

УДК 681.786.4

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ ФОТОПРИЁМНИКА В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЁХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЕТОДАМИ ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

© 2023 С. В. Двойнишников^a, Г. В. Бакакин^b, В. О. Зуев^c,
В. Г. Меледин^d

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия*

E-mails: ^adv.s@mail.ru, ^bbakakin@itp.nsc.ru, ^cvlad.zuev.0017@mail.ru,
^dmeledin@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 31.08.2022 г.; после доработки 31.08.2022 г.;
принята к публикации 29.09.2022 г.

Предложен адаптивный алгоритм обработки данных для измерения трёхмерного профиля методами фазовой триангуляции в условиях случайного аддитивного шума и ограниченно-го динамического диапазона фотоприёмника. Алгоритм основан на статистическом анализе распределения интенсивности в зарегистрированных фазовых изображениях и адаптивной фильтрации. Метод позволяет уменьшить погрешность измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и измерять трёхмерный профиль объектов сложного профиля с произвольными светорассеивающими свойствами. Метод перспективен для промышленного использования.

Ключевые слова: 3D-геометрия, фазовая триангуляция, динамический диапазон, статистический анализ.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.104

ВВЕДЕНИЕ

Задача измерения 3D-геометрии актуальна и востребована во многих областях науки и техники. Одними из активно развивающихся и широко применимых методов являются триангуляционные методы с использованием структурированного освещения [1]. Основным преимуществом методов триангуляции с использованием структурированного освещения является возможность быстрой трёхмерной реконструкции профиля поверхности объекта с высоким разрешением бесконтактным способом по видеоизображениям. Методы фазовой триангуляции [2] обладают наиболее высокой абсолютной точностью и это связано с устойчивостью методов фазовой триангуляции к расфокусировке оптической системы источника и приёмника излучения [3–4]. Интенсивное развитие методов фазовой триангуляции свидетельствует о перспективности и возможности их широкого применения на практике [5–8]. Авторы многих работ используют комбинации различных подходов для улучшения метрологических характеристик измерительных систем [9–11], например путём разработки оригинальных методов обработки фазовых изображений [12–14]. Существуют работы, описывающие измерения трёхмерного профиля динамических объектов [15], дорожного покрытия [16], обследуемых объектов при внедрении эндоскопических сканеров [17], изделий из листового металла [18], рельсов [19]. При измерениях в промышленных условиях важно согласовать параметры источника излучения, светорассеивающих свойств поверхности объекта и параметры фотоприёмника для исключения выхода из динамического диапазона фотоприёмника. Альтернативный подход может быть

основан на применении устойчивого алгоритма расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами [20]. Однако в случае аддитивных помех применение таких подходов приведёт к чрезмерному снижению динамического диапазона фотоприёмника для исключения выхода за пределы чувствительности фотоприёмника при наличии помех. В результате точность измерений будет существенно снижена. Данная работа нацелена на разработку адаптивного алгоритма расшифровки фазовых изображений в условиях случайных аддитивных помех на основе адаптивной статистической фильтрации исходных данных.

1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Алгоритм основан на динамической оценке среднеквадратичного отклонения колебаний зарегистрированной интенсивности на исходных экспериментальных данных при близких значениях начального фазового сдвига. В случае выхода из динамического диапазона фотоприёмника в заданной окрестности выполняется удаление экспериментальных данных для текущего значения сдвига в анализируемой точке на фазовом изображении. В результате формируется новый набор зарегистрированных интенсивностей, имеющих неэквидистантные начальные значения фазовых сдвигов, отличные для каждой точки на анализируемых фазовых изображениях. Учитывая ограниченность динамического диапазона фотоприёмника, интенсивность на принимаемых изображениях может выражаться в виде

$$I_{\text{FR}}(x, y, i) = \begin{cases} I_{\text{max}}, & \text{если } I(x, y, i) > I_{\text{max}}, \\ I(x, y, i), & \text{если } I_{\text{min}} \leq I(x, y, i) \leq I_{\text{max}}, \\ I_{\text{min}}, & \text{если } I(x, y, i) < I_{\text{min}}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $I_{\text{FR}}(x, y, i)$ — регистрируемая фотоприёмником интенсивность, $I(x, y, i)$ — интенсивность, попадающая на фотоприёмник, I_{min} — минимальная регистрируемая интенсивность, I_{max} — максимальная регистрируемая интенсивность фотоприёмником.

При расшифровке фазовых изображений по массиву экспериментальных данных $I_{\text{FR}}(x, y, i)$ будут наблюдаться искажения, вызванные нелинейными искажениями преобразования:

$$I(x, y, i) \rightarrow I_{\text{FR}}(x, y, i). \quad (2)$$

Для исключения этих нелинейных искажений авторы предлагают следующий подход. Для каждого фазового сдвига $\delta(i)$ формировать структурированную засветку несколько раз и далее анализировать полученные распределения интенсивности. Обозначим такое распределение $R(I, j)$, $j = 0, \dots, k - 1$. Далее функции $I_{\text{FR}}(x, y, i)$ добавлен ещё один параметр $I_{\text{FR}}(x, y, i, j)$, характеризующий порядковый номер измерения в множестве $R(I, j)$. В случае отсутствия аддитивных помех либо при их постоянном характере значения $I_{\text{FR}}(x, y, i, j)$ не будут зависеть от параметра j . При наличии случайных аддитивных помех значения $I_{\text{FR}}(x, y, i, j)$ будут колебаться для каждого сочетания (x, y, i) в пределах амплитуды аддитивных помех, принимаемых фотоприёмником.

Значения $I_{\text{FR}}(x, y, i, j)$ прореживаем по следующему алгоритму. Для каждой комбинации значений (x, y, i) определяем минимальное, максимальное и среднее значения интенсивности, зарегистрированные фотоприёмником:

$$I_{\text{FR max}}(x, y, i) = \max\{I_{\text{FR}}(x, y, i, j)\}, \quad j = 0, \dots, k - 1, \quad (3)$$

$$I_{\text{FR min}}(x, y, i) = \min\{I_{\text{FR}}(x, y, i, j)\}, \quad j = 0, \dots, k - 1, \quad (4)$$

$$I_{\text{FR avg}}(x, y, i) = \frac{\sum I_{\text{FR}}(x, y, i, j)}{K}, \quad j = 0, \dots, k - 1. \quad (5)$$

Далее для обработки фазовых изображений будет использоваться многомерный массив данных $I_{FR}^*(x, y, i)$ вместо $I_{FR}(x, y, i)$, который формируется следующим образом: для всех (x, y, i) имеем

$$I_{FR} \text{ avg}(x, y, i) \in \{I_{FR}^*(x, y, i)\}, \quad \text{если} \quad (I_{FR} \text{ max}(x, y, i) < I_{\text{max}}) \& (I_{FR} \text{ min}(x, y, i) > I_{\text{min}}). \quad (6)$$

Для расшифровки фазовых изображений можно применять устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами. Представленный подход позволяет исключить нелинейные искажения, вызванные пороговой фильтрацией экспериментальных данных из-за узкого динамического диапазона фотоприёмника. Кроме того, предложенный метод позволяет снизить уровень аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных в $\sqrt{k}$ раз.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнены исследования погрешности метода расшифровки фазовых изображений на модельных данных в зависимости от количества фазовых сдвигов при постоянном уровне аддитивного шума. Для сравнения взят устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с произвольным пошаговым сдвигом и предложенный метод на основе адаптивной фильтрации данных.

Количество фазовых изображений, принимаемых с одним значением начального фазового сдвига, равно 10. Всего количество фазовых сдвигов до фильтрации менялось в диапазоне 100–2000. В каждом эксперименте сделаны 50 повторений для оценки среднеквадратичного отклонения измеренной фазы.

На рис. 1 показаны результаты работы метода расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией и метода расшифровки с фильтрацией на основе статистического анализа в зависимости от количества фазовых сдвигов. На рис. 1(а, б) представлены зависимости среднего значения измеренной фазы от количества фазовых сдвигов. При этом на различных графиках показаны результаты работы алгоритмов при различных значениях уровня регистрируемой интенсивности. Аналогично на рис. 1(с, д) представлены зависимости среднеквадратичного отклонения измеренной фазы от количества фазовых сдвигов. Графики демонстрируют, что метод обработки фазовых изображений с применением статистической фильтрации исключает систематическую погрешность измерений даже при большом уровне амплитуды регистрируемого сигнала. Метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией показывает систематическую погрешность результатов измерения сдвига начальной фазы.

Представленные результаты демонстрируют, что устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией данных, выходящих за пределы динамического диапазона, не гарантирует внесения систематической погрешности измерения начальной фазы. Погрешность обусловлена искажением сигнала вблизи порогового значения при наличии шума. Этого недостатка лишён предложенный метод расшифровки на основе устойчивого метода расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа данных. Однако этот метод демонстрирует большую величину среднеквадратичного отклонения результатов измерения. По-видимому, это связано с тем, что операция фильтрации данных в этом случае отсеивает большее количество экспериментальных данных, что приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения результатов измерения сдвига начальной фазы.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для демонстрации работоспособности предложенного метода выполнены измерения трёхмерного профиля модели лопасти гидротурбины с характерными размерами $20 \times 10 \times 10$ см (рис. 2). Измерительный комплекс содержит цифровую промышленную камеру DMC 72BUC02 с матрицей 5 мп, цифровой проектор, обеспечивающий разрешение 1024×768 .

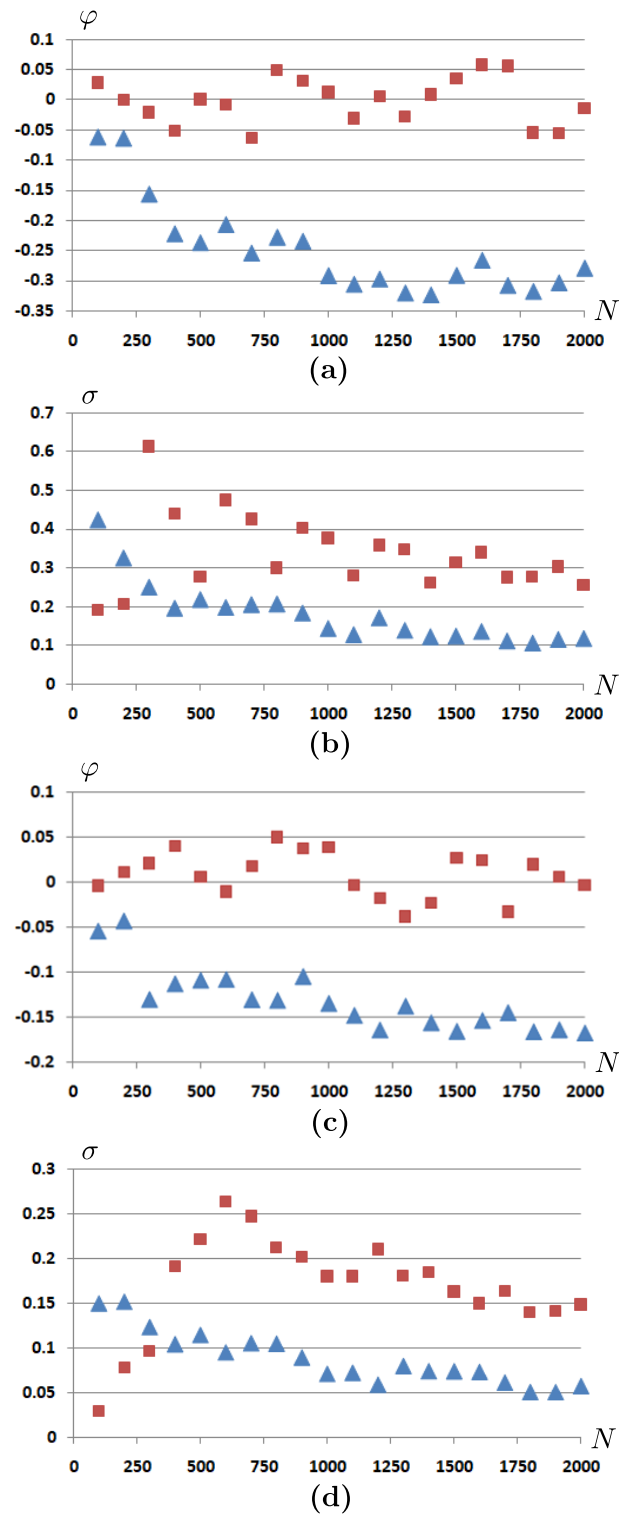


Рис. 1. Зависимость среднего значения (а, с) и среднеквадратичного отклонения измеренной фазы (b, d) от количества фазовых изображений при уровне шума 100, максимальной амплитуде регистрируемой интенсивности 255, амплитуде сигнала 300 (а, b) и 400 (с, d).

Треугольные маркеры — устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией, квадратные маркеры — устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа

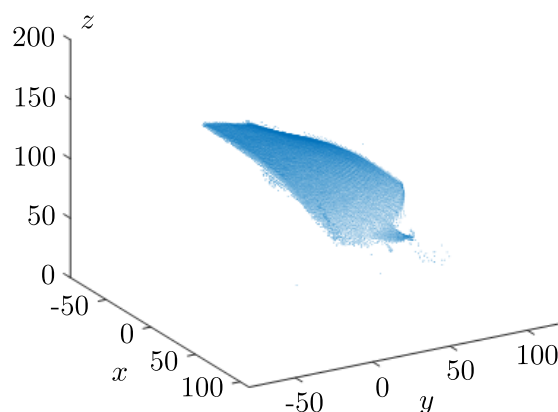


Рис. 2. Результат измерения профиля модели лопасти гидротурбины с характерными размерами $20 \times 10 \times 10$ см

Калибровка выполнялась с помощью плоской калибровочной мишени, параллельно сдвигаемой в направлении нормали к плоскости на равные расстояния. По итогам строилась регрессионная функция в виде многочлена второй степени, как показано в [21, 22]. Среднеквадратичное отклонение результатов измерения составлялось на уровне 10 мкм и оценивалось с помощью измерения плоской калибровочной мишени, размещённой в измерительном объёме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен адаптивный алгоритм обработки данных на основе статистической фильтрации для снижения погрешности измерения трёхмерных геометрических параметров методами фазовой триангуляции. Также показано, что предложенный алгоритм позволяет снизить погрешность измерения трёхмерного профиля на основе метода фазовых шагов и структурированного освещения. Показано, что предложенный алгоритм расшифровки на основе устойчивого метода расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа данных обеспечивает измерение фазы без внесения систематических погрешностей, обусловленных ограниченным динамическим диапазоном фотоприёмника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? // Optics and Lasers Engrg. 2010. N 48. P. 133–140.
2. Gruber M., Hausler G. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation // Optik. 1992. N 3. P. 118–122.
3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерит. техника. 2015. № 5. С. 24–27.
4. Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement. 2019. V. 145. P. 63–70.
5. Wankhede P., Kodey S., Kurra S., Radhika S. A low cost surface strain measurement system using image processing for sheet metal forming applications // Measurement. 2022. V. 187. Article 110273; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110273>
6. Rudyk A., Semenov A., Kryvinska N., Semenova O. Study of phase and amplitude-phase methods for measuring a reactive element quality factor // Measurement. 2022. V. 187. Article 110271; <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110271>

7. Jiang Y., Wang S., Qin H., Li B., Li Q. Similarity quantification of 3D surface topography measurements // *Measurement*. 2021. V. 186. Article 110207; <https://doi.org/10.1088/1361-6501%2Fac1b41>
8. Dong Y., Li Z., Zhu L., Zhang X. Topography measurement and reconstruction of inner surfaces based on white light interference // *Measurement*. 2021. V. 186. Article 110199; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110199>
9. Guo F., Yang B., Zheng W., Liu S. Power frequency estimation using sine filtering of optimal initial phase // *Measurement*. 2021. V. 186. Article 110165; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110165>
10. Fan J., Feng Y., Mo J., Wang S., Liang Q. 3D reconstruction of non-textured surface by combining shape from shading and stereovision // *Measurement*. 2021. V. 185. Article 110029; <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110029>
11. Wang H., Ma J., Yang H., Sun F., Wei Y., Wang L. Development of three-dimensional pavement texture measurement technique using surface structured light projection // *Measurement*. 2021. V. 185. Article 110003; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110003>
12. Shi B., Ma Z., Ni X., Liu J., Liu H. A phase unwrapping method suitable for high frequency fringe based on edge feature // *Measurement*. 2021. V. 185. Article 109938; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109938>
13. Zhang Y., Fan N., Wu Y., Wu G., Luo H., Yan J., Yang S., Liu F. Four-pattern, phase-step non-sensitive phase shifting method based on Carre algorithm // *Measurement*. 2021. V. 171. Article 108762; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108762>
14. Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications // *J. Photogramm. Remote Sens.* 2010. V. 65, N 6. P. 558–569; <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2010.06.003>
15. Li B., An Y., Capelleri D., Xu J., Zhang S. High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics // *Internat. J. Intell. Robot. Appl.* 2017. V. 1, N 1. P. 86–103; <https://doi.org/10.1007/s41315-016-0001-7>
16. Matthias S., Kastner M., Reithmeier E. Evaluation of system models for an endoscopic fringe projection system // *Measurement*. 2015. V. 73. P. 239–246; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.024>
17. Chu C., Yang H., Wang L. Design of a pavement scanning system based on structured light of interference fringe // *Measurement*. 2019. V. 145. P. 410–418; <https://doi.org/10.1016/J.measurement.2019.02.058>
18. Koutecky T., Palousek D., Brandejs J. Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts // *Measurement*. 2016. V. 94. P. 60–70; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.067>
19. Cao X., Xie W., Ahmed S.M., Li C.R. Defect detection method for rail surface based on line-structured light // *Measurement*. 2020. V. 159. Article 107771; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107771>
20. Двойнишников С.В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Компьют. оптика*. 2007. Т. 31, № 2. С. 21–25.
21. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трёхмерных объектов. Патент РФ № 2433372, приоритет 10.11.11.
22. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения геометрии трёхмерных объектов. Патент РФ № 2439489, приоритет 15.09.2010.

UDC 681.786.4

**ADAPTIVE DATA PROCESSING ALGORITHM
UNDER THE CONDITIONS OF ADDITIVE PHOTODETECTOR
INTERFERENCE IN THE PROBLEMS
OF MEASURING THREE-DIMENSIONAL GEOMETRY
BY PHASE TRIANGULATION METHODS**

© 2023 S. V. Dvoynishnikov^a, G. V. Bakakin^b, V. O. Zuev^c, V. G. Meledin^d

*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
pr. Akad. Lavrentyeva 1, Novosibirsk 630090, Russia*

E-mails: ^adv.s@mail.ru, ^bbakakin@itp.nsc.ru, ^cvlad.zuev.0017@mail.ru,
^dmeledin@itp.nsc.ru

Received 31.08.2022, revised 31.08.2022, accepted 29.09.2022

Abstract. The paper proposes an adaptive data processing algorithm for measuring a three-dimensional profile using phase triangulation methods under conditions of random additive noise and a limited dynamic range of a photodetector. The algorithm is based on a statistical analysis of the intensity distribution in the registered phase images and adaptive filtering. The method makes it possible to reduce the measurement error of three-dimensional geometry by phase triangulation methods and to measure the three-dimensional profile of complex profile objects with arbitrary light-scattering properties. The method is very promising for industrial use.

Keywords: 3D-geometry, phase triangulation, dynamic range, statistical analysis.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.104

REFERENCES

1. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? *Optics and Lasers Engrg.*, 2010, No. 48, pp. 133–140.
2. Gruber M., Hausler G. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation. *Optik*, 1992, No. 3, pp. 118–122.
3. Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G., Glavnyi V.G., Naumov I.V., Chubov A.S. Otsenka optimal'noi chastoty prostranstvennoi modulyatsii izlucheniya 3D-izmerenii [Estimation of the optimal frequency of spatial modulation of 3D measurement radiation]. *Izmerit. Tekhnika*, 2015, No. 5, pp. 24–27.
4. Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization. *Measurement*, 2019, Vol. 145, pp. 63–70.
5. Wankhede P., Kodey S., Kurra S., Radhika S. A low cost surface strain measurement system using image processing for sheet metal forming applications. *Measurement*, 2022, Vol. 187, article 110273; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110273>
6. Rudyk A., Semenov A., Kryvinska N., Semenova O. Study of phase and amplitude-phase methods for measuring a reactive element quality factor. *Measurement*, 2022, Vol. 187, article 110271; <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110271>
7. Jiang Y., Wang S., Qin H., Li B., Li Q. Similarity quantification of 3D surface topography measurements. *Measurement*, 2021, Vol. 186, article 110207; <https://doi.org/10.1088/1361-6501/2Fac1b41>

8. Dong Y., Li Z., Zhu L., Zhang X. Topography measurement and reconstruction of inner surfaces based on white light interference // *Measurement*. 2021. V. 186. Article 110199; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110199>
9. Guo F., Yang B., Zheng W., Liu S. Power frequency estimation using sine filtering of optimal initial phase. *Measurement*, 2021, Vol. 186, article 110165; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110165>
10. Fan J., Feng Y., Mo J., Wang S. , Liang Q. 3D reconstruction of non-textured surface by combining shape from shading and stereovision. *Measurement*, 2021, Vol. 185, article 110029; <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110029>
11. Wang H., Ma J., Yang H., Sun F., Wei Y., Wang L. Development of three-dimensional pavement texture measurement technique using surface structured light projection. *Measurement*, 2021, Vol. 185, article 110003; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110003>
12. Shi B., Ma Z., Ni X., Liu J., Liu H. A phase unwrapping method suitable for high frequency fringe based on edge feature. *Measurement*, 2021, Vol. 185, article 109938; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109938>
13. Zhang Y., Fan N., Wu Y., Wu G., Luo H., Yan J., Yang S., Liu F. Four-pattern, phase-step non-sensitive phase shifting method based on Carre algorithm. *Measurement*, 2021, Vol. 171, article 108762; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108762>
14. Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 2010, Vol. 65, No. 6, pp. 558–569; <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2010.06.003>
15. Li B., An Y., Capelleri D., Xu J., Zhang S. High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics. *Internat. J. Intell. Robot. Appl.*, 2017, Vol. 1, No. 1, pp. 86–103; <https://doi.org/10.1007/s41315-016-0001-7>
16. Matthias S., Kastner M., Reithmeier E. Evaluation of system models for an endoscopic fringe projection system. *Measurement*, 2015, Vol. 73, pp. 239–246; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.024>
17. Chu C., Yang H., Wang L. Design of a pavement scanning system based on structured light of interference fringe. *Measurement*, 2019, Vol. 145, pp. 410–418; <https://doi.org/10.1016/J.measurement.2019.02.058>
18. Koutecky T., Palousek D., Brandejs J. Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts. *Measurement*, 2016, Vol. 94, pp. 60–70; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.067>
19. Cao X., Xie W., Ahmed S.M., Li C.R. Defect detection method for rail surface based on line-structured light. *Measurement*, 2020, Vol. 159, article 107771; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107771>
20. Dvoynishnikov S.V. Ustoichivyi metod rasshifrovki interferogramm s poshagovym sdvigom [Stable method of decoding interferograms with step-by-step shift]. *Komp'yut. optika*, 2007, Vol. 31, No. 2, pp. 21–25.
21. Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. Sposob beskontaktnogo izmereniya lineinykh razmerov trekhmernykh ob'ektov [A method for non-contact measurement of linear dimensions of three-dimensional objects]. Russian Patent, No. 2433372, prioritet 10.11.11.
22. Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. Sposob beskontaktnogo izmereniya geometrii trekhmernykh ob'ektov [A method for non-contact measurement of the geometry of three-dimensional objects]. Russian Patent, No. 2439489, prioritet 15.09.2010.