positive values of the bending angle), and the dependence is close to linear. And with negative values of the bending angle, the changes in resistance are insignificant. To sense the manipulator in the form of a human brush based on such a system, it is necessary to use 20 bend sensors.

Keywords: flexible sensor, manipulators, anthropomorphic robots.

Работа поступила 03.12.2019 г.