

## Определение точности позиционирования промышленных манипуляторов при помощи цифровой фото/видео камеры

**Цель исследования.** Целью исследования является разработка системы для анализа и оценки погрешностей позиционирования манипуляторов прецизионных промышленных роботов, применяемых в производстве микронной техники. Точность позиционирования манипулятора изменяется в зависимости от режимов работы робота и является сложно предсказуемой и сложно анализируемой величиной. На точность позиционирования влияют конструктивные особенности манипулятора робота, скорость движения и разворота манипулятора, промежуточные остановки и ускорения, вибрации, как собственные, так и вызванные расположением робота на производстве. Точность позиционирования может отличаться для разных точек рабочей области робота. Необходима система анализа и оценки погрешностей, позволяющая эффективно осуществлять серии в сотни и тысячи измерений. Одним из перспективных направлений является использование цифровой техники с последующей обработкой данных на компьютере.

**Материалы и методы исследования.** Построение эффективных робототехнических комплексов зависит от правильного осуществления аттестации промышленных роботов с целью обеспечения управляющих систем промышленных роботов точными данными для безотказной и корректной работы в условиях, характерных для конкретного производства. Решение сложной задачи аттестации прецизионных промышленных роботов сталкивается с трудностями подбора измерительного оборудования. Были проведены исследования, направленные на формирование точечных источников света малого диаметра. Предложен бесконтактный метод измерения, основанный на получении изображения точечных источников света с помощью цифровой фото/видео камеры. Описано применение точечных источников света для калибровки измерительной системы. Исследовались возможности уточнения положений точечных источников с помощью компьютерной обработки изображений полученных с цифровой камеры. Предложен алгоритм обработ-

ки изображения камеры, осуществляющий в несколько этапов определение точности позиционирования манипулятора робота.

**Результаты.** Разработан дистанционный, бесконтактный метод измерения погрешностей позиционирования манипуляторов промышленных роботов. Разработана методика проведения оценки точности позиционирования манипуляторов промышленных роботов на основе специально формируемых точечных источников света, устанавливаемых в схватах манипуляторов и в рабочей зоне робота. Реализовано использование цифровых фото/видеокамер для наблюдения и фиксации пространства возникающего разброса положений манипулятора. Разработано программное обеспечение обрабатывающее цифровое изображение и позволяющее произвести расчеты погрешности позиционирования. Методика позволяет эффективно проводить большие серии измерений и удовлетворяет следующим параметрам: отсутствие физических точек контакта между измерительной системой и манипулятором робота, удовлетворяющая точность измерений, простота работы с измерительным оборудованием, низкая стоимость измерительного оборудования. Работа была представлена на XLV Международной молодежной научной конференции Гагаринские чтения, МАИ, Москва, Россия, 2019г. и была отмечена дипломом.

**Заключение.** В статье представлены результаты исследований по разработке бесконтактной системы анализа и оценки погрешностей позиционирования прецизионных промышленных роботов. Полученные результаты могут быть использованы для аттестации промышленных роботов. Открывается возможность контролировать точность позиционирования манипуляторов без выведения робота из производственного процесса.

**Ключевые слова:** прецизионный промышленный робот, аттестация робота, хват манипулятора, точность позиционирования, калибровка, точечный источник света, пиксель, обработка цифровых изображений

Natalia V. Norkina, Fedor A. Mevis

Moscow aviation Institute (national research University), Moscow, Russia

## Determination of the positioning accuracy of industrial manipulators using a digital photo/video camera

**Purpose of research.** The aim of the study is to develop a system for the analysis and evaluation of positioning errors manipulators precision industrial robots used in the production of microelectronic equipment. The positioning accuracy of the manipulator varies depending on the operating modes of the robot and is difficult to predict and difficult to analyze. The accuracy of positioning is influenced by the design features of the robot manipulator, the speed of movement and rotation of the manipulator, intermediate stops and accelerations, vibrations, both own and caused by the location of the robot in production. The positioning accuracy may differ for different points of the robot working area. We need a system of analysis and error estimation that allows us to effectively carry out a series of hundreds and thousands of measurements. One of the promising areas is the use of digital technology with subsequent processing of data on the computer.

**Materials and methods of research.** The construction of effective robotic systems depends on the correct implementation of the certification of industrial robots in order to provide control systems of industrial robots with accurate data for trouble-free and correct operation in conditions specific to a particular production. The solution of the complex problem of certification of precision industrial robots faces difficulties in the selection of measuring equipment. Studies have been conducted aimed at the formation of point light sources of small diameter. A non-contact measurement method based on obtaining an image of point light sources using a digital photo/video camera is proposed. Application of point light sources for calibration of measuring system is described. Possibilities of specification of positions of point sources by means of computer processing of the images received from the digital camera were investigated. The algorithm of image

processing of the camera carrying out in several stages definition of accuracy of positioning of the manipulator of the robot is offered.

**Results.** A remote, non-contact method for measuring the positioning errors of industrial robot manipulators has been developed. A method of assessing the positioning accuracy of industrial robot manipulators based on specially formed point light sources installed in the grips of the manipulators and in the working area of the robot. Implemented the use of digital photo/video cameras for monitoring and fixing the space of the resulting spread of the manipulator positions. The software processing the digital image and allowing to make calculations of an error of positioning is developed. The method makes it possible to effectively carry out large series of measurements and meets the following parameters: the absence of physical points of contact between the measuring system and the robot manipulator, satisfying the accuracy

of measurements, ease of operation with measuring equipment, low cost of measuring equipment. The work was presented at the XLV International youth scientific conference Gagarin readings, MATI, Moscow, Russia, 2019. and was awarded a diploma.

**Conclusion.** The article presents the results of research on the development of non-contact system of analysis and evaluation of positioning errors of precision industrial robots. The obtained results can be used for certification of industrial robots. It is possible to control the positioning accuracy of manipulators without removing the robot from the production process.

**Keywords:** precision industrial robot, robot certification, manipulator Tong, positioning accuracy, calibration, point light source, pixel, digital image processing

## Введение

Современное развитие микроэлектронной техники тесно связано с применением в ее производстве и эксплуатации промышленных роботов (ПР), в том числе, прецизионных промышленных роботов (ППР), работающих в диапазонах линейных измерений, определяемых десятками и единицами микрометров / мкм/. Дальнейшее развитие микроэлектроники ведет к переходу в область измерений с точностью, определяемой нанометрами /нм/, т.е. в область «нанотехнологий».

ПР представляет собой переналаживаемую автоматическую машину для выполнения различных действий в производстве, представляющих мощные робототехнические комплексы. Преимущество робота от человека заключается в том, что робот может находиться в условиях, представляющих опасность для жизни человека. Также при правильной эксплуатации роботы могут работать без остановки длительное время. Немаловажную роль в построении эффективных робототехнических комплексов играет грамотное осуществление испытаний средств информационного обеспечения ПР с целью обеспечения управляющих систем ПР точными в пределах определённых погрешностей данными для безотказной работы в условиях внешних воздействий, характерных для конкретного производства.

В процессе научно-технического прогресса человечество пытается автоматизировать большую часть производственных процессов. В эру нано-технологий требуются очень большие точности для работы с микроэлементами, поэтому обеспечение точности и надёжности промышленных роботов становится чрезвычайно важной и актуальной задачей при создании роботизированных производств. В областях новейших направлений производства микроэлектронной техники, где человек физически не может выполнять многие сверхминиатюрные производственные операции, задача определения точности позиционирования ПР является чрезвычайно актуальной. Обеспечение точности и надёжности ПР становится чрезвычайно важной задачей в создании роботизированных производств.

На точность робота влияет точность изготовления его деталей. Чем выше точность изготовления деталей, тем должна быть выше точность самого робота [7]. Но робот – комплекс этих деталей, а значит, что каждая погрешность какой-либо детали, участвующая в движении манипулятора, вносит свой вклад в общую погрешность робота. Следствием этого является большое число элементарных погрешностей робота, сложение которых приводит к суммарным погрешностям параметров движения: точек позиционирования, скоростям и ускорениям перемещений рабочего органа

робота [13]. Невозможно добиться идеальной точности позиционирования, кроме погрешностей, создаваемых при конструировании робота, существует погрешность, создаваемая упругой деформацией плечами робота. Точность робота в разных местах его рабочей зоны и при разных скоростях движения манипулятора разная [8].

Существующие методы определения точности позиционирования ППР позволяют производить их метрологическую аттестацию, но это практически всегда связано с разработкой и применением очень сложных измерительных систем, например, лазерных трекеров, специального эталона, магнитной электронной линейки [1, 14]. В работе рассматривается способ оценки точности позиционирования ПМ на основе применения специально формируемых точечных источников света (ТИС) [2]. ТИС устанавливаются на подвижные звенья в схватах аттестуемого ПМ. Положения ТИС фиксируются с помощью цифровых фото/видео камер. Полученные результаты обрабатываются специально разработанным программным обеспечением с целью получения точности позиционирования ППР.

## Использование ТИС

Формирование ТИС, представляющего малое, не более нескольких микрометров световое пятно, осуществляется

освещением внешним источником света отражающего зеркального элемента сферической формы с размером 1–2 мм. На сферической поверхности наблюдается светящееся пятно, имеющее существенно меньший размер в сравнении с размером внешнего осветителя и сферы [5].

Проводились исследования по подбору оптимальных размеров светящегося пятна ТИС на зеркальном элементе сферической формы. Были подобраны опытным путем расстояния от сферы до осветителя [17, 18]. Оптимальный размер зеркального сферического элемента был подобран так, чтобы работа с ним не представляла больших сложностей [15]. Рассматривался вариант использования других оптических диапазонов, включая инфракрасный диапазон, с целью ликвидации всевозможных бликов и паразитных засветов, возникающих в условиях большой освещенности.

Повышение точности измерений связано с уменьшением не только размеров ТИС, но и увеличением плотности пикселей матрицы фото/видео камеры, кратности увеличения оптической системы и разрешающей способности объекта [20].

Схема технической позиции контроля положения и смещения манипулятора ПР (рис. 1) состоит из:

- Манипулятора ППР, его схвата и инструмента с ТИС-1, находящемся в схвате
- Рабочей зоны ППР в которой расположено обрабатываемое изделие с установленными на нем ТИС-2 и ТИС-3 с известным расстоянием между ними. Положение ТИС-1 наблюдается относительно ТИС-2.
- Цифровой фото/видео камеры, установленной неподвижно для наблюдения ТИС-1, 2, 3.
- Осветителя ТИС-1, 2, 3.

Положение ТИС-1 наблюдается относительно ТИС-2.

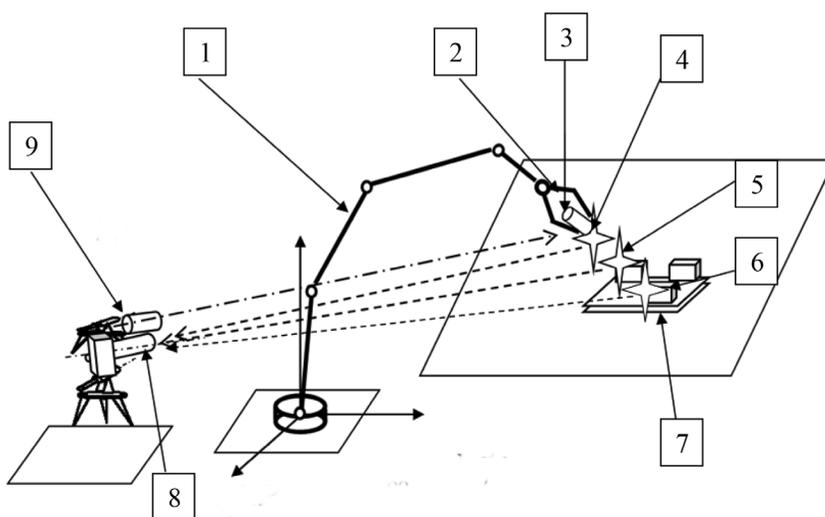


Рис. 1. Схема технической позиции контроля положения и смещения манипулятора ПР посредством наблюдения 3-х ТИС, где:

- 1) Манипулятор ППР; 2) Схват манипулятора ППР; 3) Инструмент; 4) ТИС-1 на инструменте; 5) ТИС-2 на изделии; 6) ТИС-3 на изделии; 7) Обрабатываемое изделие; 8) Цифровая фото/видео камера; 9) Осветитель ТИС

Данный метод имеет преимущество перед существующими методами оценки точности ПМ, заключающееся в том, что манипулятор ПМ и измерительная система не имеют физических точек контакта и связаны только оптически.

В качестве элементов формирования ТИС применены полированные шарики. Метод заключается в измерении рас-

стояний между ТИС-1 и ТИС-2, с применением цифровой фото/видео съемочной аппаратуры. ТИС-3 используется для калибровки.

Конструкторская реализация предлагаемого метода и варианты компоновки измерительного комплекса не представляют особых сложностей, требуется жестко закрепить стальные полированные шари-

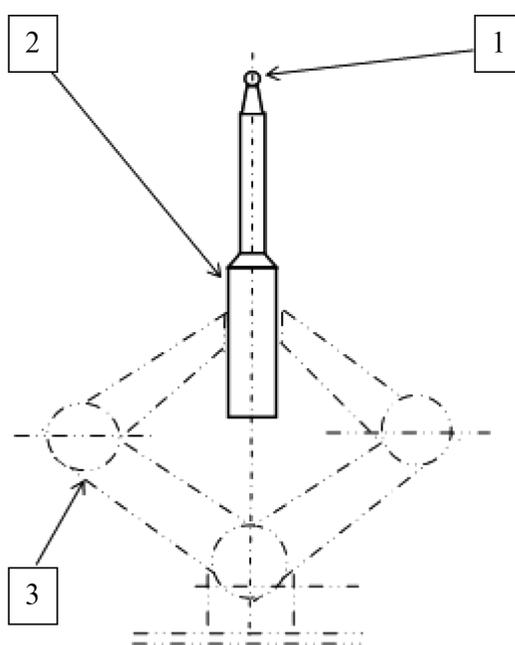


Рис. 2. Держатель точечных источников света, где:

- 1) Стальной полированный шарик (элемент формирования точечного источника света (ТИС)); 2) Основание держателя ТИС; 3) Схват манипулятора

ки ТИС на манипуляторе ПР и в рабочей зоне ПР. Пример крепления ТИС показан на (рис. 2.) [16].

### Проведение измерений

Измерения выполняются в следующем порядке:

1. Проверяется функционирование всех устройств измерительного комплекса.

2. Производится установка манипулятора в положение, в котором предполагается определять величину погрешности позиционирования манипулятора. Делается цифровой снимок захвата манипулятора робота и его рабочей зоны в данном положении.

3. Реализуется движение манипулятора по произвольно выбранной траектории. Для эксперимента допускаются кратковременные остановки робота в разных точках, что еще более усиливает фактор случайного характера воспроизводимой траектории. Скорость вращения звеньев также произвольная и рекомендуется высокая для сокращения времени проведения экспериментов.

4. Реализуется возврат робота – в первое контрольное исходное положение, выбранное и сфотографированное в п. 2. Наблюдается режим возврата робота визуально, а затем, при приближении к начальному положению вблизи этого положения производится переключение на малые скорости возвратного движения и выполняется «доводка» ТИС по всем осям до значений координат, записанных в п. 3.

5. После возврата робота в исходное положение делается цифровой снимок захвата манипулятора робота и его рабочей зоны в данном положении.

6. Цифровые снимки обрабатываются разработанным программным обеспечением.

Выполнение действий, аналогичных п. 3–6 многократное, для получения доста-

точного числа реализаций и построения пространства разброса координат позиционирования ТИС-1 относительно начальной точки положения манипулятора.

### Программное решение

Производились исследования на предмет возможности уточнения изображения при помощи программной обработки. При использовании оптических средств, таких как теодолит, отсутствует возможность проведения уточнений параметров светового пятна, таких как координат его центров и размеров [3]. Также при использовании теодолитов отсутствует возможность автоматизации процесса аттестации

роботов для получения большой серии измерений. Использование теодолитов трудно и сложно для проведения большой серии измерений.

Снимки, полученные с цифровой фото/видео камеры, обрабатываются специально разработанным программным обеспечением [4]. Обработка осуществляется в два этапа. На (рис 3) показано исходное изображение световых пятен ТИС-1, 2, 3 для обработки программой. На первом этапе, на исходном изображении путем порогового преобразования происходит поиск всех засветов [6, 9, 10]. На втором этапе происходит поиск световых пятен ТИС среди всех найденных засветов. Найденные и выделенные световые



Рис. 3. Исходное изображение

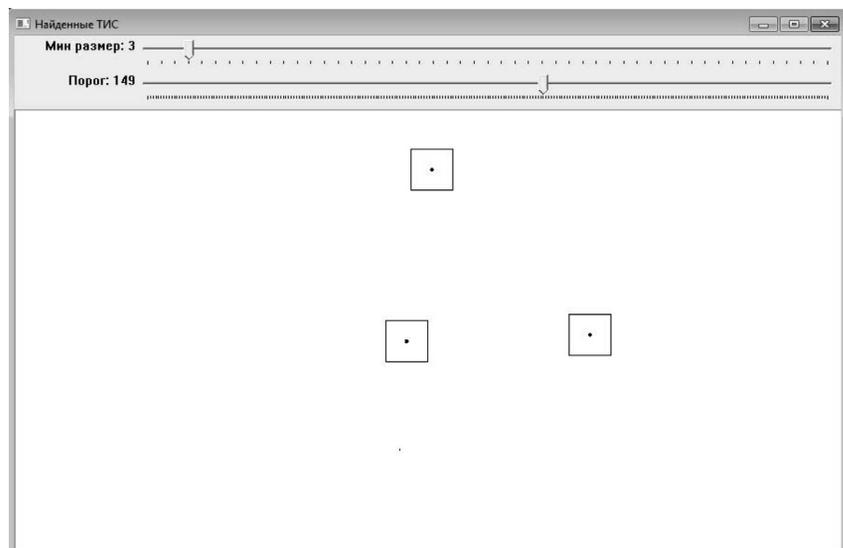


Рис. 4. Найденные ТИС

```

*****
***** Минимальный допустимый размер ТИС: 3
***** Пороговое преобразование: 149
ТИС No: X: Y: Ширина: Высота:
[1]: 448 65 4 4
[2]: 618 246 4 4
[3]: 421 253 4 4
ТИС количество: 3
    
```

Рис. 5. Найденные параметры световых пятен ТИС

пятна отображаются в окне «Найденные ТИС» (рис. 4.), где на белом фоне черным цветом отображаются световые пятна, обведенные прямоугольниками. Программа находит размеры световых пятен ТИС и координаты их центров [11, 12, 19]. Результат показан на (рис. 5.).

Исходными данными для работы программы являются снимки положения захвата манипулятора ПР в двух положениях: начальном и возвращенном.

Для определения точности позиционирования робота необходимо, при помощи созданной программы обработать фото/видео изображения захвата манипулятора робота в начальном положении и фото/видео изображения захвата манипулятора робота в возвращенном положении. Для этого отрегулировать значения минимальный размер светового пятна в пикселях: «Мин размер» и значение порогового преобразования «Порог».

В итоге получатся две таблицы положений ТИС, одна для снимка начального положения захвата манипулятора ПР, другая для возвращенного положения захвата манипулятора ПР. В таблицах будут записаны координаты центров найденных световых пятен ТИС и их ширина с высотой.

Для каждой таблицы программа геометрически вычислит координаты ТИС-1 относительно ТИС-2 в пикселях.

Для обработки результатов и получения точности позиционирования в мкм. необходимо выполнить калибровку при помощи следующих действий:

1. На полученном и обработанном изображении вычисляется расстояние между центрами световых пятен полученных от ТИС-2 и ТИС-3.

2. Измеряется реальное расстояние в микронах между сферами ТИС-2 и ТИС-3, находящимися в рабочей зоне робота.

3. Исходя из расстояния между световыми пятнами ТИС-2 и ТИС-3 и расстояния между сферами, рассчитывается соответствие размера одного пикселя изображения расстоянию в микронах.

Для определения точности позиционирования:

1. Снимки начального и возвращенного положения манипулятора робота

2. Вычисляется расстояние между центрами световых пятен ТИС-1 и ТИС-2 снимка начального положения манипулятора ПР и координатой ТИС-1 относительно координаты ТИС-2 снимка возвращенного положения манипулятора ПР.

3. Расстояние в условных единицах переводится в микроны, размер одного пикселя

в микронах получен при помощи калибровки пикселя. Полученное расстояние в микронах и является величиной, характеризующей точность позиционирования робота. Действия в п. 2–3 реализуются многократно для всей серии снимков начального и возвращенного положения манипулятора ПР. Получается достаточное число реализаций для построения пространства разброса координат позиционирования ТИС-1 относительно начальной точки положения манипулятора. Разработанный метод позволяет существенно упростить трудоемкость определения точности позиционирования ПР за счет автоматизации работы с световыми пятнами ТИС.

## Заключение

Очевидна необходимость измерения оценки погрешности позиционирования ПМ. При сложности кинематики современных ПМ возникает необходимость разработки новых методик определения точности позиционирования ПМ, обеспечивающих максимальную простоту выполнения. Описанная методика не совершенна, в процессе ее создания были выявлены проблемы, требующие более детальной проработки, например, паразитные засветки на поверхности зеркального элемента. Разработан метод определения тонности позиционирования промышленных манипуляторов при помощи цифровой фото/видео камеры. Разработано программное обеспечение, позволяющее детектировать и находить центры пятен точечных источников света на цифровых фото/видео изображениях. Разработана методика расчета точности позиционирования ПР.

## Литература

1. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1986.
2. Грачев В.В. Робототехническая система FANUC. Учебно-методическое пособие по программированию. М.: МАИ, 2015.
3. Захаров А.И. Геодезические приборы. Справочник. М.: Недра, 1989.
4. Годин Э.М., Соколов В.А. Разработка технологии испытаний и основы сертификации средств информационной и вычислительной техники. Учебное пособие. М.: МАИ, 2008.
5. Имитатор условий космического полета Т-27. Пер. с англ. Экспресс – информация // Астронавтика и ракетодинамика. 1966. Вып. 44.
6. Поддержка OpenCV [Электрон. ресурс] URL: <https://answers.opencv.org/questions/>
7. Соколов В. А. Расчет и оценка погрешностей промышленных роботов в зависимости от кинематики и конструкции подвижных сочленений звеньев манипуляторов: Методическое пособие к практическим занятиям (на примере робота LRMate200iD /фирма FANUK/). М.: МАИ, 2017.
8. Техническая документация на ПР, модель LRMate 200iD (фирма FANUC).
9. Поиск объекта по цвету – RGB [Электрон. ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/365.html> OpenCV
10. Поиск объекта по цвету. Цветовое пространство HSV [Электрон. ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/402.html> OpenCV
11. Нахождение контуров и операции с ними [Электрон. ресурс] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/640.html> OpenCV

12. Алгоритмы обнаружения движения по видеопотоку. [Электрон. ресурс] URL: [http://translate.googleusercontent.com/translate\\_c?hl=ru&langpair=en%7Cru&rurl=translate.google.com&twu=1&u=http://www.codeproject.com/KB/audiovideo/Motion\\_Detection.aspx&usg=ALkJrhiuz70ok1viVxDFDylMntEJEMT-A](http://translate.googleusercontent.com/translate_c?hl=ru&langpair=en%7Cru&rurl=translate.google.com&twu=1&u=http://www.codeproject.com/KB/audiovideo/Motion_Detection.aspx&usg=ALkJrhiuz70ok1viVxDFDylMntEJEMT-A).

13. Guanglong Du and Ping Zhang. Research Article IMU-Based Online Kinematic Calibration of Robot Manipulator // Hindawi Publishing Corporation. 2013.

14. Jorge Santolaria, Ana C. Majarena, David Samper, Agustín Brau, and Jesús Velázquez. Research Article Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Calibration by Laser Tracker Multilateration // Hindawi Publishing Corporation. 2014.

15. Черемский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник – каталог. М.: Машиностроение, 2003.

16. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов. Учебное пособие. М.: КноРус, 2016.

17. СанПиН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Изд. стандартов.

18. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования. Изд. стандартов.

19. Методы компьютерной обработки изображений под редакцией В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.

20. Чуслеева И.А. Алгоритм оптимального определения координат центра изображения для измерительного оптико-электронного прибора с матричным фотоприемником // Известия ВУзов СССР. Приборостроение. 1991. № 3. С. 82–87.

## References

1. Burdakov S.F., D'yachenko V. A., Timofeyev A. N. *Proyektirovaniye manipulyatorov promyshlennykh robotov i robotizirovannykh kompleksov: Uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov.* = Designing manipulators for industrial robots and robotic complexes: A textbook for university students. Moscow: Higher School; 1986. (In Russ.)
2. Grachev V.V. *Robototekhnicheskaya sistema FANUC. Uchebno-metodicheskoye posobiye po programmirovaniyu.* = Robotic system FANUC. Textbook on programming. Moscow: MAI; 2015. (In Russ.)
3. Zakharov A.I. *Geodezicheskiye pribory. Spravochnik.* = Geodetic instruments. Directory. Moscow: Nedra; 1989. (In Russ.)
4. Godin E.M., Sokolov V.A. *Razrabotka tekhnologii ispytaniy i osnovy sertifikatsii sredstv informatsionnoy i vychislitel'noy tekhniki. Uchebnoye posobiye.* = Development of test technology and

the basis for certification of information and computing equipment. Tutorial. Moscow: MAI; 2008. (In Russ.)

5. Imitator usloviy kosmicheskogo poleta T-27. Per. s angl. Ekspress – informatsiya. = Simulator of the conditions of the space flight T-27. Per. from English Express - Information. Astronautics and Rocket Dynamics. 1966. Iss. 44. (In Russ.)

6. OpenCV support [Internet] URL: <https://answers.opencv.org/questions/>

7. Sokolov V. A. *Raschet i otsenka pogreshnostey promyshlennykh robotov v zavisimosti ot kinematiki i konstruktсии podvizhnykh sochleneniy zven'yev manipulyatorov: Metodicheskoye posobiye k prakticheskim zanyatiyam (na primere robota LRMate200iD /firma FANUK/).* = Calculation and estimation of the errors of industrial robots depending on the kinematics and design of the movable joints of the links of manipulators: Methodical manual for practical exercises (using the example of the

robot LRMate200iD / FANUC /). Moscow: MAI; 2017. (In Russ.)

8. Technical documentation on OL, model LR-Mate 200iD (firm FANUC). (In Russ.)

9. Search object by color - RGB [Internet] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/365.html> OpenCV (In Russ.)

10. Search object by color. HSV color space [Internet] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/402.html> OpenCV (In Russ.)

11. Finding circuits and operations with them [Internet] URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/640.html> OpenCV (In Russ.)

12. Motion detection algorithms for video streaming. [Internet] URL: [http://translate.googleusercontent.com/translate\\_c?hl=ru&langpair=en%7Cru&rurl=translate.google.com&twu=1&u=http://www.codeproject.com/KB/audiovideo/Motion\\_Detection.aspx&usg=ALkJrh-uzz70ok1viVxDFDylMntEJEMT-A](http://translate.googleusercontent.com/translate_c?hl=ru&langpair=en%7Cru&rurl=translate.google.com&twu=1&u=http://www.codeproject.com/KB/audiovideo/Motion_Detection.aspx&usg=ALkJrh-uzz70ok1viVxDFDylMntEJEMT-A). (In Russ.)

13. Guanglong Du and Ping Zhang. Research Article IMU-Based Online Kinematic Calibration of Robot Manipulator. Hindawi Publishing Corporation. 2013.

14. Jorge Santolaria, Ana C. Majarena, David Samper, Agustín Brau, and Jesús Velázquez. Re-

search Article Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Calibration by Laser Tracker Multilateration. Hindawi Publishing Corporation. 2014.

15. Cherevskiy O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kacheniya: Spravochnik – katalog. = Rolling bearings: Directory - directory. Moscow: Engineering; 2003. (In Russ.)

16. Kozyrev YU.G. Zakhvatnyye ustroystva i instrumenty promyshlennykh robotov. Uchebnoye posobiye. = Gripping devices and tools of industrial robots. Tutorial. Moscow: KnoRus; 2016. (In Russ.)

17. SanPiN 2.2.4 / 2.1.8.566-96. Industrial vibration, vibration in residential and public buildings. Ed. standards. (In Russ.)

18. SNiP 23-05-95. Natural and artificial lighting. Design standards. Ed. standards. (In Russ.)

19. Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy pod redaktsiyey V.A. Soyfera. = Methods of computer image processing, edited by V.A. Soifer. Moscow: Fizmatlit; 2003. 784 p. (In Russ.)

20. Chuslyayeva I.A. Algorithm for optimal determination of image center coordinates for a measuring optoelectronic device with a matrix photodetector. Izvestiya VUZov SSSR. Priborostroyeniye. = News of USSR universities. Instrument making. 1991; 3: 82-87. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

**Наталья Викторовна Норкина**

*к.т.н. доцент*

*Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет),*

*Москва, Россия*

*Эл. почта: nata\_norkina@mail.ru*

**Федор Александрович Мевис**

*Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет),*

*Москва, Россия*

*Эл. почта: fma995@gmail.com*

#### Information about the authors

**Natalya V. Norkina**

*Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor*

*Moscow aviation Institute*

*(national research University),*

*Moscow, Russia*

*E-mail: nata\_norkina@mail.ru*

**Fedor A. Mevis**

*Moscow aviation Institute*

*(national research University),*

*Moscow, Russia*

*E-mail: fma995@gmail.com*