УДК 531.717.81 : 514.8 : 51-74
DOI: 10.15827/0236-235X.121.064-071

Дата подачи статьи: 12.12.17
2018. Т. 31. № 1. С. 064–071

КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО КРУГЛОМЕРА

В.Н. Белопухов¹, к.т.н., старший научный сотрудник, *bvnsam50@gmail.com*

О.А. Заякин², к.т.н., доцент, *oleg_zayakin@inbox.ru*

А.В. Манухин², магистрант, *manuxin.alexander@yandex.ru*

А.А. Ростов², магистрант, *rostovchik512@mail.ru*

¹ Институт проблем управления сложными системами РАН,
ул. Садовая, 61, г. Самара, 443020, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет,
Московское шоссе, 34, г. Самара, 443086, Россия

Настоящая работа посвящена комплексу программных средств, созданному для помощи в исследовании нового способа измерений отклонений от круглости. Одной из важных целей исследования является изучение основной погрешности измерений данным способом.

Лабораторный макет прибора, реализующего этот способ, был разработан в Самарском филиале Физического института РАН. Сейчас он используется в Самарском университете в учебном процессе. Там же продолжается его доводка. Принцип действия кругломера заключается в том, что контролируемая поверхность сканируется сфокусированным пучком лазера и определяется положение зеркально отраженного лазерного пучка (пат. России 2109250).

Практического приложение – контроль отклонений формы дорожки качения внутреннего кольца подшипника.

Функции исследовательского комплекса программных средств: получение данных предобработки из внешних файлов, расчет радиального профиля, отклонения от круглости и волнистости после однократного сканирования, статистический анализ результатов этих измерений по серии повторных сканирований и оценка погрешности координатных измерений в каждой точке профиля.

Согласно предварительным результатам и анализу серии измерений, оценка их основной погрешности – 0,07 мкм для отклонений от круглости и 0,05 мкм для волнистости, если не учитывать погрешность кинематики при сканировании.

Эти результаты хорошо совпадают с результатами, которые показывают применяемые сейчас приборы, такие как интерферометры и контактные кругломеры, в рассматриваемом практическом приложении. Погрешности измерений в основном вызваны кинематическими погрешностями в процессе работы узла поворота контролируемого изделия. Сделан вывод о том, что лабораторный макет прибора все же нуждается в усовершенствовании и что его метрологические характеристики могут быть улучшены. Учитывая недостаток финансирования разработки, предложено сбор и предварительную обработку данных проводить там, где для этого есть возможность, а дальнейшие вычисления выполнять в облаке.

Ключевые слова: измерение геометрических величин, триангуляция, трехмерный сканер, круглость, волнистость, кольцо подшипника, математическая модель, статистическая обработка данных, облачные вычисления, дефлектометрия.

В настоящее время повышение качества сложных изделий машиностроения до мирового уровня – актуальная для России задача.

В данной работе авторы исследуют один из многочисленных факторов, влияющих на качество изделий, – отклонение формы рабочих поверхностей деталей подшипников. Перспективными для задачи повышения качества являются когерентно-оптические методы контроля. Однако до настоящего времени все усилия в данном направлении, как и в направлениях, относящихся к другим альтернативным методам неразрушающего контроля, не привели к желаемым результатам, прежде всего к увеличению производства качественных деталей, узлов и готовых изделий при приемлемых затратах. Это обусловило снижение интереса инвесторов и, как следствие, недостаток средств для проведения дальнейших НИОКР по данным темам.

Для решения проблемы предлагается использовать способ триангуляции на основе зеркально от-

раженного лазерного пучка света [1]. Узкий пучок света фокусируется на контролируемую поверхность и сканирует ее (рис. 1). В процессе сканирования зеркально отраженный от этой поверхности пучок света фотографируется матрицей. По положению центра пятна света на фотоприемнике и его изменению в процессе сканирования определяется профиль контролируемой поверхности при условии, что взаимное расположение сканирующего пучка света, выходящего из источника излучения, и контролируемой детали задаются или определяются в сканере каким-либо другим известным способом.

Публикации о полных аналогах прибора, реализующих подобный данной разработке функционал, авторами пока не были обнаружены.

Одна из групп косвенных аналогов – контактные кругломеры [2–5]. Они давно используются и до настоящего времени доминируют на рынке и на производстве, однако имеют недостатки, обуслов-

ленные контактным принципом. Трение от механического контакта с измерительной иглой ограничивает скорость сканирования, изнашивает измерительный наконечник и портит контролируемую поверхность (при большой, более 100, по крайней мере, серии однотипных измерений), несмотря на относительно малое контактное усилие – до 0,001 Н.

Другая группа косвенных аналогов – лазерные приборы на основе интерференционных методов (см. [6–9]). Они считаются традиционной альтернативой контактным кругломерам, но до сих пор так и не вытеснили контактные приборы из рассматриваемой предметной области. Их недостатки: большая чувствительность к помехам (шумы и вибрации) или сложность и дороговизна защиты от этих помех по сравнению с контактными кругломерами. Если сравнить их с описываемой разработкой, то они имеют большую сложность входного оптического сигнала, большую сложность и дороговизну оптической схемы, более строгие требования к источникам излучения (лазерам). Некоторые разработки имеют недостаточный максимальный рабочий диапазон измерений [10].

Обычные триангуляторы [11] обладают неудовлетворительной чувствительностью (порядка длины волны света 0,5 мкм, а нужно 0,05 мкм), поэтому для рассматриваемой задачи не применяются. К их числу отнесем и приборы, реализующие метод светового сечения и метод структурирован-

ного освещения, поскольку в их основе лежит все тот же принцип триангуляции. Важно, что физический метод, на основе которого они работают, является родственным используемому авторами физическому методу. Можно даже считать, что используемый метод – одна из разновидностей триангуляции. Поэтому данные приборы заслуживают внимания авторов, в частности, результаты их работ и исследований.

Для рассматриваемой задачи разработки на основе зеркальной триангуляции (метода, использованного в данной работе) пока не применялись [12–14]. Все они являются частичными аналогами, точнее, в них использован тот же физический принцип. Оказалось, что все те способы и устройства данного типа, сведения о которых авторам удалось найти, не обладают необходимой функциональностью. Они или не имеют функции преобразования [12], или определяют только параметры формы, например, диаметр или радиус кривизны [13], или требуют перемещений фотоприемника при сканировании контролируемой поверхности [14], что не позволяет достичь требуемой точности.

Для используемого в рассматриваемой задаче физического метода характерна большая чувствительность, чем для обычной триангуляции. Можно найти его сходство с датчиками Шака–Гармана [15], чувствительность которых достигает показателей интерферометров: так, их лучшие образцы имеют чувствительность до 0,001 длины волны. Его можно также отнести к методам дефлектометрии.

Ранее авторами в Самарском филиале Физического института РАН был создан лабораторный макет экспериментального лазерного кругломера [16]. Однако для его исследования требовался специализированный программный комплекс, который по сравнению с программными модулями прибора обладал бы более широкой функциональностью. Так, требовалось проводить высокоавтоматизированную статистическую обработку данных, полученных разработанным прибором после целой серии однотипных измерений. Таким образом, актуальным стало создание комплекса программных средств для исследования погрешности измерений прибора.

Модель системы

Исследование контролируемой поверхности ведется пучком света – одним лучом с нулевой поперечной шириной. Физической основой данной системы являются законы геометрической оптики. В оптической однородной среде свет распространяется прямолинейно. Это позволяет использовать прямые линии для анализа его распространения. Учет ширины пучка приводит к искажению формы светового пятна. Влияние этого фактора должно

исследоваться экспериментально. На рисунке 2 представлена оптико-механическая схема прибора [16]. Падающий на поверхность луч $\vec{a}$ перпендикулярен плоскости YOZ и зеркально отражается относительно вектора нормали $\vec{N}$. Отраженный луч $\vec{b}$ фиксируется матричным фотоприемником. На основании законов геометрической оптики углы между нормалью и этими лучами света равны между собой, и к тому же все три луча лежат в одной плоскости. Это описывается системой векторных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{-\vec{a} \times \vec{N}}{|\vec{a}|} = \frac{\vec{N} \times \vec{b}}{|\vec{b}|}, \\ \frac{(\vec{a} \cdot \vec{N})}{|\vec{a}|} = \frac{(\vec{b} \cdot \vec{N})}{|\vec{b}|}. \end{cases} \quad (1)$$

Информативные параметры должны содержать исчерпывающие сведения о положении пятна света на матричном фотоприемнике. Оно измеряется в сферической системе координат с центром на оси OZ , там, где эту ось пересекает горизонтальная плоскость, в которой лежит падающий луч. Горизонтальный угол ψ отсчитывается от оси OX (рис. 2), а вертикальный угол θ – от указанной горизонтальной плоскости. Сканирование поверхности контролируемого объекта производится путем его разворота вдоль оси OZ и дискретного перемещения источника света на величину шага по прямой AB в точках с координатами $z_k = z_{k-1} + \Delta z$. Данные действия позволяют из векторных уравнений (1) получить математическую модель автоматизированной системы (кругломера):

$$\begin{cases} F_y \cdot b_z - F_z \cdot b_y = 0, \\ \frac{F_x \cdot b_z - F_z \cdot b_x}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_z = 0, \\ \frac{F_x \cdot b_y - F_y \cdot b_x}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_y = 0, \\ \frac{F_x \cdot b_x + F_y \cdot b_y + F_z \cdot b_z}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} - F_x = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где F – уравнение, задающее в неявном виде контролируемую поверхность, оно имеет вид $F = 0$; индексы при переменных означают частные производные по соответствующим координатам. Отметим, что вектор с компонентами (то есть проекциями на оси координат) F_x, F_y, F_z задает вектор нормали $\vec{N}$ к контролируемой поверхности в точке падения лазерного пучка.

При решении системы уравнений (2) необходимо осуществить переход в цилиндрическую систему координат с центром в точке O и осью OZ (рис. 2).

Рис. 2. Оптико-механическая схема прибора:
а) – общий вид; б) – вид снизу; 1 – источник излучения; 2 – контролируемая поверхность; 3 – видекамера; AB, C – направления сканирования; $\vec{a}$ – падающий и $\vec{b}$ – отраженный лучи света; ψ, ξ – координаты точки падения отраженного луча на фотоприемник; d – смещение источника излучения; L – радиус поворота каретки с видекамерой; φ – азимутальная координата освещенной точки поверхности 2 в системе координат, жестко связанной с этой поверхностью; φ_R – угол поворота поверхности 2; φ_c – азимутальная координата освещенной точки поверхности 2 в системе координат, связанной со сканером

Fig. 2. An optical-mechanical scheme of the device

Координата φ_c во время сканирования радиального профиля, которое производится путем поворота поверхности 2 при неподвижных других элементах сканера, слегка колеблется вокруг своей средней величины. Координаты φ и φ_R монотонно изменяются от нуля или какой-либо начальной величины на 2π радиан или на -2π радиан, как показано на рисунке 2.

Решение системы (2) может быть получено в форме дифференциального уравнения вида

$$\frac{d\rho_c}{d\varphi_c} = \rho_c \cdot \Phi(\rho_c, \varphi_R, z_R), \quad (3)$$

где z_R – смещение источника излучения 1; ρ_c – соответствует точке на поверхности 2 с координатой φ_c (пояснения к остальным обозначениям см. на рисунке 2).

При линейаризации правой части исходного дифференциального уравнения (3) в области средних значений ее аргументов приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{1}{R_0} \cdot \left(\frac{dH}{d\varphi} - a \cdot H \right) = b \cdot \varepsilon + c \cdot \gamma, \quad (4)$$

где a , b , c получены из правой части исходного дифференциального уравнения; H – высота профиля относительно окружности с радиусом R_0 ; $\varepsilon = \psi - \bar{\psi}$; $\gamma = \theta - \bar{\theta}$. Индекс 0, а также черта означают среднее интегральное значение по радиальному профилю. Функции H , ε , γ имеют аргумент φ – азимутальную координату точки на радиальном профиле контролируемой поверхности.

В свою очередь, линейаризованное дифференциальное уравнение (4) решается с помощью дискретного преобразования Фурье и решением является алгебраическая связь между гармониками Фурье-спектра профиля H одинаковой пространственной частоты и правой частью дифференциального уравнения.

Правая часть уравнения записывается в виде ряда Фурье:

$$W(\varphi_i) = \sum_{j=1}^{[N/2]} \alpha_j \cdot \cos(j \cdot \varphi_i) + \beta_j \cdot \sin(j \cdot \varphi_i). \quad (5)$$

Коэффициенты данного ряда (5) вычисляются по формулам:

$$\alpha_j = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \cdot \cos(j \cdot \varphi_i), \quad (6)$$

$$\beta_j = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} W(\varphi_i) \cdot \sin(j \cdot \varphi_i), \quad (7)$$

$$\alpha_{N/2} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i \cdot W(\varphi_i). \quad (8)$$

Итак, удалось найти связь между параметрами гармоник Фурье-спектра функций ε и γ соответствующей гамоники Фурье-спектра высот H .

Структура и функционал комплекса

Входной сигнал в программном комплексе – это файл, в котором в символьных кодах записаны зависимости $\varepsilon(\varphi)$ и $\gamma(\varphi)$ для радиального профиля контролируемой поверхности, а также параметры настройки оптической схемы и дискретность сканирования по φ и z . Комплекс обрабатывает сразу

целую серию таких файлов, полученных при повторных измерениях, для каждого из файлов рассчитывает $H(\varphi)$ и статистические параметры отклонений от круглости, включая границы доверительного интервала, попутно оценивая вероятность принадлежности выборки к нормальному закону распределения. Кроме того, оценивается и погрешность в каждом отсчете радиального профиля $H(\varphi)$ при условии, что серия измерений выполнена при одинаковом начальном положении контролируемой детали и координате z .

На рисунке 3 представлена диаграмма вариантов использования автоматизированной системы.

Автоматизированная система разработана на языке высокого уровня Java в среде NetBeans, версия 6.0.

Экспериментальные результаты

Лабораторный макет прибора (рис. 4) был создан в Самарском филиале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. О его технических характеристиках сообщалось на конференции «Высокие технологии в машиностроении» в Санкт-Петербурге в 2008 году.

Предварительные результаты серии измерений с целью оценки их основной погрешности приве-

дены в [17]. Отметим, что при этом прибор обеспечивал дискретность показаний с радиального профиля 600 отсчетов при контроле желоба внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201. В этих измерениях в источнике излучения в приборе использовался полупроводниковый лазер ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 0,78 мкм. Диаметр диафрагмы, ограничивающей параллельный коллимированный пучок лазера, составлял 3 мм, в пределах ее апертуры распределение мощности пучка лазера было близким к равномерному.

На рисунках 5 и 6 приведены результаты серии 200 измерений с внутреннего кольца шарикоподшипника типа 201. Диаметр радиального профиля в районе дна желоба составлял 16,68 мм, радиус желоба в осевой плоскости – 2,86 мм. Параметры настройки оптической схемы кругломера были такие: $d = 7$ мм, $L = 35$ мм. Каждое измерение из серии начиналось практически с одной и той же точки радиального профиля. Это обеспечивалось одинаковым угловым положением контролируемой детали в сканере. Здесь приведены результаты измерений волнистости, то есть фильтр пространственных частот радиального профиля имел границы с 16 по 150 включительно.

В данной статье приведены наиболее качественные результаты, которые были получены с остановленной детали при сканировании. То есть кольцо не вращалось, а все 200 фотографий при съеме данных делались с одной и той же освещенной точки кольца. При этом практически исключалась погрешность, связанная с кинематикой и механическими вибрациями и шумами сканера. Оставались только оптические, электронные шумы и внешние факторы. Фактически получался эмулятор радиального профиля. Отклонение от круглости в идеале было бы равно нулю. Эти эксперименты показывали нижний достижимый предел погрешности измерений кругломера.

Получены следующие результаты для волнистости (мкм): математическое ожидание – 0,0345, СКО – 0,005, доверительный интервал – 0,015, пределы доверительного интервала – от 0,018 до 0,050.

Обсуждение

По результатам статистического анализа этих измерений были определены основные факторы погрешности. Наиболее важный из них связан с качеством узла поворота контролируемой детали. Сделан вывод о том, что, во-первых, прибор может достичь предельной погрешности измерений, предусмотренных ГОСТ 17353-89 (радиальная погрешность 0,05 мкм). Кроме того, уже в этой версии прибор уверенно выявлял дефекты формы поверхности для части качеств колец подшипников в соответствии с методикой РД ВНИПП 013-00. Однако прибор нуждается в усовершенствовании,

Рис. 4. Оптико-механический блок прибора:
1 – источник излучения; 2 – контролируемая
поверхность; 3 – фотоприемник

Fig. 4. An optical-mechanical unit of the device:
1 – radiation source; 2 – controlled surface;
3 – photodetector

его метрологические характеристики могут быть улучшены. Это связано также с переходом на более коротковолновый излучатель – полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 0,405 мкм (фиолетовый цвет). При уменьшении параметра L прибора с 35 до 20 мм это дает требуемую методикой дискретность отчетов радиального профиля 2000 на оборот. При этом диаметр ограничивающей диафрагмы должен быть увеличен до 5 мм при сохранении равномерной освещенности в пределах ее апертуры. Это показали расчеты и эксперименты, сделанные авторами.

Заключение

В данной работе описаны физическая и математическая модели лазерного кругломера, приведены структура и функционал программного комплекса, предназначенного для исследования погрешностей результатов его измерений.

По результатам статистического анализа этих измерений определены основные факторы погрешности измерений. Наиболее важный из них связан с качеством узла поворота контролируемой детали.

Прибор может достичь предельной погрешности измерений, требуемых стандартом (радиальная погрешность 0,05 мкм). Кроме того, уже в этой версии прибор уверенно выявлял дефекты формы поверхности для части качеств колец подшипников в соответствии с методикой отраслевого Всероссийского НИИ подшипниковой промышленности. Однако прибор нуждается в усовершен-

Рис. 6. Интервальный статистический ряд

Fig. 6. An interval statistical series

ствовании, причем его метрологические характеристики могут быть улучшены.

По мнению авторов, учитывая трудности с финансированием работы, сбор и предварительную обработку данных нужно проводить там, где для этого есть технические возможности, а разработанный программный комплекс, выполняющий функции получения профиля и контурных картин поверхности изделия, контролируемого прибором, а также статистическую обработку полученных данных, разместить в облаке.

Благодарности

Авторы благодарят Понявина Ю.О. и Чigareва А.С. за помощь в разработке программного комплекса, а также Треумова В.Д. и Попика С.И. за помощь в расчетах параметров источника излучения в приборе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по Программе повышения конкурентоспособности Самарского национального исследовательского университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 годы и при частичной поддержке по НИР № 01910042666 в Самарском филиале Физического института РАН.

Литература

1. Белопухов В.Н., Бесталанный С.И., Заякин О.А. Способ измерения геометрической формы тел вращения с отражающей поверхностью. Пат. 2109250, Россия; № 95100536/28 (001062); заявл. 12.01.1995; опубл. 20.04.1998. Бюл. № 11.
2. Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 82 с. URL: http://optic.cs.nstu.ru/files/Lit/3D_2015.pdf (дата обращения: 27.10.2017).
3. Mascenik J., Pavlenko S. Determining the exact value of the shape deviations of the experimental measurement. Proc. Intern. Conf. (ICMM 2014); Chengdu; China, 2014, vol. 624, pp. 339–343. URL: <http://sci-hub.cc/10.4028/www.scientific.net/AMM.624.339> (дата обращения: 27.06.2017). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.624.339.
4. Кругломер лабораторный КРЛ. URL: <https://v-kip.com/kruglomer-laboratornyy-kr1> (дата обращения: 10.12.2017).
5. Talyrond Серия 500. URL: <http://taylor-hobson.ru/katalog-produktcii/talyrond-seriya-500.html> (дата обращения: 10.12.2017).
6. Ацуси Сато. Высоточный профилометр типа Maxim 3D-5700 // Кэйсоку гидзюцу = Instrum. and Autom. 1991. Т. 19. № 2. С. 54–58. Яп.
7. Bartl J. Interferometer for the measurement of defects on ball bearings. Review of Scientific Instruments. 1996, vol. 67, no. 2, pp. 558–563. DOI: 10.1063/1.1146636.
8. Осипович И.Р., Пуряев Д.Т. Интерферометрический метод контроля формы асферических поверхностей качения прецизионных подшипников // Вестн. МГТУ. Сер.: Приборостроение. 1999. Вып. 3. С. 65–75.
9. Liang-Chia Chen, Sheng-Lih Yeh, Abraham Mario Tapilouw, Jui-Chin Chang. 3-D surface profilometry using simultaneous phase-shifting interferometry. Optics Communications. 2010, vol. 283, iss. 18, pp. 3376–3382. URL: http://ac.els-cdn.com/S0030401810004505/1-s2.0-S0030401810004505-main.pdf?_tid=2bdcc3e4-30bd-11e7-ab38-00000aacb35d&acdnat=1493897650_2e23f5be8c9ba2bd9362ea351367542a (дата обращения: 04.04.2017). DOI: 10.1016/j.optcom.2010.05.001/.
10. Беннет Д.М., Маттсон Л. Шероховатость поверхности и рассеяние; [пер. с англ. Н.В. Васильченко]. Л.: Изд-во ВНИЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, 1993.
11. Laser Measurement of Roundness: Products & Services. URL: http://www.globalspec.com/industrial-directory/laser_measurement_of_roundness (дата обращения: 10.12.2017).
12. Caulier Y. Characterization of complex industrial surfaces with specific structured patterns. machine vision – applications and systems. Tech publ., 2012, 272 p.
13. Старостин Е.М., Гавриленко В.А., Зиенко С.И. Способ измерения диаметра объектов цилиндрической формы с направленно отражающей поверхностью. Патент 2379628 Россия; № 2007143578/28; заявл. 27.11.2007; опубл. 20.01.2010. Бюл. № 2. 10 с.
14. Андрейченко Ю.Я., Волошинов В.А., Волошинов Д.В., Самсонов В.В. Устройство для контроля параметров криволинейных поверхностей. Патент 2025659, Россия, № 4944595/28, заявл. 29.05.1991; опубл. 30.12.1994. Бюл. № 24. 6 с.
15. Chernyshov A., Sterr U., Riehle F., Helmske J., Pfund J. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts. Applied Optics. 2005, no. 30, vol. 44, pp. 6419–6425. DOI: 10.1364/AO.44.006419.
16. Заякин О.А. Получение профилей и контурных картин поверхностей вращения способом триангуляции с использованием зеркально отраженного излучения // Вестн. Самарского гос. технич. ун-та. Сер.: Физматнауки. 2007. № 2. С. 95–101.
17. Заякин О.А. Информационно-измерительная система контроля деталей подшипников, погрешность измерений отклонений от круглости // Высокие технологии в машиностроении: матер. Междунар. науч.-технич. конф. Самара: Изд-во Самарского гос. технич. ун-та, 2004. С. 118–120.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.121.064-071

Received 12.12.17

2018, vol. 31, no. 1, pp. 064–071

SOFTWARE SYSTEM FOR RESEARCH A MEASUREMENT ERROR OF A LASER EXPERIMENTAL ROUNDNESS MEASUREMENT INSTRUMENT

V.N. Belopukhov¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, bvnsam50@gmail.com

O.A. Zayakin², Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, oleg_zayakin@inbox.ru

A.V. Manukhin², Graduate Student, manuxin.alexander@yandex.ru

A.A. Rostov², Graduate Student, rostovchik512@mail.ru

¹ Institute of Complex Systems Control RAS, Sadovaya St. 61, Samara, 443020, Russian Federation

² Samara National Research University, Moskovskoe Highway 34, Samara, 443086, Russian Federation

Abstract. The purpose of the work is to develop a software system for assistance in experimental research on a new out-of-roundness measurement method. One of the important aims of the research is to learn the main measurement error of this method.

The Samara branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences has developed a laboratory layout of the device. Now the Samara University uses it in the training process and updates it further. The method assumes that a focused laser beam scans the controlled surface, while a mirrored laser beam position is determined (Patent RF 2109250).

Its practical application is controlling the deviation of a bearing inner ring tread form.

The functions of the research software system are the following: acquiring pre-processed data from external files; calculating a radial profile, out-of-roundness and waviness after a single scan; statistical analysis of these measurement results by rescans series data and estimation of the coordinate measurement error in each point of a profile.

According to the preliminary results of the measurement series analysis, its estimated basic error is 0.07 μm for out-of-roundness and 0.05 μm for waviness without considering the cinematic error during scanning.

These results compare well with ones that currently used instruments give, such as interferometers and contact circular meters, in the practical application considered here. Measurement error is mainly caused by kinematic inaccuracies during operating a turning sub-unit for the controlled object. The conclusion implies that the device laboratory layout still needs updating and its metrological characteristics can be improved.

Taking into account the lack of funding in the research, it is suggested to acquire and pre-process data in places where it is possible to do, whereas perform further calculating in the cloud.

Keywords: geometric variable measurement, triangulation, 3D scanner, roundness, waviness, bearing ring, mathematical model, statistical data processing, cloud computing, deflectometry.

Acknowledgements. The authors thank Ponyavin Yu.O. and Chigarev A.S. for assistance in a software package development, as well as Treyumov V.D. and Popik S.I. for assistance in calculating radiation source parameters in the device.

This work has been done with a support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the Samara National Research University Competitiveness Improvement Program among the world's leading scientific and educational centers in 2013–2020.

The work has also been partially performed within the framework of the research scientific work "Analysis and synthesis of light fields in laser metrology and technology" (State Registration No. 01910042666) in the Samara branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

References

1. Belopukhov V.N., Bestalanny S.I., Zayakin O.A. *Sposob izmereniya geometricheskoy formy tel vrashcheniya s otrazhayushchey poverkhnostyu* [A Method for Measuring a Geometric Shape of Rotation Bodies with a Reflecting Surface]. Patent RF 2109250, no. 95100536/28 (001062), 1998.
2. Guzhov V.I. *Metody izmereniya 3D-profilya obektov. Kontaknye, triangulyatsionnye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniya* [Methods for Measuring the 3D Objects Profile. Contact, Triangulation Systems and Structured Lighting Methods]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2015, 82 p. Available at: http://optic.cs.nstu.ru/files/Lit/3D_2015.pdf (accessed August 27, 2017).
3. Mascenik J., Pavlenko S. Determining the exact value of the shape deviations of the experimental measurement: Code 107487. *Int. Conf. on Mechatronics, Materials and Manufacturing (ICMMM 2014)*. Chengdu, China, Trans Tech Publ. Ltd., 2014, vol. 624, pp. 339–343. Available at: <http://sci-hub.cc/10.4028/www.scientific.net/AMM.624.339> (accessed June 27, 2017).
4. *Kruglomer laboratorny KRL* [A Laboratory Roundness Measurement Instrument KRL]. Available at: <https://v-kip.com/kruglomer-laboratornyy-krl> (accessed December 10, 2017).
5. *Talyrond Ser. 500*. Taylor Hobson Ltd. Available at: <http://taylor-hobson.ru/katalog-produktsii/talyrond-seriya-500.html> (accessed December 10, 2017).
6. Atsushi Sato. Maxim 3D-5700. *Instruments and Automation*. 1991, vol. 19, no. 2, pp. 54–58.
7. Bartl J. Interferometer for the measurement of defects on ball bearings. *Review of Scientific Instruments*. 1996, no. 67 (2), pp. 558–563.
8. Osipovich I.R., Puryaev D.T. Interferometrical method for a precise bearing runway aspherical surfaces form inspection. *Vestn. MGTU. Ser. Priborostroenie* [Vestnik MSTU. Series Instrument Engineering]. 1999, no. 3, pp. 65–75, 128 (in Russ.).
9. Chen L.Ch., Yeh Sh.L., Tapilouw A. M., Chang J.-Ch. 3-D surface profilometry using simultaneous phase-shifting interferometry. *Optics Communications*. 2010, vol. 283, iss. 18, pp. 3376–3382. Available at: http://ac.els-cdn.com/S0030401810004505/1-s2.0-S0030401810004505-main.pdf?_tid=2bdcc3e4-30bd-11e7-ab38-00000aacb35d&acdnat=1493897650_2e23f5be8c9ba2bd9362ea351367542a (accessed April 4, 2017).
10. Bennett J.M., Mattsson L. *Introduction to Surface Roughness and Scattering*. Washington, DC, Optical Society of America Publ., 1989 (Russ. ed.: N.V. Vasilchenko, 1993, 119 p.).
11. *Laser Measurement of Roundness: Products & Services*. Engineering 360. Available at: http://www.globalspec.com/industrial-directory/laser_measurement_of_roundness (accessed December 10, 2017).
12. Caulier Y. *Characterization of Complex Industrial Surfaces with Specific Structured Patterns. Machine Vision – Applications and Systems*. F. Solari (Ed.), Intech Publ., 2012, 272 p.
13. Starostin E.M., Gavrilenko V.A., Zienko S.I. *Sposob izmereniya diametra obektov tsilindricheskoy formy s napravlenno otrazhayushchey poverkhnostyu* [Method for Measuring the Diameter of Cylindrical Objects with a Directional Reflecting Surface]. Patent RF 2379628, no. 2007143578/28, 2010.
14. Andreychenko Yu.Ya., Voloshinov V.A., Voloshinov D.V., Samsonov V.V. *Ustroystvo dlya kontrolya parametrov krivoliineynykh poverkhnostey* [A Device for Monitoring the Parameters of Curvilinear Surfaces]. Patent RF 2025659, no. 4944595/28, 1994.
15. Chernyshov A., Sterr U., Riehle F., Helmske J., Pfund J. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts. *Applied Optics*. 2005, vol. 44, no. 30, pp. 6419–6425.
16. Zayakin O.A. Obtaining profiles and contour patterns of rotation surfaces by triangulation using mirror-reflected radiation. *Vestn. SamGTU. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Jour. of Samara State Tech. Univ., Ser. Physical and Mathematical Sciences]. 2007, no. 2 (15), pp. 95–101 (in Russ.).
17. Zayakin O.A. Information measuring system for checking the details of bearings, measurement error of deviations from roundness. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: mater. Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* [High Technologies in Mechanical Engineering: Proc. Int. Science and Tech. Conf.]. Samara, Samara State Tech. Univ. Publ., 2004, pp. 118–120 (in Russ.).