

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В.Я. Колючкин¹

Н.Е. Маренов¹

А.О. Егоров²

vkoluch@bmstu.ru

marenov@bmstu.ru

alex-egorov@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ЗАО «ПИК ПРОГРЕСС», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработаны принципы действия опτικο-электронных приборов, предназначенных для оперативного высокоточного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов. Приведено описание функциональной схемы опτικο-электронных приборов триангуляционного типа со структурированной подсветкой, в которой прямолинейность поверхности катания оценивается на основе анализа изображений поперечных сечений рельсов, регистрируемых камерой линейного сканирования. Предложенное техническое решение позволит существенно повысить производительность контроля и достоверность результатов, а также обеспечить регистрацию изображений поперечных сечений рельсов, расстояние между которыми не превышает 1 мм, при скорости движения измерительного вагона 180 км/ч. Исследовано влияние конструктивных параметров предложенной схемы опτικο-электронных приборов на пороговую чувствительность контроля положения точек поверхности катания рельсов. Для уменьшения погрешности результатов контроля предложено использовать методы субпиксельного уточнения координат регистрируемых изображений пиков структурированной подсветки. В процессе выполненных численных экспериментов математической модели опτικο-электронных приборов исследована зависимость среднеквадратического отклонения погрешности измерения координат точек поверхности рельса от значения отношения сигнал/шум и ширины пиков структурированной подсветки. Сформулированные требования к со-

Ключевые слова

Железнодорожные рельсы, опτικο-электронная система, структурированная подсветка, контроль, измерение, погрешность

ставным частям оптико-электронных приборов триангуляционного типа могут быть использованы при разработке высокоточной аппаратуры для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожного пути

Поступила 11.01.2023

Принята 04.05.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. Контроль состояния верхнего строения железнодорожного пути является важной народнохозяйственной задачей. Неровности поверхности катания колес и рельсов, зазоры между боковыми гранями головок рельсов и гребнями колес, расстройство болтовых соединений в стыках вызывают вибрации различной интенсивности во всех элементах верхнего строения железнодорожного пути при движении подвижного состава [1]. Для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций из-за возможных отклонений от нормативных показателей осуществляют регулярный мониторинг железнодорожного пути. Для этих целей используют путеизмерительные вагоны, которые обеспечивают контроль различных параметров верхнего строения железнодорожного пути в процессе движения по контролируемому участку. Путеизмерительные вагоны оснащаются контактными и бесконтактными средствами контроля геометрических параметров рельсов и их взаимного положения, а также вспомогательными средствами, позволяющими определять режимы движения путеизмерительных вагонов и их текущие координаты [2–4]. Особое место среди средств контроля железнодорожного пути занимают оптико-электронные приборы (ОЭП), обеспечивающие бесконтактный оперативный контроль на основе анализа регистрируемых двух- и трехмерных (3D) изображений. Для контроля дефектов железнодорожного пути наибольшее распространение получили ОЭП для регистрации 3D-изображений объектов, основанные на триангуляционном методе со структурированной подсветкой [5, 6]. Принцип действия таких ОЭП заключается в проецировании на поверхность контролируемых объектов картины с заданной структурой и регистрации изображения под некоторым параллаксным углом относительно визирной оси проектора. В зарегистрированном изображении возникают геометрические искажения, которые используются для синтеза 3D-образов объектов методами цифровой обработки изображений [7, 8]. Известны различные варианты используемой в таких системах подсветки, в том числе серии неизменных или изменяющихся паттернов, а также паттерны с использованием различных вариантов цветовой кодировки [9, 10]. Достоинством ОЭП триангуляционного типа является относительная простота алгоритмов, используемых для синтеза 3D-образов объектов.

Известны приборы такого типа, которые используются, например, для контроля износа головки рельсов, контроля параметров поперечного профиля рельсов и др.

Среди прочих задач контроля верхнего строения железнодорожного пути важным является контроль прямолинейности поверхности катания рельсов. Этот дефект может приводить к повышенному износу колес и железнодорожного полотна, а также к существенным вибрациям железнодорожных вагонов. Непрямолинейность поверхности катания рельсов возникает из-за торможений и пробуксовок локомотивов, а также в местах сварных стыков. Поэтому требуется контроль прямолинейности в сечениях вдоль рельса на коротких участках, отстоящих на расстояниях не более 100 мм.

Существует несколько вариантов решения задачи контроля прямолинейности поверхности катания рельсов, в том числе с использованием ОЭП триангуляционного типа [11, 12]. Регистрация изображений в известных системах контроля осуществляется телевизионными (ТВ) камерами, которые имеют ограничение по частоте кадров. В частности, если частота кадров ТВ-камеры равна 100 Гц, то прямолинейность в сечениях рельса, отстоящих на 100 мм, можно контролировать при скорости движения путеизмерительного вагона не более 36 км/ч.

Отметим важный фактор, который может оказывать влияние на погрешность измерений прямолинейности. Как правило, средства контроля устанавливаются на нижней части вагона, который подвержен колебаниям. Поскольку частотный спектр колебаний вагона достигает десятков герц, то эти колебания приводят к вариациям направления визирной оси ОЭП и при относительно низких частотах регистрации изображений влияют на результаты измерений положения поверхности рельса. Таким образом, общим недостатком существующих технических решений задачи контроля прямолинейности поверхности катания рельсового пути является низкая частота регистрации изображений, ограничивающая производительность контроля и точность измерений. В связи с этим актуальной задачей является разработка и создание быстродействующей системы оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов.

Цель исследований — разработка принципов действия ОЭП, предназначенных для оперативного высокоточного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов. Для достижения поставленной цели требуется предложить технические решения, свободные

от недостатков известных приборов подобного типа, а также оценить достижимую точность контроля.

Принцип действия ОЭП. Функциональная схема предлагаемого ОЭП для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов приведена на рис. 1. В основу принципа действия этого прибора положен триангуляционный метод, но для регистрации изображений вместо ТВ-камеры используется камера линейного сканирования (линейная камера) 2, визирная ось которой составляет параллаксный угол α с визирной осью проектора 1.

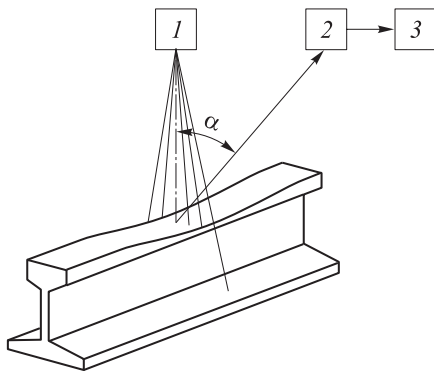


Рис. 1. Функциональная схема ОЭП для контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов:
1 — проектор; 2 — линейная камера;
3 — ЭВМ

Таким образом, формируемый проектором набор полос вдоль оси рельса регистрируется в каждом кадре как набор пятен, положение изображений которых содержит информацию о положении поверхности рельса вдоль визирной оси линейной камеры. При движении путеизмерительного вагона проводится измерение относительного положения сечений поверхности рельса,

которые в дальнейшем используются для оценки прямолинейности на заданных участках железнодорожного пути.

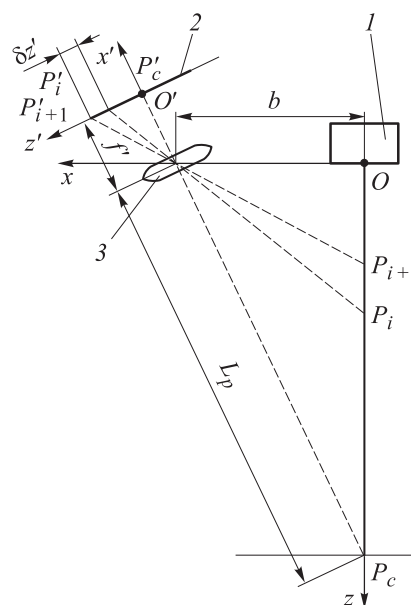
В предлагаемой схеме ОЭП в отличие от известных устройств вместо ТВ-камеры используется линейная камера, в которой оптический сигнал регистрируется не матричным приемником излучения (ПИ), а линейным ПИ в виде ПЗС (прибора с зарядовой связью) или КМОП (комплементарного металлооксидного полупроводника). Достигнутый в настоящее время технический уровень линейных камер обеспечивает регистрацию изображений в виде сечений распределения яркости пространства предметов с частотой до 50 кГц. При такой частоте кадров можно регистрировать изображения сечений поверхности рельсов, отстоящих на расстоянии ~ 1 мм, при скорости движения путеизмерительного вагона до 180 км/ч. Кроме того, при такой высокой частоте регистрации изображений можно практически исключить влияние колебаний измерительного вагона за счет использования информации от датчиков колебаний, устанавливаемых на вагон.

Анализ показателей предложенной схемы. Рассмотрим вопросы, связанные с оценкой погрешности контроля прямолинейности в предлага-

гаемой схеме триангуляционного ОЭП. В таком случае основными источниками погрешности являются шум ПИ, а также неопределенность значения фокусного расстояния объектива и параметров, характеризующих взаимное положение визирных осей проектора и линейной камеры. На достижимые значения показателей погрешности влияют алгоритмы обработки результатов регистрации изображений, пространственное распределение облученности в структурированной подсветке, а также линейные искажения, которые вносят ПИ в регистрируемый сигнал объектив линейной камеры и чувствительные элементы. На этом этапе исследований проанализировано влияние алгоритмов обработки регистрируемых изображений и шума ПИ на пороговую чувствительность схемы контроля положения поверхности рельса.

Схема регистрации изображений в триангуляционной системе с линейной камерой и проектором, формирующим на поверхности объекта контроля пятно малых размеров, приведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема регистрации изображений в лазерной триангуляционной системе:
 1 — проектор; 2 — линейная камера;
 3 — объектив



В соответствии со схемой на рис. 2, ось пучка излучения, формирующего пятно с центром в точке $P_i = P(0, 0, z_i)$ пространства предметов, лежит на оси Oz главной системы координат xuz , начало которой совпадает с узловой точкой объектива проектора. Точка $P_c = P(0, 0, z_c)$, в которой пересекаются визирные оси линейной камеры и проектора, лежит на опорной плоскости, относительно которой осуществляется измерение дальности до объекта. Взаимное положение линейной камеры, проектора и опорной плоскости удовлетворяет формуле

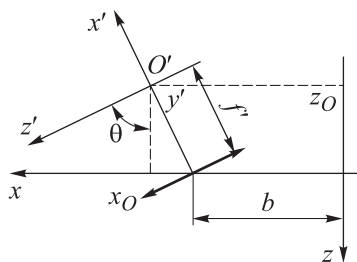
$$z_c = \sqrt{L_p^2 - b^2},$$

где L_p — рабочее расстояние; b — линейный параллакс.

Визирная ось линейной камеры лежит на прямой

$$x = -\frac{b}{z_c} z + b.$$

Для определения зависимости между координатами точек в пространстве предметов и изображений введем вспомогательную систему координат $x'y'z'$,



связанную с плоскостью регистрации изображений. Начало координат этой системы находится в точке $(x_O, 0, z_O)$, а оси $O'x'$ и $O'z'$ повернуты на угол θ вокруг оси $O'y'$ (рис. 3). При этом визирная ось объектива линейной камеры совпадает с координатной осью $O'x'$, а ось $O'z'$ лежит в плоскости чувствительных элементов линейного ПИ.

Рис. 3. Положение вспомогательной системы координат в главной системе координат

Предположим, что объектив линейной камеры представляет собой тонкую линзу с фокусным расстоянием f' . Связь между системами координат xuz и $x'y'z'$ определяется соотношением

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = R_y(\theta)T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_O \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_O \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{2}$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

— линейные операторы, которые описываются матрицами переноса и поворота.

Связь между координатами точек пространства предметов и плоскости изображения описывается уравнениями из (1)–(3):

$$\begin{aligned}x' &= (x - x_O) \cos \theta - (z - z_O) \sin \theta; \\z' &= (x - x_O) \sin \theta + (z - z_O) \cos \theta.\end{aligned}\tag{4}$$

Параметры в уравнениях (4), характеризующие взаимное положение систем координат, определяются формулами:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{z_c}\right);\tag{5}$$

$$x_O = f \cos \theta + b;\tag{6}$$

$$z_O = -f \sin \theta.\tag{7}$$

Ось $O'z'$ в главной системе координат $x y z$ лежит на прямой:

$$x = \frac{z_c}{b}(z + z_O) + x_O,\tag{8}$$

а уравнение прямой, соединяющей точку P_i с координатой z_i в пространстве предметов и узловой точкой объектива линейной камеры, имеет вид

$$x = -\frac{b}{z_i}z + b.\tag{9}$$

Решив уравнения (8) и (9), получим координаты точки пересечения прямых, соответствующих положению изображения точки P_i :

$$\begin{aligned}z_i^* &= \frac{z_i(z_c z_O + b^2 - b x_O)}{b^2 + z_c z_i}; \\x_i^* &= -\frac{b(z_c z_O + b^2 - b x_O)}{b^2 + z_c z_i} + b.\end{aligned}\tag{10}$$

Подставив решение (10) в (4) и с учетом параметров, определяемых формулами (5)–(7), получим координату изображения точки P_i на линейном приемнике в системе координат $x' y' z'$:

$$z_i' = (x_i^* - x_O) \sin \theta + (z_i^* - z_O) \cos \theta.\tag{11}$$

Приведенные формулы позволяют вычислить координату изображения любой точки P_i на ПИ, причем зависимость между координатами линейная и определяется формулой $z' = Sz$, где S — чувствительность измерительной схемы.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости координат изображения точки от расстояния до объекта в пространстве предметов. Графики рассчитаны при $f' = 35$ мм, $z_0 = 750$ мм и значениях линейного параллакса, равных $b = 150, 200, 250$ мм.

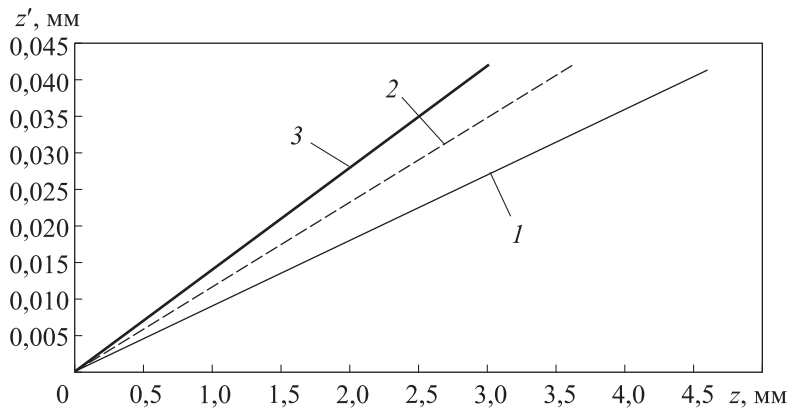


Рис. 4. Зависимости координат изображения точки от расстояния до объекта при значениях линейного параллакса $b = 150, 200, 250$ мм (1–3) соответственно

Для выбранных значений линейного параллакса $b = 150, 200, 250$ мм перемещению изображения на величину, равную типовому размеру одного пикселя $a_{\text{п}} = 0,007$ мм линейного приемника, соответствуют перемещения в пространстве предметов, равные $\Delta z = 0,783, 0,605, 0,502$ мм. Однако согласно инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, требуется контролировать прямолинейность поверхности катания рельсового пути с погрешностью примерно в 5 раз меньшей, чем минимальное из полученных значений. Таким образом, при измерении перемещений с точностью до размера одного пикселя за счет увеличения линейного параллакса не удастся достичь требуемой пороговой чувствительности. Для повышения пороговой чувствительности можно увеличить фокусное расстояние объектива линейной камеры, но при этом практически пропорционально увеличатся габаритные размеры прибора. Более радикальный способ повышения пороговой чувствительности — использование алгоритмов обработки зарегистрированных сигналов, позволяющих оценить координаты изображения объектов с погрешностью, составляющей доли от размера одного пикселя.

Анализ методов уменьшения погрешности оценки координат изображений. Эффективным методом, позволяющим измерять координаты изображений финитных объектов с субпиксельной точностью, яв-

ляется метод максимального правдоподобия [13], основанный на байесовском подходе к оценке параметров сигналов при простой функции потерь и заключающийся в определении точки экстремума корреляционного интеграла [14]. Для реализации метода требуется априори знать вид функции, описывающей сигнал. В предложенной схеме ОЭП контроль прямолинейности осуществляется на основе анализа координат изображения полос структурированной подсветки, которые измеряются в различных поперечных сечениях рельса. Как правило, поверхность рельса в поперечном сечении отличается от плоскости, что вносит неопределенность вида регистрируемого сигнала.

От такого ограничения свободны методы субпиксельного уточнения, основанные на оценке положения пика по нескольким зарегистрированным значениям сигнала в окрестности этого пика [15–17]. Далее приведены формулы для расчета значения δ субпиксельного уточнения координат пика $f(i)$ по значениям сигналов $f(i - 1)$ и $f(i + 1)$ в двух соседних пикселях при аппроксимации сигнала гауссоидой, методом центра масс и параболой:

$$\delta_{\Gamma} = \frac{1}{2} \frac{\ln [f(i - 1)] - \ln [f(i + 1)]}{\ln [f(i - 1)] - 2 \ln [f(i)] + \ln [f(i + 1)]};$$

$$\delta_{\text{ц.м}} = \frac{f(i + 1) - f(i - 1)}{f(i - 1) + f(i) + f(i + 1)};$$

$$\delta_{\text{п.а}} = \frac{1}{2} \frac{f(i - 1) - f(i + 1)}{f(i + 1) - 2f(i) + f(i - 1)}.$$

Для оценки погрешностей выполнены численные эксперименты.

Численные экспериментальные исследования. Цель численных экспериментов — исследование зависимости погрешности методов субпиксельного уточнения от отношения сигнал/шум (ОСШ), а также зависимости погрешности от остроты пика регистрируемого оптического сигнала. Исходные данные:

- фокусное расстояние объектива линейной камеры $f' = 35$ мм;
- период расположения пикселей $T'_{xO} \approx a_{\text{п}} = 0,007$ мм;
- расстояние до базовой плоскости $z_O = 750$ мм;
- линейный параллакс $b = 250$ мм.

При проведении численных экспериментов в пространстве предметов моделировали распределение облученности, описываемое гармоническим законом:

$$E(x, y) = \frac{E_{\max}}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{T_x}\right) \right],$$

где T_x — пространственный период, значения которого варьировались для каждой серии экспериментов.

Серии экспериментов проводили при фиксированных значениях T_x/T_{x0} (где T_{x0} — период пикселей, приведенный по масштабу к пространству предметов, равный 0,15 мм) и ОСШ. Значение отношения T_x/T_{x0} характеризует относительную ширину пиков пространственного распределения структурированной подсветки, ОСШ определяли по формуле

$$\mu_{\Pi} = \frac{U_{\max}}{\sigma_{\Pi}},$$

где $U_{\max} = k_2 E_{\max}$ — амплитуда регистрируемого сигнала; σ_{Π} — средне-квадратическое отклонение (СКО) шума линейного ПИ.

В i -м эксперименте каждой серии оценивали координату z_i предметной плоскости. Это значение для каждого эксперимента варьировалось в известных пределах, а значения реализаций шума в виде нормального случайного процесса с заданным СКО моделировались генератором случайных чисел. В каждой серии проводили 1000 экспериментов.

Погрешность методов субпиксельного уточнения, приведенная по масштабу к пространству предметов, оценивали безусловным смещением и дисперсией, которые при условии равновероятного положения пика распределения облученности в пределах одного периода пикселей ПИ вычисляли по формулам:

$$b(z_m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{mi} - z_{ni});$$

$$\sigma(z_m) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_{mi} - \langle z_m \rangle)^2},$$

где z_{mi} — значение оценки положения пика, полученного методом субпиксельного уточнения в i -м эксперименте; z_{ni} — истинное положение пика гармонического распределения в i -м эксперименте; $\langle z_m \rangle$ — среднее значение оценки положения пика, полученного методом субпиксельного уточнения в серии экспериментов.

В процессе проведения численных экспериментов установлено, что безусловное смещение оценок, полученных методами субпиксельного

уточнения, практически равно нулю, т. е. оценки координат пиков для использованных в экспериментах методов являются несмещенными. Результаты экспериментов, которые для различных методов субпиксельного уточнения отражают зависимость СКО погрешности оценки координат объектов от пикового ОСШ μ_n и ширины пиков структурированной подсветки, характеризуемой отношением T_x/T_{x0} , приведены в таблице.

Зависимость СКО оценки координат объектов от ОСШ для различных значений остроты пиков

μ_n	$\sigma(z_m)$, мм, при T_x/T_{x0}		
	12	8	6
<i>Аппроксимация гауссоидой</i>			
100	0,029	0,014	0,009
50	0,055	0,028	0,016
25	0,116	0,054	0,032
10	0,252	0,132	0,081
<i>Метод центра масс</i>			
100	0,135	0,110	0,083
50	0,144	0,144	0,087
25	0,192	0,128	0,096
10	0,308	0,192	0,133
<i>Аппроксимация параболой</i>			
100	0,030	0,015	0,012
50	0,056	0,029	0,019
25	0,118	0,055	0,035
10	0,255	0,136	0,085

Обсуждение результатов. В соответствии с полученными результатами все использованные в экспериментах методы субпиксельного уточнения позволяют существенно повысить точность измерений. Наиболее эффективными являются методы аппроксимации гауссоидой и параболой. При аппроксимации гауссоидой и параболой уменьшение в 2 раза ширины пика за счет уменьшения периода гармонического распределения структурированной подсветки приводит к уменьшению примерно в 3 раза СКО погрешности. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ОЭП, предназначенного для контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожного пути с задан-

ными требованиями к погрешностям измерений. В частности, эти результаты позволяют сформулировать исходные требования к составным частям ОЭП, в том числе мощности источников излучения, используемых в проекторе; виду и параметрам пространственного распределения облученности в создаваемой проектором структурированной подсветке; конструктивным параметрам объектива и ПИ линейной камеры.

Заключение. Предложена функциональная схема ОЭП триангуляционного типа с линейной камерой, используемой для регистрации изображений, которая в отличие от известных приборов может обеспечить высокоточный контроль прямолинейности поверхности катания железнодорожного пути при скоростях движения путеизмерительного вагона, превышающих 200 км/ч.

Приведенные результаты могут быть использованы при разработке ОЭП для контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожного пути с заданной погрешностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Яковлева Т.Г., ред. Железнодорожный путь. М., Транспорт, 1999.
- [2] Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A review on existing sensors and devices for inspecting railway infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01)
- [3] Глазунов Д.В. Диагностические и технологические способы повышения надежности рельсового пути. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 1, с. 32–40.
- [4] Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry. *Transp. Saf. Environ.*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdz007>
- [5] Ye J., Stewart E., Roberts C. Use of a 3D model to improve the performance of laser-based railway track inspection. *Proc. Inst. Mech. Eng. F: J. Rail and Rapid Transit*, 2019, vol. 233, no. 3, pp. 337–355. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718795714>
- [6] Yi B., Yang Y., Yi Q., et al. Novel method for rail wear inspection based on the sparse iterative closest point method. *Meas. Sc. Technol.*, 2017, vol. 28, no. 12, art. 125201. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa8691>
- [7] Donges A., Noll R. Laser triangulation. In: *Laser measurement technology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2015, pp. 247–278. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-43634-9_10
- [8] Pears N., Liu Y., Bunting P. *3D imaging, analysis and applications*. London, Springer, 2012.
- [9] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Adv. Opt. Photonics*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 128–160. DOI: <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>

- [10] Bell T., Li B., Zhang S. Structured light techniques and applications. In: Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering. New York, John Wiley & Sons, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/047134608X.W8298>
- [11] Liu Z., Sun J., Wang H., et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light. *Opt. Lasers Eng.*, 2011, vol. 49, no. 11, pp. 1343–1351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.05.014>
- [12] Gazafrudi S.-M.M., Younesian D., Torabi M. A high accuracy and high speed imaging and measurement system for rail corrugation inspection. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2021, vol. 68, no. 9, pp. 8894–8903. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3013748>
- [13] Кружилов И.С. О влиянии относительного размера изображения на погрешность определения координат. *Компьютерная оптика*, 2009, т. 33, № 2, с. 210–215.
- [14] Куликов Е.И., Трифионов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М., Советское радио, 1978.
- [15] Fisher R.B., Naidu D.K. A comparison of algorithms for subpixel peak detection. In: Image technology. Berlin, Heidelberg, Springer, 1996, pp. 385–404. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-58288-2_15
- [16] Blais F. Review of 20 years of range sensor development. *J. Electron. Imaging*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 231–243. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1631921>
- [17] Forest J., Salvi J., Cabruja E., et al. Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach. *Proc. ICPR*, 2004, vol. 3, pp. 646–649. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1334612>

Колючкин Василий Яковлевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Маренов Никита Евгеньевич — ассистент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Егоров Алексей Олегович — ведущий инженер ЗАО «ПИК ПРОГРЕСС» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 51а).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Егоров А.О. Оптико-электронная система для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 3 (144), с. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-33-48>

OPTICAL ELECTRONIC SYSTEM FOR OPERATIONAL CONTROL OF THE RAILWAY RAILS STRAIGHTNESS

V.Ya. Kolyuchkin¹

vkoluch@bmstu.ru

N.E. Marenov¹

marenov@bmstu.ru

A.O. Egorov²

alex-egorov@yandex.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² JSC "PIK PROGRESS", Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers principles of operation of the optical electronic devices designed for operational high-precision control of the railway rails rolling surface straightness. It provides a description of the functional scheme proposed by the authors of the optical electronic devices of the triangulation type with structured illumination, where the rolling surface straightness is assessed based on analyzing the images of the rail cross sections registered by a linear camera. A technical solution is proposed that could significantly increase control and reliability of its results, as well as ensure image registration of the rail cross sections, where the distance between them is not exceeding 1 mm with the measurement car speed of 180 km/h. Mathematical expressions were obtained to study the optical electronic devices proposed scheme influence on the threshold sensitivity of control over the points' position along the rail rolling surface. To reduce the control results error, methods of the coordinates' subpixel refinement of the structured illuminated peaks registered coordinates were used. In the course of numerical experiments, the error root-mean-square deviation dependence in measuring the rail surface points' coordinates on the signal-to-noise ratio and the structured illumination peaks width values was studied. Requirements are formulated to components of the triangular type optical electronic devices, which could be introduced in design and development of the high-precision equipment for operational control of the railway track rolling stock straightness

Keywords

Railway rails, optical electronic system, structured illumination, control, measurement, error

Received 11.01.2023

Accepted 04.05.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Yakovleva T.G., ed. Zheleznodorozhnyy put [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1999.

- [2] Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A review on existing sensors and devices for inspecting railway infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01)
- [3] Glazunov D.V. Diagnostic and technological methods for track reliability increase. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 1, pp. 32–40 (in Russ.).
- [4] Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry. *Transp. Saf. Environ.*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdz007>
- [5] Ye J., Stewart E., Roberts C. Use of a 3D model to improve the performance of laser-based railway track inspection. *Proc. Inst. Mech. Eng. F: J. Rail and Rapid Transit*, 2019, vol. 233, no. 3, pp. 337–355. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718795714>
- [6] Yi B., Yang Y., Yi Q., et al. Novel method for rail wear inspection based on the sparse iterative closest point method. *Meas. Sc. Technol.*, 2017, vol. 28, no. 12, art. 125201. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa8691>
- [7] Donges A., Noll R. Laser triangulation. In: *Laser measurement technology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2015, pp. 247–278. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-43634-9_10
- [8] Pears N., Liu Y., Bunting P. 3D imaging, analysis and applications. London, Springer, 2012.
- [9] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Adv. Opt. Photonics*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 128–160. DOI: <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>
- [10] Bell T., Li B., Zhang S. Structured light techniques and applications. In: *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering*. New York, John Wiley & Sons, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/047134608X.W8298>
- [11] Liu Z., Sun J., Wang H., et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light. *Opt. Lasers Eng.*, 2011, vol. 49, no. 11, pp. 1343–1351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.05.014>
- [12] Gazafrudi S.-M.M., Younesian D., Torabi M. A high accuracy and high speed imaging and measurement system for rail corrugation inspection. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2021, vol. 68, no. 9, pp. 8894–8903. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3013748>
- [13] Kruzhirov I.S. Optimal picture size for the purpose of minimal detection error of coordinate. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2009, vol. 33, no. 2, pp. 210–215 (in Russ.).
- [14] Kulikov E.I., Trifonov A.P. Otsenka parametrov signalov na fone pomekh [Estimation of signal parameters against a background of interference]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978.
- [15] Fisher R.B., Naidu D.K. A comparison of algorithms for subpixel peak detection. In: *Image technology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1996, pp. 385–404. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-58288-2_15

[16] Blais F. Review of 20 years of range sensor development. *J. Electron. Imaging*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 231–243. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1631921>

[17] Forest J., Salvi J., Cabruja E., et al. Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach. *Proc. ICPR*, 2004, vol. 3, pp. 646–649.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1334612>

Kolyuchkin V.Ya. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Marenov N.E. — Post-Graduate Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Egorov A.O. — Senior Engineer, JSC “PIK PROGRESS” (Aviamotornaya ul. 51a, Moscow, 111024 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kolyuchkin V.Ya., Marenov N.E., Egorov A.O. Optical electronic system for operational control of the railway rails straightness. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 3 (144), pp. 33–48 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-33-48>