



УДК 535.8

## ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Д.В. Измайлов<sup>а</sup>, К.Ю. Бодров<sup>а</sup>, Н.Д. Толстога<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская ФедерацияАдрес для переписки: [nadinet@mail.ru](mailto:nadinet@mail.ru)**Информация о статье**

Поступила в редакцию 28.08.18, принята к печати 10.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-946-953

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Измайлов Д.В., Бодров К.Ю., Толстога Н.Д. Подбор параметров оптической системы и подходы к разработке программного обеспечения комплекса технического зрения для трехмерной печати // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 946–953. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-946-953

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Исследованы способы контроля процессов быстрого прототипирования с использованием программно-аппаратного комплекса технического зрения. Контроль изготовления изделий при трехмерной печати позволяет улучшить прочностные и эстетические характеристики изготавливаемых изделий, сократить материальные издержки и скорость выпуска деталей. **Метод исследования.** Теоретически определены параметры оптической системы для фиксации изображения в процессе печати. Подобраны оптические системы, способные обеспечить необходимое качество изображения. Проанализирована наиболее соответствующая поставленной задаче конфигурация размещения камер, с учетом габаритных размеров трехмерного принтера, его рабочей области и свободного пространства в корпусе. Проанализированы пути решения задач программной части комплекса. **Основные результаты.** Разработан алгоритм расчета параметров оптической системы комплекса технического зрения. Подобраны варианты оптических систем, на основе которых возможно проверить работоспособность предложенного алгоритма. Рассмотрены возможные методы разработки программ и алгоритмов обработки данных с видеокamer. **Практическая значимость.** Аппаратно-программный комплекс позволяет существенно расширить возможности автоматизации процессов быстрого прототипирования. Результаты работы могут быть полезны при контроле качества изготавливаемого изделия в процессе его производства, при выявлении отклонений от виртуальной трехмерной модели, при выработке рекомендаций по изменению управляющих команд с целью улучшения качества и повышения скорости изготовления изделия.

**Ключевые слова**

3D-печать, оптическая система, компьютерное зрение, программное обеспечение, рекомендательные системы, обнаружение брака, контроль качества, камеры, прототипирование

## SELECTION OF OPTICAL SYSTEM PARAMETERS AND METHODS FOR SOFTWARE DEVELOPMENT OF TECHNICAL VISION COMPLEX FOR THREE-DIMENSIONAL PRINTING

D. V. Izmaylov<sup>a</sup>, K. Yu. Bodrov<sup>a</sup>, N. D. Tolstoba<sup>a</sup><sup>a</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian FederationCorresponding author: [nadinet@mail.ru](mailto:nadinet@mail.ru)**Article info**

Received 28.08.18, accepted 10.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-946-953

Article in Russian

**For citation:** Izmaylov D. V., Bodrov K. Yu., Tolstoba N. D. Selection of optical system parameters and methods for software development of technical vision complex for three-dimensional printing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 946–953 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-946-953

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper presents the study of methods for control of rapid prototyping processes with the use of technical vision hardware and software system. Product monitoring is a crucial function of any manufacturing process. It becomes more important when the monitoring is performed during the the product manufacturing. Three-dimensional printing technology requires this kind of monitoring system in order to improve the visual and durable qualities of the

product, optimize the material costs and the speed of manufacturing. **Method.** The parameters of the optical system for capturing images in the printing process are defined in theory. Optical systems are selected providing the necessary image quality. The analysis of the camera placement configuration has been carried out to match optimally the task. The analysis was based on overall dimensions of the 3D printer, its working area and free space in the printer case. The ways for solution of software part problems were analyzed. **Main Results.** A mathematical apparatus was developed for calculation of the optical system parameters of a technical vision complex. Different variants of optical systems were selected for efficiency verification of the hardware and software system. Different methods for development of programs and algorithms for data processing from video cameras were considered. **Practical Relevance.** The development of the hardware and software system that controls the rapid prototyping process has a significant benefit in expanding the possibilities of automating rapid prototyping processes. The results of the work can be useful in quality control of the product during its manufacturing, in disclosure of deviations from the virtual three-dimensional model, in development of recommendations for control commands update in order to improve the quality and increase the speed of product manufacturing.

**Keywords**

3D-printing, optical system, technical vision, software, recommendation systems, defect detecting, quality control, camera, prototyping

### Введение

Технологии трехмерной (3D) печати все активнее внедряются в повседневную жизнь [1]. Однако в быстром прототипировании присутствуют серьезные проблемы, связанные с точностью, качеством, надежностью, экономичностью и безопасностью производства. Исходя из этого в технологическом процессе 3D-печати должны быть обеспечены: контроль точности изготовления изделия, выявление бракованных деталей в ходе печати, корректировка параметров печати во время работы [2–4].

Решать такие задачи можно при помощи систем технического зрения, позволяющих распознавать возникающие в ходе печати проблемы и в режиме реального времени автоматически реагировать на события, происходящие в зоне печати. Повысить точность поможет создание системы визуальной обратной связи. Контролировать бракованные детали можно при помощи сравнения детали, находящейся в процессе печати, с ее трехмерной моделью. Оснадив систему дополнительными датчиками, например, тепловизором, можно анализировать зоны перегрева модели и изменять параметры печати прямо в ходе изготовления детали.

Таким образом, необходимо разработать инструмент, способный: решать задачи визуального сервоуправления – управления с обратной связью на основе визуальных данных, получаемых с устройств регистрации изображения трехмерным (3D) принтером, контролировать качество изделия и обнаруживать брак в процессе печати. На основе полученных данных необходимо создать рекомендательную систему, обеспечивающую устранение ошибок печати. Также требуется разработка программного обеспечения (ПО) для 3D-принтера, учитывающего настройки и изменяющего параметры печати во избежание типовых ошибок, таких как локальный перегрев модели, перегревания и пр.

Внедрение аппаратно-программного комплекса технического зрения и сбора дополнительных параметров в ходе 3D-печати позволит вывести процесс быстрого прототипирования на качественно новый уровень и использовать их в любительских и профессиональных устройствах.

В настоящей работе рассмотрены варианты организации оптической и программной части комплекса.

### Технология быстрого прототипирования

3D-печать успешно находит новые области применения, появляются новые материалы и принципы печати, увеличивается количество фирм-производителей. Создание большинства деталей с помощью 3D-печати происходит методом послойного наплавления (FDM) [1].

Термопластик поступает в печатающую головку (экструдер), в которой разогревается до жидкого состояния и выдавливается через сопло. Шаговые двигатели с помощью зубчатых ремней приводят в движение экструдер, который слой за слоем наносит термопластик на рабочую область.

Перед печатью необходимо создать объект в системе автоматизированного проектирования (САПР). Затем модель в специальных программах, таких как Cura, Slic3r, Repetier и др., разбивается на множество слоев, и формируется программа-траектория для процесса печати: направление движения, высота слоя пластика, температура нагрева экструдера и другие параметры. Следуя этой программе, 3D-принтер создает смоделированный объект.

В настоящей работе в качестве устройства трехмерной печати используется 3D-принтер Ultimaker 2. Данная модель является ярким примером любительских устройств, зарекомендовавших себя в сфере технологий быстрого прототипирования (rapid prototyping, RP). Модель была собрана на базе Открытой лаборатории ОЛИМП Университета ИТМО [5, 6], являющейся целевой аудиторией для подобного рода разработок, которые работают по принципу Open-source.

Существует два основных направления исследований в области повышения точности 3D-печатных моделей:

1) изучение методами и инструментами метрологии и тестирование точностных характеристик готовых изделий, полученных с помощью конкретной конструкции 3D-принтера [7, 8];

2) контроль точности изделий при помощи программных и электротехнических средств, например, оснащение моторов энкодерами с внесением изменений в ПО 3D-принтера, оснащение рабочей камеры посредством захвата изображений с последующим их анализом в специализированном ПО [9].

В настоящей работе уделяется внимание второму направлению.

Типовые технические характеристики Ultimaker 2<sup>1</sup>:

- размер рабочей области: 215×200×195 мм;
- высота слоя: 200–100 мкм;
- скорость печати: 30–100 мм/с;
- диаметр сопла: 0,4 мм;
- размер корпуса: 357×342×388 мм.

К типовым проблемам, возникающим при работе на данном 3D-принтере, можно отнести: смещение и деламинацию слоев в процессе печати, недостаточное или избыточное экструдирование, засорение сопла печатающей головки, расслоение габаритных моделей при остывании и др., – которые важно фиксировать в моменты их возникновения для анализа и(или) дальнейшей остановки печати.

### Подбор характеристик оптической системы

Для подбора характеристик оптической системы необходимо:

- определить расположение и количество используемых камер;
- выбрать тип видеокамер, которые будут взаимодействовать;
- подобрать параметры, которые позволят обрабатывать полученные изображения и детектировать брак.

Рассмотрено несколько основных вариантов размещения регистрирующего изображение устройства.

1. *Вариант с одной камерой, расположенной над экструдером* (рис. 1). В данном варианте предлагается, что после каждого готового слоя экструдер возвращается на начальную позицию, после этого камера фотографирует объект. С помощью ПО создается массив изображений, который послойно сравнивается с моделью и позволяет выявлять брак изделия. Достоинства варианта: минимальные затраты, относительно простая обработка изображений объекта. Недостатки: увеличение времени печати, возможное ухудшение качества, отсутствие возможности непрерывного контроля качества изделия.

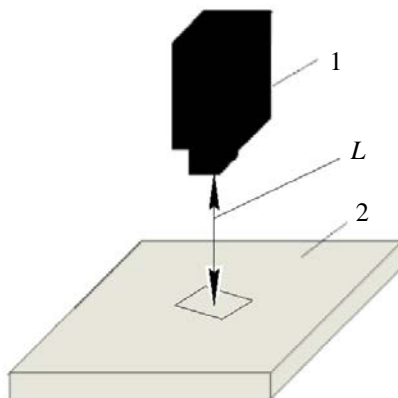


Рис. 1. Расположение камеры над рабочей областью (1 – камера, 2 – рабочая область,  $L$  – расстояние)

2. *Вариант с двумя камерами, расположенными по сторонам принтера на уровне сопла экструдера* (рис. 2). Такого расположения можно добиться при использовании объективов с линзой fish-eye, которая захватит большую часть печатаемого объекта. Достоинства: экономия средств за счет небольшого числа камер, возможность вариативного расположения видеокамер в рабочем пространстве 3D-принтера. Недостатки: более сложный, по сравнению с первым вариантом, процесс обработки изображений, размытие по краям изображений, неполное попадание объекта в поле зрения камер.

<sup>1</sup> <https://ultimaker.ru/>

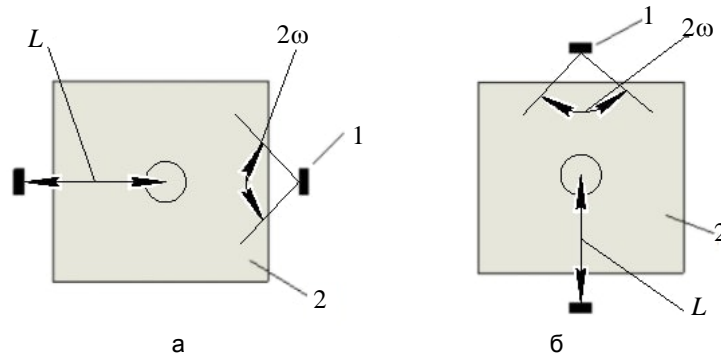


Рис. 2. Размещение камер по сторонам 3D-принтера на уровне сопла: а – по боковым сторонам 3D-принтера; б – на передней и задней сторонах 3D-принтера.  
(1 – камера, 2 – рабочая область,  $L$  – расстояние,  $2\omega$  – угловое поле)

3. Вариант, при котором три камеры расположены на уровне сопла экструдера, две – по углам передней стороны 3D-принтера, одна – в центре задней стороны 3D-принтера (рис. 3, а). Достоинства: полный охват всех сторон объекта. Недостатки: максимальное расстояние от камер, расположенных на углу рабочей области.
4. Вариант, при котором четыре камеры расположены на уровне сопла экструдера по всем сторонам 3D-принтера (рис. 3, б). Достоинства: охват всех сторон объекта, оптимальное максимальное расстояние до объекта. Недостатки: высокая стоимость оборудования.

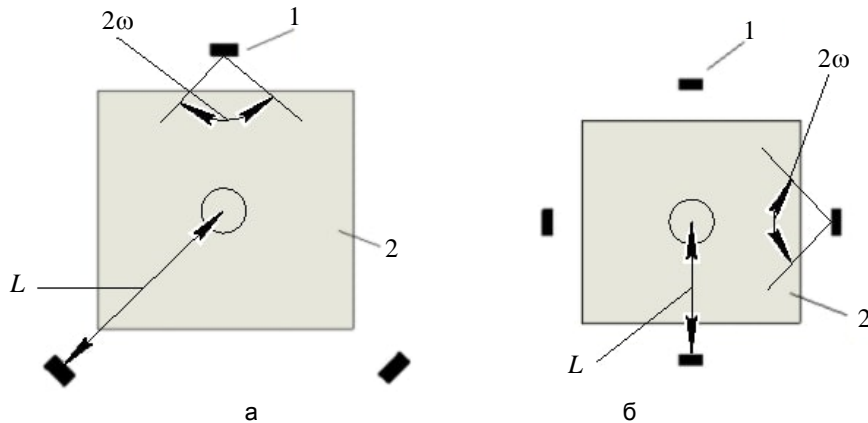


Рис. 3. Расположение камер: три камеры над рабочей областью (а); четыре камеры на уровне сопла экструдера (б)

В настоящей работе использован четвертый вариант благодаря широкому ассортименту камер, обеспечиваемому сокращением максимального расстояния от камеры до объекта и снижением углового обзора.

Выбор типа камер также важен, поскольку они имеют различные особенности.

Веб-камеры могут удовлетворять качеством изображения на различных дистанциях, однако минимальное расстояние фокусировки на объекте варьирует от 30 до 100 мм, из-за чего придется либо удалить камеры от рабочей области, при этом увеличив максимально возможное расстояние до объекта и деформировав корпус 3D-принтера, чтобы разместить камеры, либо уменьшить рабочую область 3D-печати. При этом возможность дистанционного наблюдения затрудняется, поскольку камеры должны быть постоянно подключены к компьютеру.

Цифровые видеокамеры прекрасно могут подойти для детектирования брака, поскольку они обладают высоким разрешением съемки, большим диапазоном расстояний между объектом и камерой, а также автофокусировкой. Однако габаритные размеры большинства подобных видеокамер не позволяют использовать их в корпусе 3D-принтера, кроме этого, высокая стоимость таких камер является веским отрицательным аргументом. Также отсутствует возможность подключения и передачи данных во время печати на компьютер для детектирования брака в онлайн-режиме.

Камеры видеонаблюдения, так же как и цифровые видеокамеры, характеризуются дороговизной, большими размерами. Главным минусом их применения в качестве системы технического зрения 3D-принтера является минимальное расстояние фокусировки объекта, как правило, такие камеры могут фокусироваться на объекте на расстоянии не менее полметра.

Модульные камеры имеют минимально возможные размеры, при этом некоторые модели обладают высоким разрешением съемки. Такие камеры можно подключать к одноплатным компьютерам и дистанционно передавать всю информацию о происходящем в зоне 3D-печати.

Таким образом, для очерченного круга задач оптимальным вариантом является использование модульных камер.

#### Алгоритм подбора видеокамер по их характеристикам

Камеры должны обеспечивать выполнение двух условий:

- попадание рабочей частоты оптической системы в область частоты Найквиста [10];
- плотность пикселей на изображении одного слоя пластика – не менее двух.

Первое условие является следствием из теоремы Котельникова [11–13]: при максимальной частоте сигнала, равной или превышающей половину частоты дискретизации, невозможно восстановить сигнал из дискретного в аналоговый без искажений. Выполнение второго условия также необходимо для идентификации слоев пластика на получаемом изображении.

1. Расчет размера одного пикселя матрицы:

$$s = (x_m - n) / 1000,$$

где  $x_m$  – размер одной из сторон матрицы,  $n$  – число пикселей на соответствующей стороне матрицы.

2. Расчет частоты Найквиста:

$$N_{\text{найкв}} = 1 / 2s.$$

3. Расчет рабочей частоты:

$$\text{tg}\psi = \xi - L; \text{tg}\psi = \frac{1}{f_{\text{об}}' \cdot N_{\text{раб}}},$$

где  $N_{\text{раб}}$  – рабочая частота;  $\psi$  – угловой размер деформации;  $\xi$  – максимальное значение деформации;  $f_{\text{об}}'$  – задний фокус объектива;  $L$  – расстояние до объекта.

4. Сравнение рабочей частоты с частотой Найквиста.

$$N_{\text{раб}} \geq N_{\text{найкв}}.$$

5. Расчет линейного увеличения:

$$\beta = f_{\text{об}}' - L,$$

где  $\beta$  – линейное увеличение.

Расчет высоты изображения слоя пластика:

$$\beta = y' - y,$$

где  $y'$  – величина изображения;  $y$  – величина предмета.

6. Расчет плотности пикселей на одном слое пластика:

$$p = y' - s.$$

С помощью предложенного алгоритма рассчитаны параметры модульных камер, а также стандартных цифровой и веб-камеры. Результаты представлены в табл. 1, 2.

С помощью данного алгоритма проведены расчеты параметров, представленных в табл. 1, для модульных камер, а также для стандартных цифровой и веб-камеры.

Параметр	A4 Tech PK-760E	SONY HDR-CX405	Raspberry PI V2
Тип камеры	Веб	Цифровая	Модульная
Число камер	4	1	4
Цена одной камеры, руб.	766,00	16990,00	2990,00
Тип матрицы	КМОП	КМОП	КМОП
Длина матрицы, мм	2,40	2,40	3,60
Высота слоя, мм	0,20	0,20	0,20
Деформация для видеосъемки, мм	0,80	0,10	0,30
Деформация для фотосъемки, мм	0,20	0,10	0,20
Максимальное расстояние до объекта, мм	215,00	164,50	107,50
Минимальное расстояние до объекта, мм	100,00	57,00	30,00
Рабочая зона, мм	125×110	215×200	215×200
Угол обзора, град	66	–	72,40
Фокусное расстояние, мм	3,00	57,00	3,30
Габариты, мм	56×49×46	59,5×128×54	25×24×6
Разрешение фото, пкс	2560	4032	3280
Разрешение видео, пкс	640	1920	1920

Таблица 1. Сравнительные характеристики видеокамер

Параметр	Видеосъемка			Фотосъемка		
Размер пиксела, мкм	3,75	1,25	1,875	0,94	0,60	1,10
Частота Найквиста, лин/мм	133,33	400,00	266,67	533,33	840,00	455,56
Рабочая частота, лин/мм	89,58	28,86	162,88	358,33	28,86	162,88
Линейное увеличение	0,01	0,35	0,03	0,01	0,35	0,03
Высота слоя пластика, мкм	2,79	69,30	6,14	2,79	69,30	6,14
Плотность пикселей, 1/слой	0,74	55,44	3,27	2,98	116,43	5,59

Таблица 2. Расчет параметров для видео- и фотосъемки

По результатам расчетов можно сделать вывод, что стандартная веб-камера справляется с поставленной задачей в режиме видеосъемки (табл. 2) только при деформациях, больших или равных четырем слоям пластика, при этом плотность пикселей на один слой пластика примерно равна единице, что недостаточно для их идентификации, однако в режиме фотосъемки камера может фиксировать деформации, соответствующие одному слою пластика. Параметры цифровой камеры рассчитывались для варианта расположения экструдера сверху, можно сделать вывод, что такие камеры наилучшим образом подходят для решения данной задачи при видео- или фотосъемке.

Модульные камеры справляются с задачей в режиме видеосъемки при размерах деформаций, превышающих 1,5 слоя пластика, но плотности пикселей на один слой пластика может быть недостаточно для обнаружения дефектов на краях рабочей области, тем не менее в режиме фотосъемки такие камеры могут распознавать деформации, соответствующие одному слою пластика.

Таким образом, исходя из всех полученных показателей, можно сделать вывод, что модульные видеокамеры подходят для обнаружения брака в процессе трехмерной печати.

При этом стоит понимать, что в данных расчетах учитывались только самые важные параметры для идентификации слоев пластика и их дефектов и не учитывались освещенность, контраст, цвет пластика и др. – параметры, которые в совокупности также могут повлиять на качество получаемого изображения, поскольку не зависят от характеристик оптического оборудования, и их расчет может послужить темой отдельного исследования.

#### Программное обеспечение для обнаружения дефектов в зоне печати

ПО для системы технического зрения может быть реализовано с помощью различных платформ и языков программирования, начиная от традиционного C/C++ до скриптовых языков Python. Для организации дистанционного управления и наблюдения за процессом печати могут быть использованы веб-интерфейсы OctoPrint<sup>1</sup>, Repetier-Server<sup>2</sup>, AstroPrint<sup>3</sup> и др. Некоторые платформы являются открытыми и распространяются бесплатно. Дополнительным фактором выбора готовых платформ является возможность интеграции в них различных независимо компилируемых программных модулей, динамически подключаемых к основной программе и предназначенных для расширения и (или) использования ее возможностей (плагинов) и собственного кода. Плагины обычно выполняются в виде библиотек общего пользования.

Для обработки изображений можно воспользоваться распространяемой по открытой лицензии библиотекой компьютерного зрения OpenCV [14, 15]. Фактически она стала стандартом программ и алгоритмов компьютерного зрения. Ее единственным конкурентом в компьютерном зрении становятся нейронные сети.

Вне зависимости от языка программирования и подключаемой библиотеки алгоритм первичной обработки изображений может быть реализован стандартными инструментами. Алгоритм включает следующие шаги:

- получение информации о модели;
- получение информации о параметрах печати (скорости подачи филамента, текущей позиции экструдера, времени печати);
- получение информации о камере и ее положении;
- формирование тестового изображения модели;
- ввод изображения;
- коррекция масштаба изображения;
- математическая обработка по рядам пикселей, поиск среднего значения цвета по RGB или HSV. Расчет средних значений этих столбцов, проверка на соответствие ожидаемому диапазону. Если соответствие не обнаружено, то устанавливается маркер;

<sup>1</sup> OctoPrint <https://octoprint.org/>

<sup>2</sup> Repetier Server <https://www.repetier-server.com/>

<sup>3</sup> AstroPrint <https://www.astroprint.com/>

- математическая обработка по рядам пикселей для столбцов. В случае необходимости операции повторяются;
- по окончании обработанные изображения архивируются для дальнейшего анализа.

### Заключение

Аддитивные технологии, и трехмерная печать в частности, являясь сравнительно молодой отраслью, находятся в процессе развития. На данный момент начали выпускаться отраслевые и государственные стандарты, закрепляющие базовые положения для успешного осуществления производственных процессов в этой сфере. Одной из ключевых технологий для трехмерной печати является техническое зрение. С его помощью возможно преобразовать обычный трехмерный принтер с числовым программным управлением в интеллектуальную мехатронную систему, а затем добавить экспертную систему и рекомендательную. По итогам таких преобразований 3D-принтеры могут стать не просто исполнителями заданных программ, а умными помощниками и советчиками для инженеров и представителей других профессий, использующих подобные устройства.

В работе рассмотрены вопросы создания оптической и программной систем, предложены варианты организации оптической системы с учетом вариативности компонентов, сформированы варианты и предложения по размещению внутри трехмерного принтера системы технического зрения.

Использование систем технического зрения позволяет найти новые решения в контроле качества трехмерной печати, поэтому дальнейшие разработка и усовершенствование таких систем путем включения дополнительных датчиков, камер и программного обеспечения, имеют большой потенциал. Выявлено, что состоящая из модульных видеокамер оптическая система с интегрированным программным обеспечением обеспечивает контроль процесса быстрого прототипирования.

### Литература

1. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
2. Валетов В.А., Бобцова С.В. Изготовление пресс-форм с помощью RP-технологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 4(15). С. 306–309.
3. Бобцова С.В., Валетов В.А. Возможности использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. № 3. С. 97–103.
4. Валетов В.А., Бобцова С.В. Влияние RP-технологий на качество изделий // Инструмент и технологии. 2004. С. 20–24.
5. Ivashchenko M., Bodrov K., Tolstoba N. Educational area for learning of optics and technologies: union of Open Laboratories of Ideas, Methods and Practices (OLIMP) // Proceedings of SPIE. 2016. V. 9946. doi: 10.1117/12.2238002
6. Иващенко М.И., Бодров К.Ю. Организация и структура открытой лаборатории идей, методик и практик. Работа с инициативной молодежью // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 3(28). С. 151.
7. Сaitgalina A.K., Tolstoba N.D., Mityushkin A.V. Разработка и производство тестовых образцов для исследования прочностных свойств пластикового оборудования для оптических учебных стендов // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2016. Т. 2. С. 146–150.
8. Saitgalina A., Mityushkin A., Tolstoba N.D. Research of limits of applicability of an open-source equipment for development the optical equipment kit // Proceedings of SPIE. 2016. V. 9889. doi: 10.1117/12.2227869
9. Bodrov K.Y., Tolstoba N.D., Izmailov D.V. Computer vision system selection for control of rapid prototyping processes // Proceedings of SPIE. 2018. V. 10695. doi: 10.1117/12.2313959
10. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. V. 47. N 2. P. 617–644. doi: 10.1109/t-aiee.1928.5055024
11. Жмудь В.А. Теорема Котельникова-Найквиста-Шеннона. Принцип неопределенности и скорость света // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1(7). С. 127–136.
12. Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 128 с.
13. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред.

### References

1. Valetov V.A. *Additive Technologies: State and Prospects*. St. Petersburg, ITMO University, 2015, 63 p. (in Russian)
2. Valetov V.A., Bobtsova S.V. Molds making using RP-technology. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2004, no. 4, pp. 306–309. (in Russian)
3. Bobtsova S.V., Valetov V.A. Possibility of rapid prototyping technology using in instrumentation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2001, no. 3, pp. 97–103. (in Russian)
4. Valetov V.A., Bobtsova S.V. Influence of RP-technology on the product quality. *Instrument i Tekhnologii*, 2004, pp. 20–24. (in Russian)
5. Ivashchenko M., Bodrov K., Tolstoba N. Educational area for learning of optics and technologies: union of Open Laboratories of Ideas, Methods and Practices (OLIMP). *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9946. doi: 10.1117/12.2238002
6. Ivashchenko M.I., Bodrov K.Yu. Organization and structure of the Open Laboratory of Ideas, Methods and Practices. Working with the initiative youth. *Internet-Zhurnal Naukovedenie*, 2015, vol. 7, no. 3, p. 151. (in Russian)
7. Saitgalina A.K., Tolstoba N.D., Mityushkin A.V. Development and production of test samples for the study of the strength properties of the plastic optical equipment for educational stands. *Proc. 5<sup>th</sup> All-Russian Congress of Young Scientists*. St. Petersburg, vol. 2, pp. 146–150. (in Russian)
8. Saitgalina A., Mityushkin A., Tolstoba N.D. Research of limits of applicability of an open-source equipment for development the optical equipment kit. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9889. doi: 10.1117/12.2227869
9. Bodrov K.Y., Tolstoba N.D., Izmailov D.V. Computer vision system selection for control of rapid prototyping processes. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10695. doi: 10.1117/12.2313959
10. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, vol. 47, no. 2, pp. 617–644. doi: 10.1109/t-aiee.1928.5055024
11. Zhmud V. Nyquist-Shannon and Kotelnikov theorem, the uncertainty principle, and the speed of light. *Automatics and Software Engineering*, 2014, no. 1, pp. 127–136. (in Russian)
12. Grammatin A.P., Romanova G.E., Balatsenko O.N. *Calculation and Automation of the Design of Optical Systems*. St. Petersburg, NRU ITMO, 2013, 128 p. (in Russian)
13. *Computational Optics: A Handbook*. Eds. M.M. Rusinov, A.P. Grammatin, P.D. Ivanov et al. Moscow, Mashinostroenie

- М.М. Русинова, А.П. Грамматина, П.Д. Иванова и др. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
14. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.
  15. Гарсиа Г.Б., Суарес О.Д., Аранда Х.Л.Э. и др. *Обработка изображений с помощью OpenCV*. М.: ДМК-Пресс, 2016. 210 с.

#### Авторы

**Измайлов Даниил Владимирович** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57202978946, ORCID ID: 0000-0001-7016-3137, danya-izmaylov@mail.ru

**Бодров Кирилл Юрьевич** – заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57192575443, ORCID ID: 0000-0003-3953-4811, kbodrov5@gmail.com

**Толстоба Надежда Дмитриевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6505967721, ORCID ID: 0000-0002-4108-7232, nadinet@mail.ru

- Publ., 1984, 423 p. (in Russian)
14. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.
  15. Garcia G.B., Suarez O.D., Aranda J.L.E. et al. *Learning Image Processing with OpenCV*. Packt Publ., 2015, 223 p.

#### Authors

**Daniil V. Izmaylov** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57202978946, ORCID ID: 0000-0001-7016-3137, danya-izmaylov@mail.ru

**Kirill Yu. Bodrov** – Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57192575443, ORCID ID: 0000-0003-3953-4811, kbodrov5@gmail.com

**Nadezhda D. Tolstoba** – PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6505967721, ORCID ID: 0000-0002-4108-7232, nadinet@mail.ru