



DOI: 10.18721/JPM.12107

УДК 621.391:681.142

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

В.Н. Савин, В.А. Степанов, М.В. Шадрин

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

г. Рязань, Российская Федерация

Разработана и реализована схема оптического микроскопа, включающего специальную бителецентрическую оптическую систему для формирования диодной подставки и телецентрического объектива для захвата изображения. Применение указанной системы позволяет снизить влияние дифракционных эффектов на краях теневой картины и измерять с помощью оптического микроскопа основные параметры режущего микроинструмента – его вылет и диаметр. Разработан алгоритм, моделирующий два основных зрительных канала глаза человека и детектирующий быстрые пространственно-временные процессы и шумы. Алгоритм обеспечивает измерение контура режущей кромки инструмента с субпиксельной точностью (до 0,01 пикселя) и позволяет определять физические размеры режущего инструмента с погрешностью 0,5 мкм.

Ключевые слова: телецентрический объектив, модель зрения человека, микроинструмент, субпиксельная точность

Ссылка при цитировании: Савин В.Н., Степанов В.А., Шадрин М.В. Технология измерения геометрических параметров микроинструмента на основе модели зрения человека // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 87–95. DOI: 10.18721/JPM.12107

HUMAN VISUAL MODEL-BASED TECHNOLOGY: MEASURING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF MICROINSTRUMENT

V.N. Savin, V.A. Stepanov, M.V. Shadrin

Ryazan State University named for S.A. Esenin, Ryazan, Russian Federation

In the paper, a scheme of an optical microscope which includes a special bitelecentric optical system for the formation of a diode support and a telecentric objective for capturing the image has been designed and implemented. The use of such system makes it possible to reduce the diffraction effects at the edges of the shadow structure and to measure (using the microscope) the main parameters of a cutting microinstrument: its protrusion and diameter. An algorithm for modeling the two main visual channels of the human eye was developed. It allowed rapid detection of spatial-temporal processes and noise, and provided measuring the cutting edge contour of the instrument with a subpixel error (up to 0.01 pixel) and determining the dimensions of the cutting tool with an error of 0.5 μm .

Keywords: telecentric objective, human visual model, microinstrument, subpixel accuracy

Citation: V.N. Savin, V.A. Stepanov, M.V. Shadrin, Human visual model-based technology: measuring the geometric parameters of microinstrument, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (1) (2019) 87–95. DOI: 10.18721/JPM.12107

Введение

Основу современного обрабатывающего производства металлов (механическая обработка) составляют станки и обрабатывающие центры с ЧПУ (числовое программное управление). Для получения на таких станках высококачественной продукции, обладающей заданной точностью исполнения, необходимо учитывать ряд факторов. Некоторые из них обеспечиваются на стадии проектирования изделия. Создается управляющая программа, подбираются материал и инструмент. Но реальные инструменты не всегда абсолютно точно соответствуют заданным в программе объектам. Современные системы позволяют корректировать работу станка с учетом реальных размеров инструмента, но для этого необходимо точно знать параметры этого инструмента.

Существует множество способов (как оптических, так и механических) оценивать и измерять параметры режущих кромок инструментов [1]. Наиболее современными являются пресеттеры на основе оптического микрометра. Данные устройства позволяют быстро и с высоким качеством получать необходимые данные о геометрических параметрах режущего инструмента. Предел точности таких устройств составляет 5 мкм на каждые 100 мм. Современные средства не позволяют в условиях производства быстро измерять такие величины.

Данная работа направлена на создание устройства и программно-аппаратной технологии, позволяющих быстро и точно измерять такие параметры режущего концевое и расточного микроинструмента, как вылет и диаметр фрезы, сверла, метчика и т. п. перед тем как установить их в шпиндель станка с точностью не хуже 1 мкм.

Технология предназначена для прецизионного бесконтактного оперативного измерения и коррекции режущего микроинструмента вне станка в условиях цеха.

Нами разработано и создано устройство для предварительной настройки инструмента вне станка (пресеттер). Оно представляет собой программно-аппаратный комплекс с оптическим микрометром и линейными энкодерами. Специальное программное обеспечение (ПО) обеспечивает прием сигналов с микрометрических линейных энкодеров и оптического микро-

метра и вычисляет параметры инструмента. Результаты работы программы отображаются на дисплее. Взаимодействие с оператором происходит через интерфейс пользователя ПО.

Подбор компонентов и разработка оптической схемы

Отличительной особенностью разрабатываемой технологии является использование модели строения сетчатки человеческого глаза и применение бителецентрической оптики для формирования диодной подсветки и телецентрического объектива для захвата изображения. Применение указанных средств позволяет снизить влияние дифракционных эффектов на краях теневой картины.

Разработка оптической схемы составляет один из важнейших этапов работы. От ее качества прямо зависят потребительские свойства всего устройства. Как бы ни была совершенна электронная схема, в любом случае необходима высококачественная, точно рассчитанная и изготовленная оптическая система. В противном случае искаженные данные, поступающие с нее после математической обработки, могут вносить существенные погрешности в точность измерения. Поэтому к ее разработке требуются особые подходы как в научном, так и в конструкторском аспектах.

При работе над оптическими схемами для контрольно-измерительной системы прежде всего анализируется и используется информация о необходимом диапазоне и точности измерений, о методах расчета и настройки оптического узла, о приемах по повышению ее разрешающей способности и сведению к минимуму аббераций различного рода.

В основе пресеттера лежит оптический микрометр (рис. 1), использующий бителецентрический объектив и ход лучей, обеспечивающий получение четкой бездифракционной тени края микроинструмента в увеличенном масштабе. Указанная тень анализируется с помощью алгоритма. Последний находит крайние точки проекции и с помощью математической интерполяции (см. следующий раздел) вычисляет координаты точек и значения радиуса и высоты микроинструмента (объект измерения).

В оптической схеме микроскопа необходимо с высокой точностью согласовывать

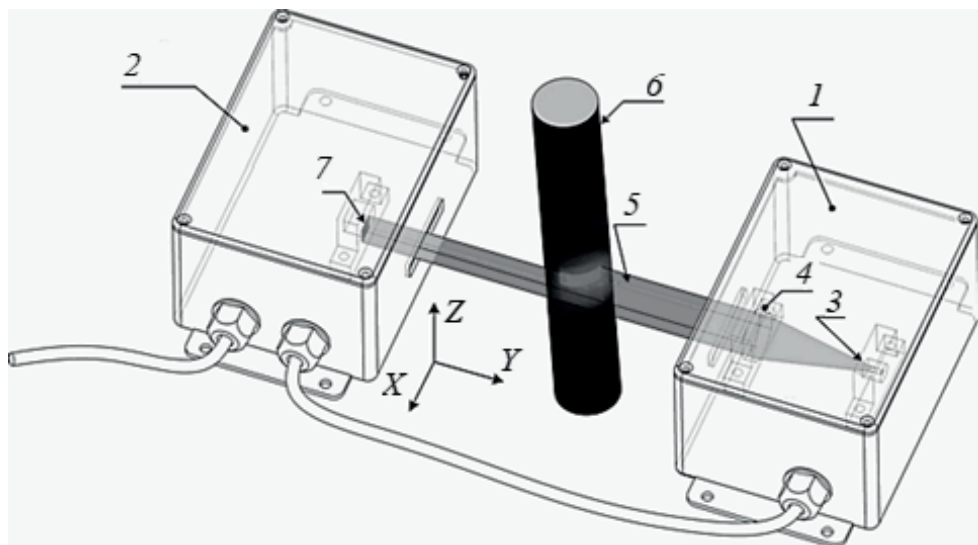


Рис. 1. Функциональная схема оптического микрометра:

1 – излучающий блок, 2 – приемный блок, 3 – источник излучения, 4 – оптическая схема, 5 – сканирующий луч, 6 – объект измерения, 7 – фотоприемник

соосность объектива и источника излучения. Диаметр бителецентрического объектива и луча задней подсветки составляет 16 мм и позволяет создавать точную, практически бездифракционную тень в плоскости изображения фотоприемника. Система предназначена для работы с неподвижными объектами, при этом измеряемая режущая кромка строго соосна со шпинделем системы.

При телецентрическом ходе лучей неточность наводки не влияет на цену деления отсчетных шкал прибора. Наиболее целесообразны объективы с бителецентрическим ходом лучей, свободные от дисторсии и характеризующиеся постоянным линейным увеличением [2].

Оптический микрометр – наиболее важная часть разрабатываемой системы, он состоит из трех основных элементов: КМОП-сенсора (комплементарные полевые транзисторы со структурой металл – оксид – полупроводник, CMOS), бителецентрического объектива и телецентрического излучателя. На данный момент лидерами в производстве телецентрических объективов можно назвать две конкурирующие фирмы: Opto Engineering (Италия) и Sill Optics (Германия).

Бителецентрический объектив выбирается в соответствии с требованиями, налагаемыми на параметры разрабатываемой системы (излагаются ниже).

Для бителецентрического объектива характерна особенность, что он захватывает только лучи, которые идут параллельно

его оптической оси. Ввиду этого отсутствует эффект перспективы (когда дальние объекты кажутся меньше, чем ближние) и в камеру не попадают лучи, падающие под углом и отражающиеся от других поверхностей. Однако такой эффект имеет оборотную сторону и накладывает ограничение, а именно – объектив «видит» только область, меньшую или равную площади внешней линзы. Диаметр внешней линзы составляет 16 мм. Таким образом объектив позволяет захватить область площадью примерно 200 мм².

Для эффективной же работы микрометра и его калибровки необходимо, чтобы объектив «видел» площадку размером не менее 8×6 мм (исходя из характеристик объектива).

Вторым важным параметром для поиска точки максимальной фокусировки является глубина резкости объектива. Она должна быть не более 2 мм для настройки режущего инструмента в рассматриваемой системе. Только в этой точке можно корректно измерить вылет инструмента. В противном случае не будет соблюдаться строгая перпендикулярность между линией «ось инструмента – его режущая кромка» и оптической осью микрометра.

Третий важный параметр – это расстояние, на котором начинается диапазон измерения. Данное расстояние можно вычислять путем вычитания глубины резкости объектива из его рабочего расстояния (расстояние, на котором достигается макси-

мальная фокусировка). Этот параметр необходимо учитывать при проектировании конструкции оптического микрометра.

На основе указанных выше требований выбран специальный бителецентрический объектив ТС 23009 итальянской компании Opto Engineering.

Для корректной работы бителецентрического объектива необходим согласованный с ним телецентрический излучатель. Основное требование, к нему предъявляемое, – диаметр внешней линзы бителецентрического объектива должен совпадать с диаметром внешней линзы телецентрического излучателя. Такому требованию удовлетворяет излучатель LTCLHP023-R, также выпускаемый компанией Opto Engineering.

Для получения корректного изображения контуров измеряемого объекта компоненты оптической схемы необходимо разместить следующим образом.

Модуль подсветки располагается напротив объектива, причем ось модуля подсветки совпадает с оптической осью объектива. Расстояние между объективом и модулем подсветки может находиться в пределах от 120 до 150 мм. Нами выбрано расстояние – 125 мм (рис. 2). Измеряемый объект должен располагаться на расстоянии 62,2 мм от объектива.

Важной частью любой оптической схемы является КМОП-сенсор. Как и в случае трехмерного триангуляционного измерителя с линейной подсветкой, использует-

ся промышленная камера, произведенная компанией Basler. В нашем случае нет необходимости в высокой частоте повторения кадров; главное – камера должна обеспечивать изображение кромки инструмента без «подвисаний», т. е. недопустима задержка кадра на дисплее. Для таких целей достаточно использовать камеру, которая давала бы 25 – 30 кадр/с.

Для этой цели выбрана промышленная КМОП-камера acA2500-14um – Basler ace. Для полноты картины приводим характеристику камеры:

- сенсор IMX264 компании Sony, его размер – $8,4 \times 7,1$ мм;
- затвор глобальный;
- разрешение (Д × Ш) – 2448×2048 пикселей, размер пикселя – $3,45 \times 3,45$ мкм;
- максимальная частота – 25 кадр/с;
- тип изображения – монохромный;
- тип крепления – C-mount;
- интерфейс подключения – USB 3.0.

Разработка и реализация программных интерфейсов и алгоритмов

Особенностью предлагаемой нами технологии является использование специального алгоритма обработки изображений. Данный алгоритм представляет собой пространственно-временной фильтр, моделирующий два основных зрительных канала человеческого глаза: фовеальное видение для детализированного цветного зрения и периферийное зрение для детектирования

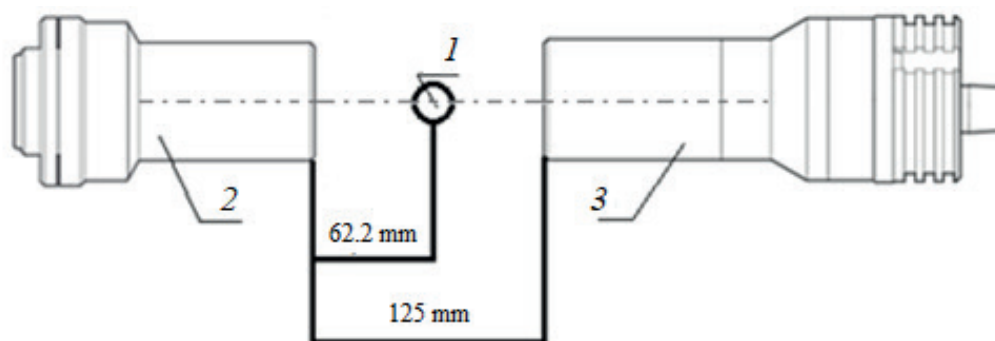


Рис. 2. Схема расположения компонентов оптической системы:
1 – объект измерения, 2 – бителецентрический объектив, 3 – модуль подсветки

быстрых процессов и событий [3].

Сетчатка глаза состоит из слоев взаимосвязанных клеток. Для построения алгоритмической модели человеческого зрения нами выделяется два основных слоя сетчатки: наружный плексиформный и внутренний плексиформный. Каждый из слоев моделируется специальными фильтрами. Выходные данные алгоритма моделируются внутренним плексиформным слоем.

Другим важным свойством алгоритма является способность к удалению пространственно-временного шума с одновременным увеличением детализации изображения. При этом моделируются работа фоторецепторов и процесс восприятия информации мозгом; повышается контрастность краев изображения, улучшаются контуры, реализуется логарифмический фильтр Габора. Разработанный алгоритм позволяет также повысить точность определения контура объекта до субпиксельных единиц.

На рис. 3 представлены изображения, демонстрирующие изменения четкости контура объекта. Например, размытость на краях объекта сильно понижена. Можно также заметить, что перепады интенсивности на элементах объекта практически отсутствуют. Для реализации взаимодействия оптического микрометра с персональным компьютером разработан алгоритм обмена данными. На физическом уровне взаимодействие предусмотрено по интерфейсу USB 3.0. Для построения логического уровня реализован набор функций, позволяющих подключать различные параметры оптического микрометра и управлять ими. Это время экспозиции, усиление,

область интереса, частота кадров. Чтобы получить изображение в режиме реального времени, мы применили функционал с использованием библиотек Pylon и OpenCV. Функции получения кадра и его передачи для дальнейшей обработки выполняются, в соответствии с нашими проектами, в отдельных потоках, что позволяет добиться высокого быстродействия при частоте 25 кадр/с.

Алгоритм также содержит функции для определения (с субпиксельной точностью) контуров режущей кромки инструмента на изображении, полученном с помощью оптического микрометра.

Указанное изображение обладает рядом особенностей, обусловленных применением телецентрической оптики:

минимально проявляются дифракционные эффекты на краях измеряемой кромки; размеры изображения объекта на матрице видеокamеры соответствуют реальным размерам объекта.

Таким образом, имея физический размер пикселя матрицы видеокamеры и количество пикселей, которое занимает контур инструмента, можно вычислять положение краев инструмента (в микрометрах) относительно оптической оси камеры. Такой подход обеспечивает определение положения краев инструмента с точностью до размера пикселя. В большинстве современных видеокamер применяются матрицы, размер пикселя в которых не превышает 3–4 мкм. Такое значение параметра не гарантирует определения требуемых размеров с микронной точностью.

Для более точного нахождения положения краев инструмента, нами разрабо-

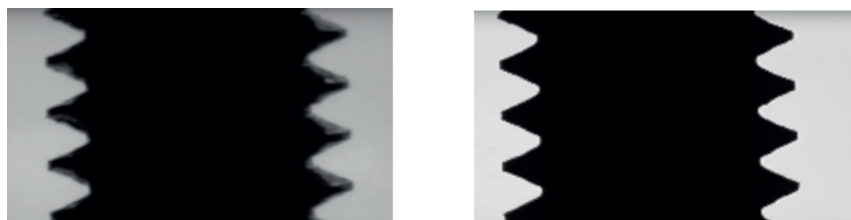


Рис. 3. Сравнение двух изображений объекта: *a* – исходное, *b* – обработанное алгоритмом по удалению пространственно-временного шума

тан алгоритм субпиксельного определения контуров его режущей кромки и используются возможности этого алгоритма.

Известны три основные группы методов для определения указанных контуров с субпиксельной точностью:

- аппроксимационные;
- основанные на вычислении моментов изображения;
- интерполяционные.

Методы первой группы используют непрерывные функции для подгонки функции изображения. Субпиксельное положение контура определяется как точка перегиба непрерывной функции.

Для второй группы методов используются статистические модели.

Методы третьей группы обеспечивают субпиксельную точность путем интерполяции данных изображения для получения более тонкой сетки пикселей [4].

Разработанный нами алгоритм относится к интерполяционным методам (третья группа).

Алгоритм состоит из следующих операций.

Шаг 1. Исходное изображение подвергается размытию по Гауссу.

Шаг 2. Применяется фильтр с ядром Кэнни раздельно для строк и столбцов; результаты записываются в соответствующие матрицы.

Шаг 3. Определяются точки контура с пиксельной точностью.

Шаг 4. Производится уточнение положения контуров с субпиксельной точностью на основе контуров, полученных на шаге 3, и матриц, записанных на шаге 2.

Субпиксельные координаты контуров вычисляются путем уточнения положения каждой из точек контура в его окрестности 3×3 . Затем определяются собственные векторы и собственные значения матрицы Гессе данной окрестности [5]. Благодаря этому, направление и величина смещения точки контура находятся относительно начальных. Таким образом, при смещении каждой точки контура на определенный вектор, находится субпиксельное значение позиции каждой точки контура.

Разработанная нами методика дает возможность получать искомые значения с точностью до 0,01 пикселя. Такая точность позволяет определять физические размеры измеряемого инструмента с погрешностью не хуже 0,5 мкм.

Геометрические параметры, такие как вылет и диаметр, вычисляются следующим образом. Анализируются субпиксельные координаты точек контура, и производится поиск минимальных и максимальных точек по координатам x и y . Точка с минимальным значением координаты x соответствует точке инструмента, максимально удаленной от оси, а точка с минимальной координатой y – точке инструмента с наибольшей высотой. Затем значения характеристических точек переводятся в мировую систему координат путем умножения значения координаты на размер пикселя в соответствующем направлении и на коэффициент увеличения.

Для получения максимально точных измерений, необходима прецизионная фокусировка изображения. Для ее контроля используется функция, с помощью которой вычисляется значение лапласиана изображения (он представляет собой суммированное значение производных второго порядка). Затем вычисляется среднеквадратическое отклонение для матрицы лапласиана – значение «фокусировки» изображения. Через оценку значения полученного параметра делается заключение о степени фокусировки изображения. В данном алгоритме предусмотрено пороговое значение параметра, разделяющее значения «фокусировки» на допустимые (при них можно выполнять измерения) и недопустимые (при них следует улучшить фокусировку) [6].

Помимо вышеописанного, реализован функционал калибровки системы по заданному шаблону. Разработка программного обеспечения производилась в среде Qt Creator с применением библиотек Qt и OpenCV.

При разработке функционального модуля программы применялась библиотека OpenCV 3.1.0, предназначенная для обработки изображений. Полученное с камеры изображение содержит информацию о контурах объекта. Данное изображение формируется при помощи телецентрической оптической схемы. Последняя обеспечивает возможность получения изображения практически без дифракции на границе объекта. Это свойство позволяет упростить задачу определения контура объекта для дальнейшего измерения.

С целью повышения контрастности применяется алгоритм, основанный на модели человеческого зрения. Далее про-

изводится определение контуров объекта с субпиксельной точностью. Если, например, увеличение объектива равно 1,005, то можно сделать заключение о размере контура на матрице видеокамеры. Он будет равен числу пикселей, которое занимает контур, умноженному на размер пикселя и на коэффициент увеличения.

Например, для вычисления размера контура по горизонтали X

$$X = dNp,$$

где d – коэффициент увеличения объектива; N – количество пикселей между краями контура; p , мкм, – ширина пикселя.

Для выполнения калибровки размера контура измеряется шаблонный объект с известными параметрами. Это дает возможность определять расположение оси вращения инструмента в системе координат матрицы камеры. В качестве шаблона можно использовать, например, конус.

Модуль калибровки позволяет определять положение точки с максимальным значением координаты Z (она соответствует оси вращения). Значение координаты X , соответствующее оси вращения, при выполнении калибровки принимается за нулевое. Другими словами, вершина конуса служит началом координат в системе XZ . Начальное значение координаты Z определяется как разность полученного значения высоты конуса минус фактическое значение высоты конуса (рис. 4, *a*).

Разработанный интерфейс пользователя

для режима измерения (рис. 4, *b*) содержит следующие области: просмотр изображений с оптического микрометра и ввод результатов измерений.

Заключение

Проведено целевое исследование, направленное на создание устройства и программно-аппаратной технологии, позволяющих быстро и точно измерять базовые параметры режущего инструмента. В ходе исследования получены следующие результаты.

1. Разработаны оптический микроскоп и оптическая схема к нему, включающая бителецентрическую оптику для формирования диодной подсветки и телецентрического объектива для захвата изображения. Разработанный оптический микроскоп обладает глубиной резкости объектива не более 1 мм (с формированием изображения без дифракционной картины).

Показано, что применение такой оптической схемы позволяет снизить влияние дифракционных эффектов на краях теневой картины и измерять в оптическом микроскопе такие параметры режущего инструмента, как вылет и диаметр.

2. Разработан алгоритм, детектирующий быстрые пространственно-временные процессы; он обеспечивает измерение контура режущей кромки инструмента с субпиксельной точностью (до 0,01 пикселя) и физических размеров режущего инструмента с точностью до 0,5 мкм.



Рис. 4. Пример интерфейсов пользователя в режимах калибровки (*a*) и измерения (*b*) размера контура режущей кромки инструмента.

В качестве шаблона использован конус

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демкин В.Н., Степанов В.А., Шадрин М.В. Системы быстрого прототипирования с лазерным сканированием // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 3 (177). С. 136–143.
2. Venediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov D.S., Tireshkin V.N. Measurement of wheel pair parameters of a rolling stock during movement // Proceedings of SPIE: The International Society For Optical Engineering. Vol. 05066. The International conference “Lasers for measurement and information transfer. St. Petersburg, Russia (2002)”. 2003. Pp. 48–53.
3. Benoit A., Caplier A., Durette B., Herault J. Using human visual system modeling for bio-inspired low level image processing // Computer Vision and Image Understanding. 2010. Vol. 114. No. 7. Pp. 758–773.
4. Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998. Vol. 20. No. 2. Pp. 113–125.
5. Shioiu, F.-J., Chen M.-J. Intermittent process hybrid measurement system on the machining center // International Journal of Production Research. 2003. Vol. 41. No. 18. Pp. 4403–4427.
6. García G.B., Suarez O.D., Aranda J.L.E., et al. Learning image processing with OpenCV. Birmingham: Packt Publishing, 2015. 319 p.
7. Benoit A., Caplier A. Fusing bio-inspired vision data for simplified high level scene interpretation: Application to face motion analysis // Computer Vision and Image Understanding. 2010. Vol. 114. No. 7. Pp. 774–789.
8. Grompone R., Randall G. A sub-pixel edge detector: An implementation of the Canny/Devernavy algorithm // Image Processing on Line. 2017. Vol. 7. Pp. 347–372.
9. Spontón H., Cardelino J. A review of classic edge detectors // Image Processing on Line. 2015. Vol. 5. Pp. 90–123.
10. Machilsen B., Wagemans J. Integration of contour and surface information in shape detection // Vision Research. 2011. Vol. 51. No. 1. Pp. 179–186.

Статья поступила в редакцию 20.03.2018, принята к публикации 05.12.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

САВИН Владислав Николаевич – инженер кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
savin-vladislav@mail.ru

СТЕПАНОВ Владимир Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
vl.stepanov@365.rsu.edu.ru

ШАДРИН Максим Владимирович – инженер кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
m.shadrin@kvantron.com

REFERENCES

- [1] V.N. Demkin, V.A. Stepanov, M.V. Shadrin, Rapid phototyping systems with laser scanning, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. (3(177)) (2013) 136 – 143.
- [2] V.N. Demkin, D.S. Dokov, A.Z. Venediktov, Measurement of wheel pair parameters of a rolling stock during movement, Proceedings of SPIE. 5066 (International conference “Lasers for measurement and information transfer”. St. Petersburg, Russia, 2002) (2003) 48 – 53.
- [3] A. Benoit, A. Caplier, B. Durette, J. Herault,

Using human visual system modeling for bio-inspired low level image processing, *Computer Vision and Image Understanding*. 114 (7) (2010) 758 – 773.

[4] **C. Steger**, An unbiased detector of curvilinear structures, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 20 (2) (1998) 113 – 125.

[5] **F.-J. Shioiu, M.-J. Chen**, Intermittent process hybrid measurement system on the machining center, *International Journal of Production Research*. 41 (18) (2003) 4403–4427.

[6] **G.B. Garcia, O.D. Suarez, J.L.E. Aranda, et al.** Learning image processing with OpenCV, Packt Publishing, Birmingham (2015) 183 – 193.

[7] **A. Benoit, A. Caplier**, Fusing bio-

inspired vision data for simplified high level scene interpretation: Application to face motion analysis, *Computer Vision and Image Understanding*. 114 (7) (2010) 774 – 789.

[8] **R. Grompone, G. Randall**, A sub-pixel edge detector: An implementation of the Canny/Devernavy algorithm, *Image Processing on Line*. 7 (2017) 347 – 372.

[9] **H. Spontón, J. Cardelino**, A review of classic edge detectors, *Image Processing on Line*. 5 (2015) 90 – 123.

[10] **B. Machilsen, J. Wagemans**, Integration of contour and surface information in shape detection, *Vision Research*. 51 (1) (2011) 179 – 186.

Received 20.03.2018, accepted 05.12.2018.

THE AUTHORS

SAVIN Vladislav N.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
46 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
savin-vladislav@mail.ru

STEPANOV Vladimir A.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
46 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
vl.stepanov@365.rsu.edu.ru

SHADRIN Maxim V.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
46 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
m.shadrin@kvantron.com