

УДК 621.391:681.142

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

СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ С ЛАЗЕРНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

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

Ryazan State University named S.A. Esenin,
46 Svobody St., Ryazan, 390000, Russia.

RAPID PROTOTYPING SYSTEMS WITH LASER SCANNING

В статье рассматривается влияние факторов, ограничивающих точность лазерных триангуляционных измерителей и особенности их применения в системах быстрого прототипирования. Особое внимание уделяется резкому изменению коэффициента отражения, влиянию наклона и теневых зон. Для улучшения точности сканирования и снижения факторов, ограничивающих возможности триангуляционных измерителей, предлагается новая ортогональная оптическая конструкция лазерного датчика.

ЛАЗЕРНАЯ ТРИАНГУЛЯЦИЯ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ, ЧПУ.

The article considers the influence of the factors limiting the accuracy of the laser triangulation measuring instruments and especially their applications in rapid prototyping. Particular attention is paid to an abrupt change of the reflection coefficient, the influence of slope and shadow areas. To improve scanning accuracy and reduce the factors that limit the possibilities of triangulation gauges, we propose a new orthogonal to the optical design of the laser sensor.

LASER TRIANGULATION, PROTOTYPING, CNC.

Одним из современных методов формообразования является быстрое прототипирование. В нем используются лазерные сканеры для создания компьютерной 3D-модели и станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Объединение их возможностей способствует созданию систем быстрого прототипирования, в которых элементом воздействия может быть фрезер, экструдер, лазер. Статья посвящена особенностям создания таких систем и исследованию факторов, ограничивающих достижение высокой точности копирования.

Для управления станком с ЧПУ необходимо применять только управляющую программу (УП). В настоящее время в России существует довольно много предприятий, создающие УП вручную с помощью обычного блокнота, или непосредственно на пульте УЧПУ (устройство числового программного управления). Для создания УП

требуется 3D-модель объекта, который необходимо изготовить. Компьютерная модель делается либо непосредственно в САМ, либо импортируется в нее в специальном формате, который хранит сведения о размерах объекта, полученных из других пакетов 3D-графики. Такой подход позволяет существенно упростить процесс подготовки УП на G-коде. Однако даже при наличии 3D-модели объекта сделать программу на G-коде для объекта, имеющего сложный рельеф, является трудоемкой задачей.

Создание компьютерных 3D-моделей требует наличия мощных и дорогостоящих программных пакетов для работы с 3D-графикой. Подготовка 3D-модели – это долгий процесс, требующий от специалиста высокой квалификации и большого опыта. Часто уже имеется объект реального мира, который необходимо внедрить в производство. Кроме того, в большинстве случаев

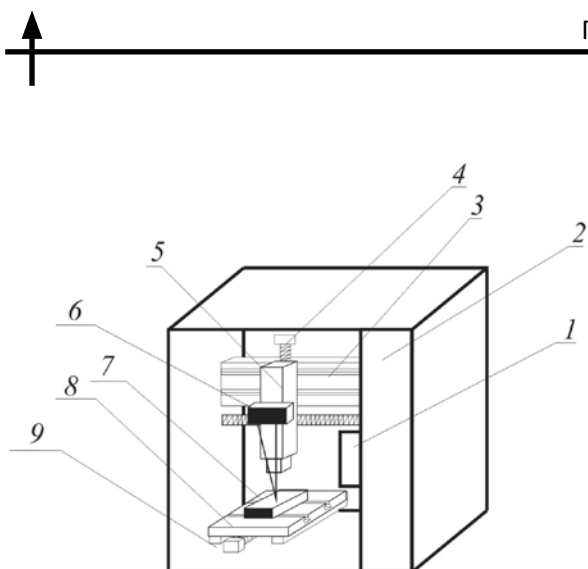


Рис. 1. Состав типичной системы прототипирования:

- 1 – устройство синхронизации сканера с приводами осей; 2 – блок управления осями приводов;
- 3, 9, 4 – оси X, Y, Z соответственно; 5 – рабочий орган станка; 6 – триангуляционный лазерный датчик; 7 – сканируемый объект; 8 – рабочий стол

мастеру проще создать одну реальную модель из мягкого материала и далее получить ее цифровую копию с помощью системы прототипирования, чем делать компьютерную 3D-модель. В общем случае стандартная система быстрого прототипирования (рис. 1) состоит из лазерного сканера, станка с ЧПУ или 3D-принтера, модуля синхронизации сканирования и компьютера, который управляет станком по управляющей программе, написанной на G-коде.

Одной из наиболее важных частей системы прототипирования является сканирующий модуль, который крепится к рабочему органу станка. Он формирует объемное облако точек сканируемого объекта, и каждая точка соответствует определенному замеру на поверхности этого объекта. Облако точек обрабатывается компьютером; результатом является трехмерная STL-модель, на основе которой разрабатывается УП. Время сканирования обычно составляет от нескольких минут до часа в зависимости от выбранного разрешения, области сканирования и технических характеристик применяемого сканера.

В настоящее время применяются как контактные, так и бесконтактные устройства сканирования. Контактные зонды обладают высокой точностью и повторяемо-

стью замеров. Однако невысокая скорость сканирования и наличие соприкасающихся частей сильно ограничивают использование данного метода. Среди оптических сканеров наибольшее распространение получили лазерные триангуляционные измерители, обладающие высокой скоростью сканирования и относительно большим диапазоном измерения. Данный метод основан на изменении положения δz изображения зондирующего лазерного пятна на фотосенсоре пропорционально удалению ΔZ объекта относительно триангуляционного измерителя (рис. 2). В простейшем случае прибор состоит из источника 3 когерентного (лазер) либо некогерентного (например, светоизлучающий диод) света, коллиматора 2, фокусирующего пучок на поверхность в виде пятна, линии или подсветки другой формы; объектива 4; фотосенсора 5 – линейки CCD/CMOS (для пятна) либо матрицы CCD/CMOS (для линии).

При этом точность вычисления расстояния до объекта зависит от размера светового зондирующего пятна и точности нахождения его центра. Оптический триангуляционный датчик работает с рассеянным отра-

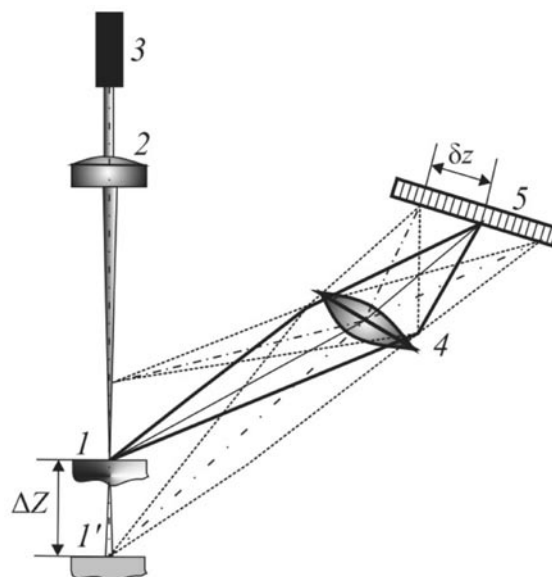


Рис. 2. Принцип оптической триангуляции: 1, 1' – сканируемый объект в двух возможных позициях: в центре рабочего диапазона триангуляционного измерителя (1) и на его краю (1'); 2 – коллиматор; 3 – источник когерентного либо некогерентного света; 4 – линза; 5 – фотосенсор

женным излучением, параметры и точность которого сильно зависят от характеристик поверхности, в том числе от величины шероховатости, ориентации следов механической обработки. Размер и форма распределения интенсивности пятна зондирующего лазерного излучения меняется в зависимости от шероховатости, отражающей способности поверхности, поляризации, наличия микротопологических неровностей, которые представляют собой множество беспорядочно ориентированных микрозеркал, а также при наклоне поверхности. Изменение формы пятна на разных поверхностях будет влиять на точность определения его центра (центроиды). В общем случае, чем меньше размер пятна, тем больше разрешение системы и точность нахождения центроиды, однако наблюдение слишком малого пятна уменьшает глубину резкости формируемого изображения и затрудняет работу алгоритмов поиска центра распределения отраженного импульса зондирующего излучения с субпиксельной точностью, в которых для интерполяции сигнала необходимо получить данные с нескольких пикселей.

Форма зондирующего пятна не всегда является круглой, и его изображение на фотоприемнике может быть асимметричным. Именно поэтому существующие алгоритмы поиска энергетического центра пятна (например, центр тяжести, медианный метод, аппроксимация функцией Гаусса и др.) показывают высокую точность только на поверхностях, дающих равномерное

распределение индикатрисы рассеяния в пространстве и, соответственно, практически идеальное Гауссово распределение интенсивности в изображении зондирующего пятна на фотосенсоре [1–3]. В реальности приходится измерять и сканировать объекты, имеющие сложную поверхность с острыми краями, гранями, ребрами, ступеньками. В результате оптический пучок, попадая, например, на острый край объекта, будет зарегистрирован фотосенсором не полностью, а с искажениями. На рис. 3, а–в показаны некоторые случаи деформации распределения интенсивности отраженного лазерного сигнала на фотосенсоре для сложного рельефа поверхности.

При попадании искаженного сигнала на фотосенсор распределение интенсивности его изображения будет несимметричным и может существенно отличаться от гауссиана. При построении 3D-модели с рельефом, аналогичным показанному на рис. 3, это будет проявляться в виде загибания (размытости) краев, резких выбросов, т. е. систематической погрешности в определении координат поверхности объекта. Повышение разрешающей способности камеры при данном типе ошибок приводит к более значительным искажениям распределения интенсивности на фотосенсоре в пиксельном выражении.

Еще одной причиной, ограничивающей применение триангуляционных систем, является несовпадение направления измеряемого отраженного сигнала с направлением

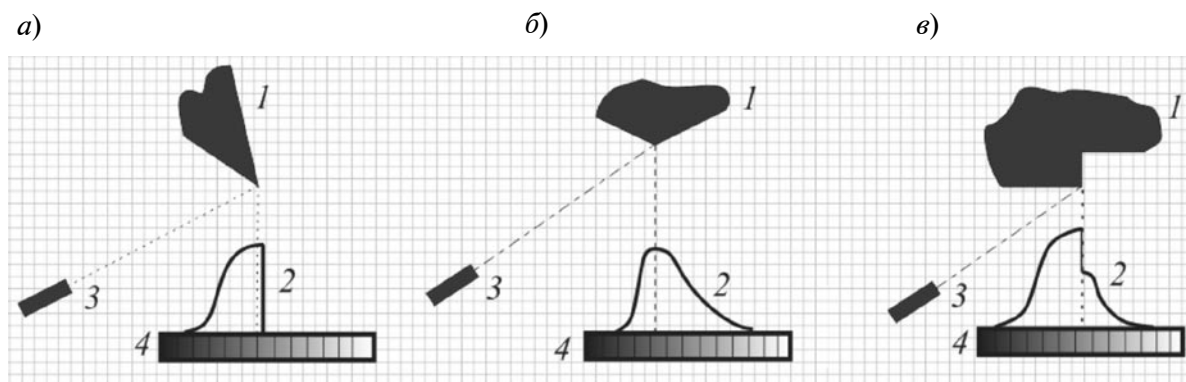


Рис. 3. Примеры влияния сложной поверхности объекта (1) на распределение (2) интенсивности отраженного излучения; 3, 4 – источник света и фотосенсор соответственно. Объекты имеют острый край (а), ребро (б), ступеньки (в)

зондирующего луча; это в свою очередь ведет к возникновению теневых эффектов. Теневые зоны могут возникать в двух случаях: во-первых, когда лазерное излучение не может достигнуть сканируемой зоны, во-вторых, когда отраженное лазерное излучение на пути к фотодетектору встречает препятствие. В этом случае происходит полная потеря информации о форме объекта [4].

Кроме того, причиной возникновения ошибки при сканировании и измерении реальных объектов является резкое изменение отражательной способности поверхности объекта в направлении сканирования. При неравномерном окрасе поверхности, ее высокой текстуризации или сканировании сложного рельефа происходит резкий локальный всплеск интенсивности (блик) из-за наличия большой зеркальной компоненты в отраженном импульсе либо переотражения от частей рельефа. При попадании зондирующего лазерного луча в зону с резким изменением коэффициента отражения происходит изменение формы распределения интенсивности отраженного сигнала на фотосенсоре, что приводит к ошибкам определения центроиды. Последняя смещается в сторону с большей отражательной способностью поверхности, что приводит к искажению формы компьютерной модели в месте резкого изменения коэффициента отражения.

Для определения величины ошибки, связанной с резким изменением коэффициента отражения при лазерном сканировании был проведен эксперимент, позволяющий оценить погрешность, вызванную этим явлением. В поле сканирования помещался специальный плоский цветной шаблон, состоящий из смежных полос с разным коэффициентом отражения, представляющих собой участки поверхности разных цветов. Сканирование проводилось вдоль и поперек шаблона. При этом сохранялся принцип эквидистантности. В зоне смены цвета поверхности наблюдалось резкое изменение высоты профиля на компьютерной 3D-модели, которое проходило по всей границе участков различного окраса поверхности. Величина погрешно-

сти при этом была сопоставима с таковой при сканировании сложных поверхностей. Однако если в первом случае проблему можно решить, используя фильтрацию, то во втором случае такая мера не приводит к положительному результату. Максимальная абсолютная погрешность составила примерно 55–60 мкм для цветов с сильно отличающимся коэффициентом отражения (рис. 4). Таким образом, перечисленные неблагоприятные свойства объектов сильно влияют на качество получаемой трехмерной модели.

По результатам проведенных экспериментов все цвета объектов можно разделить по признаку их отражательной способности на две основные группы: с невысоким и высоким коэффициентами отражения. К первой группе следует отнести фиолетовый, синий, зеленый и голубой цвета, ко второй – белый, желтый, красный и оранжевый. При смежном положении цветов в своей группе погрешность минимальна и почти не различима глазом на компьютерной модели. С такими погрешностями эффективно справляются обычные алгоритмы фильтрации.

Погрешность измерения также зависит от типа зондирующего излучения. В качестве излучающего элемента в триангуляционных сканерах применяется лазер или светодиод. Преимущества лазерного излучения заключаются в высокой монохроматичности,

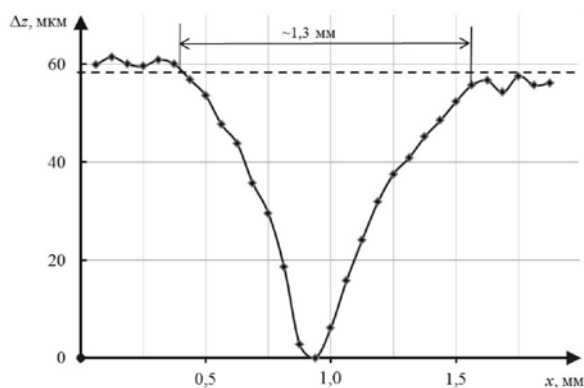


Рис. 4. Изменение высоты 3D-модели плоского цветного шаблона в зоне сканирования вследствие резкого изменения цвета. Пунктиром показан реальный уровень поверхности измеряемого объекта

малой расходимости пучка и высокой контрастности. Однако пространственная когерентность лазерного излучения становится причиной возникновения спекл-картины, которая вносит существенную погрешность в определение центра изображения лазерного пятна [5]. Для уменьшения контраста спеклов используются разные приемы, например, берется пучок не круглой, а вытянутой формы, или применяются алгоритмы, учитывающие корреляционные связи между разными реализациями спеклов. Данные методы не дают существенных результатов. Наибольшие успехи в разрушении пространственной когерентности лазерного излучения достигаются при использовании диозеров [6, 7] и модулей разрушения пространственной когерентности на основе движущихся диффузных пластин, например Optotune LSR-3000 [8]. Светодиодные излучатели не позволяют достичь большого рабочего диапазона, так как глубина резкости фокусируемого излучения мала. Следовательно, сканеры на основе светодиодов нельзя использовать для объектов, имеющих большой диапазон по глубине. Однако большим преимуществом светодиодов является полное отсутствие пространственной когерентности; в связи с этим нет необходимости в применении дорогостоящих модулей для ее разрушения. Кроме того, пространственное разрешение сканирования прямо пропорционально зависит от диапазона измерения: чем больше диапазон измерения, тем меньше разрешение всей системы. Поэтому при выборе типа зондирующего излучения необходимо учитывать требуемые параметры по размеру сканируемых предметов.

Недостатки триангуляционного метода измерения геометрии объекта налагают ряд ограничений на свойства этих объектов в отношении сканирования. При оцифровке или измерении промышленной детали, имеющей сложную форму или анизотропную поверхность со следами промышленной обработки, полученная модель может потребовать достаточно долгой и кропотливой доработки с использованием дорогостоящих специализированных программных пакетов, например Geomagic или Rapid XOR. При этом получение хорошего результата

не может быть гарантировано.

Для борьбы с факторами, искажающими истинную форму Гауссова сигнала на фотосенсоре, была разработана и запатентована новая оптическая конструкция датчика (рис. 5), которая позволяет получать высококачественные изображения сканируемой области, учитывающие влияние бликов, засветок и «слепых зон» [9]. Отсутствие необходимости использовать дорогостоящее программное обеспечение для дополнительной обработки полученных компьютерных моделей, а также возможность применения более дешевых оптических и электронных компонентов благодаря новой конструкции оптической части датчика, позволяет снизить конечную стоимость готовой системы в несколько раз без ухудшения точностных и потребительских характеристик.

Предложенное техническое решение обладает рядом преимуществ по сравнению со сканерами, которые имеют два канала измерения [10–12], расположенных на одной линии, симметрично по отношению к лазерному источнику. В этих измерителях оба канала измерения принадлежат одной плоскости триангуляции. Отраженный зондирующий пучок одновременно регистри-

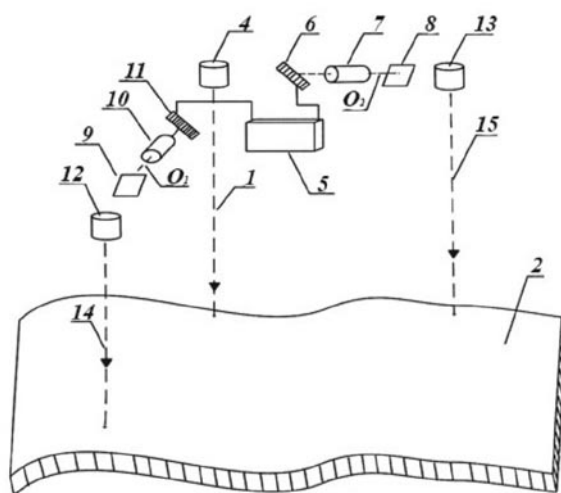


Рис. 5. Оптическая схема ортогонального триангуляционного датчика:

- 1 – направление излучения лазерного источника 4;
- 14, 15 – направления излучения лазерных маркеров
- 12, 13; 2 – поверхность сканируемого объекта;
- 5 – микропроцессор; 7, 10 – объективы O_1 и O_2 ;
- 8, 9 – зеркала; 6, 11 – фотосенсоры

руется обоими фотосенсорами. При этом практически невозможно отделить истинный сигнал от ложного без сложной программной обработки. Описанный способ позволяет произвести простое усреднение обоих сигналов.

Разработанный метод и созданное устройство позволяют уменьшить влияние теневых эффектов при сканировании объектов со сложной поверхностью и эффективно отделять истинные сигналы от ложных, используя ортогонально расположенные фотосенсоры. Устройство позволяет эффективно бороться с теневыми эффектами, так как при сканировании ряда поверхностей (например, металлических) индикатриса рассеяния искажается преимущественно в одной плоскости, а вероятность присутствия ложного сигнала на обоих фотосенсорах оказывается незначительной. Каждый измерительный канал (см. рис. 5) состоит из объектива 7, 10, снабженного зеркалом 8, 9, и фотосенсора 6, 11. Плоскости триангуляции ортогональны друг другу. Таким образом, объемные лепестки бликов и переотражений будут присутствовать только на одном фотосенсоре и с большой степенью вероятности отсутствовать на втором. Видеосигнал с двух приемных каналов обрабатывается микропроцессором 5 и передается на компьютер.

Наклон измеряемой поверхности также оказывает влияние на точность измерений. Это связано с двумя причинами [13, 14]:

при наклоне поверхности изменяется распределение интенсивности сигнала, регистрируемое фотоприемником;

происходит смещение координат центра пятна на поверхности приемника.

При угле наклона поверхности менее 30° погрешность измерения составляет 20 мкм, а при наклоне более 60° — достигает 60 мкм [15]. Наличие двух лазерных маркеров 12, 13 (по одному в каждой плоскости триангуляции, излучение 14, 15 которых параллельно пучку лазерного зондирующего источника 4) дает возможность измерять локальный наклон в точке зондирования по координатам X и Y , что позволяет эффективно корректировать искажение пятна зондирующего луча на поверхности из-за наклона или радиуса. В поле зрения каждой камеры находятся два лазерных пятна (от зондирующего луча и маркера), изображения которых расположены на известном расстоянии друг от друга, при нулевом наклоне плоской поверхности. Для калибровки прибор помещается над специальным столом, который способен перемещать по вертикальной оси и менять угол наклона шаблона. Калибровка прибора происходит по всему рабочему диапазону для нескольких углов наклона. При сканировании шаблона, расположенного под наклоном, происходит смещение изображений зондирующего и маркерного пятна друг относительно друга. На основе этого строятся калибровочные кривые, которые позволяют при сканировании практически полностью компенсировать влияние наклона. По краям рабочего диапазона максимальная погрешность измерения составила 12 мкм.

На рис. 6, а показан результат сканирования триангуляционным датчиком со стандартной оптической схемой, а на рис. 6, б — 3D-модель, полученная с использованием ортогонального триангуляционного датчика.

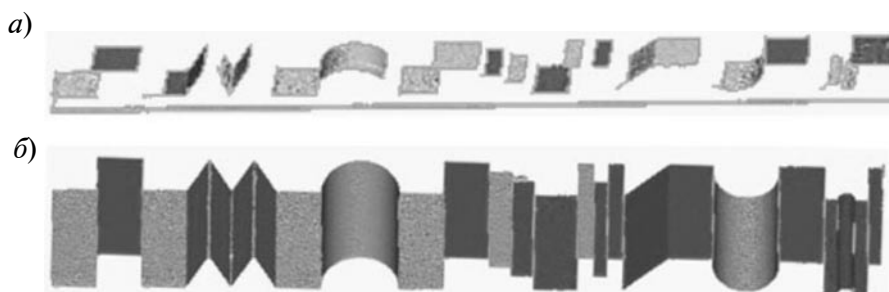


Рис. 6. Сравнение компьютерных моделей калибра, отсканированных обычным триангуляционным датчиком (а) и с помощью ортогонального триангуляционного датчика (б)

Таким образом, проведенные исследования дают возможность создавать современные системы быстрого прототипирования с применением триангуляционных датчиков, способных с высокой точностью копировать предметы реального мира.

Применение технологии лазерного прототипирования с использованием триангуляционных датчиков возможно во многих сферах. Модели, полученные методом лазерного прототипирования, можно использовать в компьютерной анимации совместно со станком ЧПУ,

3D-принтером или системой лазерного спекания и плавления (SLS/SLM). Потребителями данных систем могут быть мебельная, ювелирная, медицинская, автомобильная и военная промышленность. Разработанная оптическая схема триангуляционного датчика с ортогональным расположением сенсоров позволяет работать со сложными промышленными объектами. Полученные цифровые копии не требуют практически никаких доработок в специальных пакетах для работы с облаком точек и 3D-моделями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плотников, С.В.** Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных системах [Текст]/ С.В. Плотников // Автотриметрия. – 1995. – № 6. – С. 58–63.
2. **Демкин, В.Н.** Лазерные методы и средства контроля геометрических размеров изделий [Текст]/ В.Н. Демкин, В.А. Степанов // Измерительная техника. – 2008. – № 2. – С. 32–35.
3. **Демкин, В.Н.** Возможности триангуляционного лазерного метода измерения поверхности сложного рельефа [Текст]/ В.Н. Демкин, В.А. Степанов // Метрология. – 2007. – № 8. – С. 32–35.
4. **Демкин, В.Н.** Измерение профиля шероховатости материалов триангуляционным способом [Текст]/ В.Н. Демкин, В.А. Степанов// Метрология. – 2008. – № 6. – С. 60–65.
5. **Hausler, G.** Three-dimensional sensors – potentials and limitations [Text]: Handbook of Computer Vision and Application. Vol. 1 /G. Hausler. – San Diego: Academic Press, 1999. – P. 485–506.
6. **Crags, G.** Low speckle line generator using a semiconductor laser source [Text]/ G. Crags, Y. Meuret// Proc. SPIE 8433 Laser Sources and Applications. – Bellingham, Washington: Published by SPIE, 1 June, 2012, – 8433OM.
7. **Crags, G.** Characterization of a low-speckle laser line generator [Text]/ G. Crags, Y. Meuret // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51.–P. 4818–4826.
8. **Blum, M.** Reducing laser speckle [Text]/ M. Blum // Laser + Photonics – 2011. – Vol. 3. –P. 62–63.
9. **Пат. Российская Федерация МПК⁷ G 01 B 11/24.** Устройство для лазерного сканирования [Текст]/ Демкин В.Н., Демкин А.В.,

- Шадрин М.В.; заявители и патентообладатели В.Н. Демкин, А.В. Демкин, М.В. Шадрин. – 2012110279/28; заявл. 16.03.2012; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32, 2012. – 285 с.: илл.
10. **Trucco, E.** Acquisition of consistent range data using local calibration [Text]/ E. Trucco, R.B. Fisher // Proceeding IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. – San Diego, California: IEEE Computer Society Press, 1994. – P. 3410–3415.
11. **Buzinsky, M.** Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation [Text] / M. Buzinsky, A. Levine, W.H. Stevenson// IEEE/AESS National Aerospace and Electronics Conference Proc., 1992. – P. 1230–1236.
12. **Kooijman, K.S.** Video rate laser scanner: Considerations on triangulation optics, detectors and processing circuits [Text]/ K.S. Kooijman, J.L. Horijon //Optics, Illumination, and Imaging Sensing for machine Vision VIII, Proc. SPIE. – 1993. – Vol. 2065. – P. 251–263.
13. **Вертопрахов, В.В.** Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений / В.В. Вертопрахов // Автотриметрия. – 1995. – № 6. – С. 64–68.
14. **Wang, Sh.-Q.** New principle formula of optical triangulation displacement measurement based on light scattering from rough surface [Text]/ Sh.-Q. Wang, B.H. Zhuang, W. Zhang // Proc. SPIE.–1997. – Vol. 2909. – P. 37–42.
15. **Shiou, F.-J.** Intermittent process hybrid measurement system on the machining centre [Text]/ F.-J. Shiou, M.-J. Chen// International Journal of Production Research. – 2003. – Vol. 41. – P. 4403–4427.

REFERENCES

1. **Plotnikov S.V.** Sravnenie metodov obrabotki signalov v trianguljacionnyh sistemah. Avtometrija, 1995, No. 6, pp. 58–63. (rus)

2. **Demkin V.N., Stepanov V.A.** Lazernye metody i sredstva kontrolja geometricheskikh razmerov izdelij. Izmeritel'naja tehnika, 2008, No. 2, pp. 32–35. (rus)

3. **Demkin V.N., Stepanov V.A.** Vozможности trianguljacionnogo lazernogo metoda izmerenija poverhnosti slozhnogo rel'efa. Metrologija, 2007, № 8, pp. 32–35. (rus)
4. **Demkin V.N., Stepanov V.A.** Izmerenie profilja sherohovatosti materialov trianguljacionnym sposobom. Metrologija, 2008, № 6, pp. 60–65. (rus)
5. **Hausler G.** Three-dimensional sensors – potentials and limitations : Handbook of Computer Vision and Application. Vol. 1. San Diego: Academic Press, 1999, pp. 485–506. (rus)
6. **Crags G., Meuret Y.** Low speckle line generator using a semiconductor laser source. Proc. SPIE 8433 Laser Sources and Applications, Bellingham, Washington: Published by SPIE, 1 June, 2012, 8433OM.
7. **Crags G., Meuret Y.** Characterization of a low-speckle laser line generator. Applied Optics, 2012, Vol. 51, pp. 4818–4826.
8. **Blum M.** Reducing laser speckle. Laser + Photonics, 2011, Vol. 3, pp. 62–63.
9. **Demkin V.N., Demkin A.V., Shadrin M.V.** Ustrojstvo dlja lazernogo skanirovanija. Patent RF, № 122167, 2012. (rus)
10. **Trucco E., Fisher R.B.** Acquisition of consistent range data using local calibration. Proceeding IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. – San Diego, California: IEEE Computer Society Press, 1994, pp. 3410–3415.
11. **Buzinsky M., Levine A., Stevenson W.H.** Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation. IEEE/AESS National Aerospace and Electronics Conference Proc., 1992, pp. 1230–1236.
12. **Kooijman K.S., Horijon J.L.** Video rate laser scanner: Considerations on triangulation optics, detectors and processing circuits. Optics, Illumination, and Imaging Sensing for machine Vision VIII, Proc. SPIE, 1993, Vol. 2065, pp. 251–263.
13. **Vertoprahov V.V.** Vlijanie formy ob'ekta i orientacii ego poverhnosti na tochnost' lazernyh trianguljacionnyh izmerenij. Avtometrija, 1995, № 6, pp. 64–68. (rus)
14. **Wang Sh.-Q. et al.** New principle formula of optical triangulation displacement measurement based on light scattering from rough surface. Proc. SPIE, 1997, Vol. 2909, pp. 37–42.
15. **Shiou F.-J., Chen M.-J.** Intermittent process hybrid measurement system on the machining centre. International Journal of Production Research, 2003, Vol. 41, pp. 4403–4427.

ДЕМКИН Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры общей, теоретической физики и методов преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина.

390027, г. Рязань, ул. Свободы, 46
demkin@snrg.ru

СТЕПАНОВ Владимир Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей, теоретической физики и методов преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина.

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

ШАДРИН Максим Владимирович – аспирант кафедры общей, теоретической физики и методов преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина.

390026, г. Рязань, ул. Свободы, 46
m.shadrin@russia.ru