

УДК 004.93

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-57-63

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕН С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Ю. Л. Караваев, кандидат физико-математических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
М. В. Караваева, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматриваются проблемы оценки качества строительных работ. Выявлены основные дефекты стен: отклонение стены от вертикали, выпуклости и вогнутости, отклонения углов сопряжения стен от значения в 90 градусов, конусность дверных и оконных проемов.

Представлен алгоритм функционирования системы технического зрения, позволяющей восстановить трехмерные координаты стен за счет анализа деформации структурированной сетки, проецируемой на них. Ключевыми объектами, по которым производится восстановление геометрии, являются пересечения горизонтальных и вертикальных линий контрастной сетки. Полученные координаты ключевых точек сравниваются с координатами ключевых точек в идеальном случае, т. е. при проекции на абсолютно ровную вертикальную плоскость.

Представлена формула расчета отклонения от вертикали для каждой ключевой точки. Для точной классификации дефектов и определения их количественных характеристик, а также расчета объема материалов для их устранения предложен метод аппроксимации полученных дискретных значений аналитически заданной поверхностью. Рассмотрены наиболее применимые виды поверхностей второго порядка.

В рамках исследования на основе разработанного алгоритма планируется создание функционального программного обеспечения с удобным пользовательским интерфейсом и оценка разработанной системы на практике.

Ключевые слова: техническое зрение, дефекты стен, структурированная подсветка, алгоритм оценки.

Введение

В настоящее время процесс оценки качества строительных работ является достаточно сложным, многоэтапным и не всегда объективным. Так, например, оценка ровности стен осуществляется с помощью простых измерительных средств (уровень, рулетка), и ее эффективность напрямую зависит от того, в каких точках и с какой долей ответственности проводили измерения. Кроме того, данный процесс занимает длительное время и в дальнейшем требует ручной обработки данных измерений.

Объективная оценка ровности стен напрямую влияет на возможность качественного проведения последующих работ (чистовой отделки), позволяет ускорить процесс приемки помещений или проведения экспертизы.

Целью данного исследования является разработка системы технического зрения и алгоритма ее функционирования для определения количественных характеристик дефектов стен зданий.

К основным дефектам геометрических характеристик стен относятся: отклонение стены от вертикали, выпуклости и вогнутости, отклонения углов сопряжения стен от значения в 90 градусов, конусность дверных и оконных проемов.

Максимально допустимые отклонения размеров приведены в СНиП 3.03.01–88 «Несущие и ограждающие конструкции», СНиП 3.04.01–87 «Изоляционные и отделочные покрытия». По результатам анализа данных нормативных документов, а также работ, посвященных анализу существующих дефектов [1, 2], выделены предельные отклонения наиболее показательных характеристик в зависимости от класса отделки поверхности штукатуркой (табл. 1).

Таблица 1. Технические требования и предельные отклонения при оштукатуривании поверхности
Table 1. Technical requirements and maximum deviations of plastering the surface

Требования	Класс штукатурки		
	Простая	Улучшенная	Высококачественная
Вертикальные отклонения, не более, мм/1 м	3	2	1
На всю высоту помещения, не более, мм	15	10	5
Горизонтальные отклонения, не более, мм/1 м	3	2	1

Данные значения могут быть использованы в качестве ключевых требований к точности системы технического зрения, которую предлагается использовать для оптимизации процесса оценки геометрических характеристик стен. Описание существующих систем технического зрения, их преимущества и области применения приведены в работе [3]. На основе проведенного анализа предложена проецируемая структурированная подсветка, которая является оптимальной по соотношению цены, качества и функций для поставленной задачи [4].

В данной работе рассматривается алгоритм функционирования системы технического зре-

ния, позволяющей восстановить трехмерные координаты стен за счет анализа деформации структурированной сетки, проецируемой на них. Основными элементами данной системы являются: камера, персональный компьютер и проекционная система. Описание данных элементов и функциональная схема предлагаемого решения представлены в работе [5].

Описание алгоритма оценки геометрических характеристик стен

В рамках исследования был разработан алгоритм распознавания дефектов стен с помощью системы технического зрения (рис. 1).

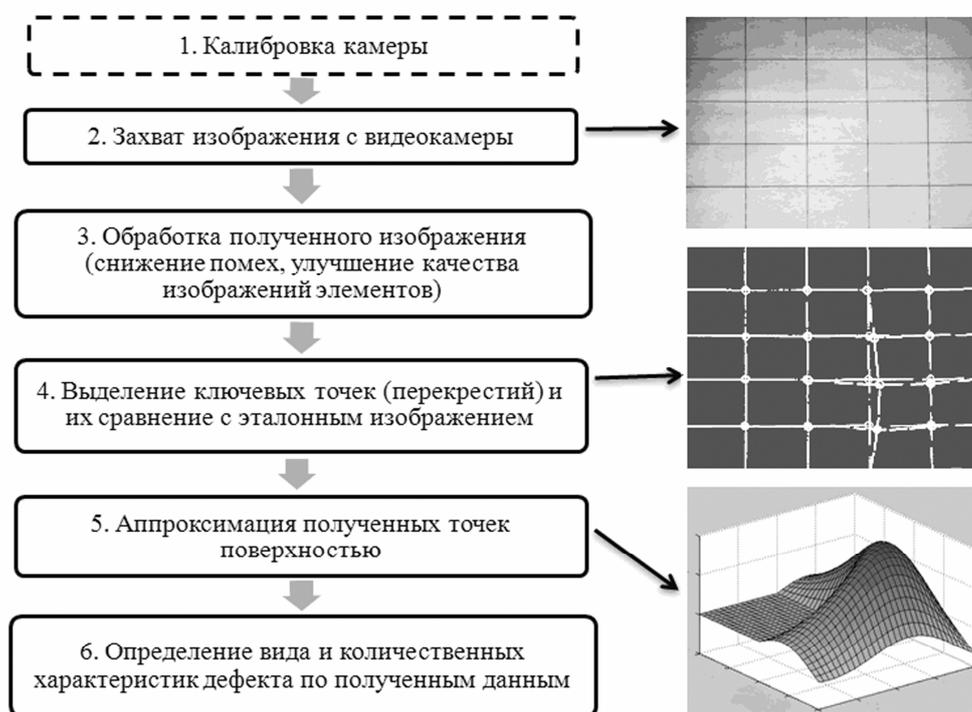


Рис. 1. Алгоритм распознавания дефектов стен с помощью системы технического зрения

Fig. 1. Wall defect recognition algorithm using a computer vision system

Рассмотрим более подробно этапы представленного алгоритма.

Процесс калибровки позволяет связать измерения в изображениях с метрическими величинами в реальности, он является фундаментальным и важным для задач компьютерного зрения, связанных с метрическими измерениями на основе изображений [6, 7]. При помощи калибровки фиксированная глобальная система координат преобразуется в систему координат камеры. Процесс калибровки выполняется непосредственно перед измерениями, и в дальнейшем при развитии предлагаемого метода планируется сделать его автоматизированным.

Захват изображения – процесс непосредственного получения кадра с видеокамеры системы технического зрения. После захвата изображения с камеры и учета модели камеры, полученной по результатам калибровки, с изображением выполнялся ряд операций, цель которых – увеличить качество характерных признаков, по которым восстанавливались геометрические характеристики стен. Существует большое количество методов, решающих задачи выделения существенных признаков на изображении, а также подходов их классификации [8–10]. Наиболее качественные результаты восстановления линий проецируемой контрастной сетки

на стены при различных уровнях освещенности получены при использовании метода Канни.

Ключевыми объектами, по которым производится восстановление геометрии, являются пересечения горизонтальных и вертикальных линий контрастной сетки. Причем точность восстановления геометрии стены напрямую зависит от шага сетки: чем он меньше, тем точность выше. Обработка изображений, как и процесс выделения ключевых точек реализованы с использованием функций библиотеки Open CV по градиентному методу [11, 12].

Далее полученные координаты ключевых точек сравниваются с координатами ключевых точек в идеальном случае, т. е. при проекции на абсолютно ровную вертикальную плоскость. Значения координат сетки в идеальном случае рассчитывается в процессе калибровки системы и хранятся в памяти для текущего расположения предлагаемой системы относительно стены. При наличии на стене дефектов проецируемое изображение исказится (см. пример на рис. 2).

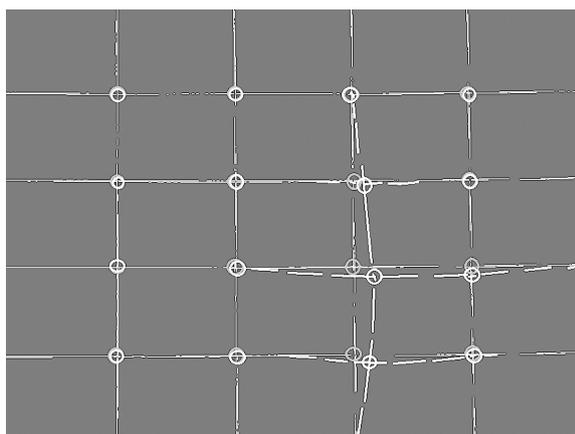


Рис. 2. Искажение проецируемого изображения при наличии дефекта

Fig. 2. Distortion of the projected image of defect

Отклонение от вертикали для каждой ключевой точки находится следующим образом:

$$\Delta r = \frac{-2r \pm \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{2},$$

где I – порядковый номер ключевой точки; r – расстояние от камеры до плоскости (измеряется в процессе калибровки); $\Delta x_i = x_i - \tilde{x}_i$; $\Delta y_i = y_i - \tilde{y}_i$; x_i, y_i – координаты точки на изображении, соответствующем идеальному расположению; \tilde{x}_i, \tilde{y}_i – координаты точки на изображении, спроецированном на стену.

Заключительным этапом предлагаемого алгоритма является аппроксимация полученных дискретных значений поверхностью, что позволит классифицировать дефект, определить количественные характеристики и рассчитать объем материалов для его устранения.

Для расчета объема материалов необходимо вычислить объем, ограниченный двумя пространственными поверхностями – идеальной вертикальной плоскостью и поверхностью, заданной дискретными значениями координат точек. В общем случае количество дискретных значений, которыми определяется поверхность, задающая реальную поверхность стены, может быть большим, поэтому удобнее находить ее аналитическое представление и далее использовать аналитические выражения для вычисления объемов.

Общий вид рассматриваемых поверхностей можно представить в виде

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gzx + 2Hxy + 2Px + 2Qy + 2Rz + D = 0, \quad (1)$$

где коэффициенты $A, B, C, D, F, G, H, P, Q, R$ – действительные числа. Значения данных коэффициентов определяются с помощью метода наименьших квадратов [13] для полученных координат ключевых точек искаженной проецируемой сетки

$$\sum_{i,j=1}^n \left((F(x_i, y_j) - r(x, y_i))^2 \right) \rightarrow \min,$$

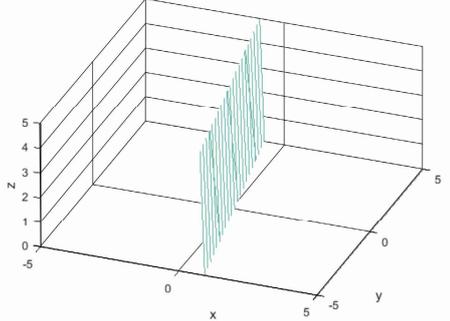
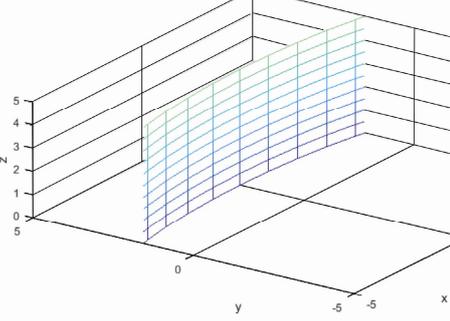
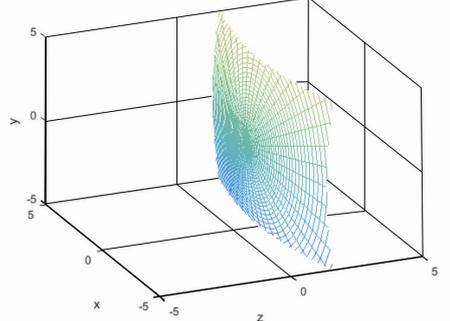
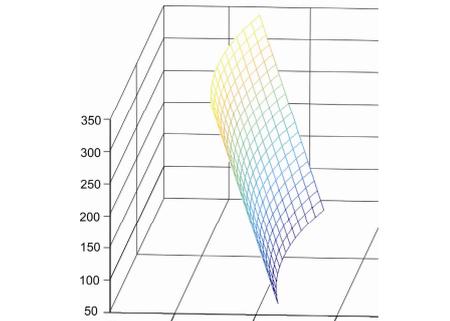
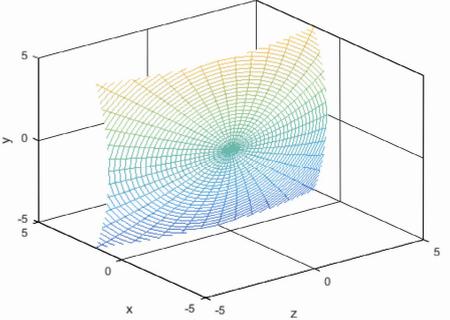
где $F(x_i, y_j)$ – дискретные значения аналитически заданной функции (1) в координатах (x, y_i) для выбранных значений коэффициентов; $r(x, y_i)$ – текущее измеренное значение расстояния, восстановленное по изображению в текущих координатах x_i, y_j .

Для описания поверхностей, заданных набором дискретных значений, в аналитическом виде необходимо аппроксимировать данные дискретные значения поверхностью второго порядка. При рассмотрении ограничимся основными видами поверхностей для упрощения дальнейших вычислений.

Для наглядности все рассматриваемые типы поверхностей второго порядка сведены в табл. 2, где в первом столбце приведено название поверхности, во втором – аналитическая запись, в третьем – графическое представление.

Таблица 2. Виды дефектов и их аналитическое представление

Table 2. Types of defects and their analytical description

Название поверхности	Аналитическое выражение	Графическое представление сегментов поверхностей, представляющих дефект
Плоскость	$ax + by + cz + d = 0$	
Эллиптический цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	
Однополостный гиперболоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	
Коническая поверхность	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	
Эллиптический параболоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z$	

В представленных формулах x, y, z – координаты точек в трехмерном пространстве; a, b, c – натуральные числа.

Имея аналитическую форму записи поверхности, в наибольшей степени повторяющую поверхность, проходящую через точки измерения, можно вычислить объем, ограниченный данной поверхностью и плоскостью, соответствующей идеально ровной и вертикальной стене. Для этого предлагается использовать метод численного интегрирования двухмерной поверхности:

$$S = h^2 \sum_{i=1}^{n^2} f\left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2}, \frac{y_i + y_{i-1}}{2}\right) - d^2 \sum_{i=1}^{k^2} r\left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2}, \frac{y_i + y_{i-1}}{2}\right),$$

где n, k – число разбиений по осям; h, d – величина разбиений; S – объем материала, который потребуется для восстановления ровности стены или устранения дефекта.

Заключение

Предлагаемая методика восстановления геометрии стен зданий позволяет значительным образом сократить время на оценку качества строительных работ, автоматизировать данный процесс, с большей точностью определить вид дефекта и его количественные характеристики, а также спрогнозировать количество необходимого материала для устранения выявленных дефектов. Восстановление трехмерных координат стены за счет использования системы технического зрения со структурированной подсветкой является значительно более дешевым решением по сравнению с трехмерными сканерами, а точность предлагаемой методики достаточна для обеспечения требований, предъявляемых соответствующими нормативными документами.

В настоящее время в рамках исследования на основе разработанного алгоритма планируется создание функционального программного обеспечения с удобным пользовательским интерфейсом и оценка разработанной системы на практике. Кроме того, технологии трехмерного сканирования зданий в последнее время стали активно использоваться для восстановления фасадов и объектов декора, представляющих историческую ценность [14, 15]. Точность восстановления геометрии стен может быть повышена в дальнейшем при использовании специализированной лазерной проецируемой системы, которая позволит проецировать более сложные структурированные шаблоны [16]. Для автоматизации процесса измерения данную систему технического зрения можно установить на мо-

бильное основание [17] и проводить измерения автономно.

Библиографические ссылки

1. Bakri N.N.O., Mydin M.A.O. General building defects: causes, symptoms and remedial work. *European Journal of Technology and Design*, 2014, no. 1, pp. 4-17.
2. Galieva A.B. Defects search during the inspection of civil and industrial buildings and structures on the basis of laser scanning technology and information modeling approach (BIM). *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2018, vol. 146, p. 01007.
3. Karavaeva M.V. [Analysis of computer vision systems applied for evaluation of the geometric characteristics of building wall] // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : материалы VIII Междунар. конф. (Россия, Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.) : в 2 т. Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. Т. 2. С. 437–440.
4. Pribanic T., Mrvos S., Salvi J. Efficient multiple phase shift patterns for dense 3D acquisition in structured light scanning. *Proc. Image and Vision Computing*, 2010, vol. 28, no. 8, pp. 1255-1266.
5. Каравеева М. В. Определение количественных характеристик дефектов стен зданий по искажению проецируемой структурированной сетки // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. № 4. С. 40–44.
6. Sagawa R. Calibration of lens distortion by structured-light scanning. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005, pp. 832-837.
7. Chen C., Kak A. Modeling and calibration of a structured light scanner for 3-D robot vision. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1987, vol. 4, pp. 807-815.
8. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2006. 1072 с.
9. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2007. 584 с.
10. Шаниро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
11. Culjak I. A brief introduction to OpenCV. *Proc. 35th international convention MIPRO*. IEEE, 2012, p. 1725-1730.
12. Laganieri R. Open CV Computer Vision Application Programming Cook book Second Edition. Packt Publ. Ltd, 2014, 376 p.
13. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М. : Наука, 1980. 608 с.
14. Dorninger P., Pfeifer N. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction and regularization from airborne laser scanning point clouds. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 11, p. 7323-7343.
15. Pu S., Vosselman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, vol. 64, no. 6, pp. 575-584.
16. Hidayatullah P., Zuhdi M. Color-texture based object tracking using HSV color space and local binary

pattern. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2015, vol. 7, no. 2, p. 161.

17. Карavaев Ю. Л., Клековкин А. В., Лесин С. К. Мультисенсорная информационно-измерительная система мобильного робота для реализации движения в недетерминированной среде // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. Т. 4. С. 111–115.

References

1. Bakri N.N.O., Mydin M.A.O. General building defects: causes, symptoms and remedial work. *European Journal of Technology and Design*, 2014, no. 1, pp. 4-17.

2. Galieva A.B. Defects search during the inspection of civil and industrial buildings and structures on the basis of laser scanning technology and information modeling approach (BIM). *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2018, vol. 146, p. 01007.

3. Karavaeva M. V. [Analysis of computer vision systems applied for evaluation of the geometric characteristics of building wall]. *Tekhnicheskie universitety: integratsiya s evropeiskimi i mirovymi sistemami obrazovaniya : materialy VIII Mezhdunar. konf. (Rossiya, Izhevsk, 23-24 aprelya 2019 g.)* [Proc. VIII International conference “Technical universities: integration with European and world education systems” (Russia, Izhevsk, April 23-24, 2019)]. Izhevsk, IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova Publ., 2019, vol. 2, pp. 437-440.

4. Pribanic T., Mrvos S., Salvi J. Efficient multiple phase shift patterns for dense 3D acquisition in structured light scanning. *Proc. Image and Vision Computing*, 2010, vol. 28, no. 8, pp. 1255-1266.

5. Karavaeva M.V. [Determination of the quantitative characteristics of building wall defects due to distortion of the structured light]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 4, pp. 40-44 (in Russ.).

6. Sagawa R. Calibration of lens distortion by structured-light scanning. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005, pp. 832-837.

7. Chen C., Kak A. Modeling and calibration of a structured light scanner for 3-D robot vision. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1987, vol. 4, pp. 807-815.

8. Gonzales R., Woods R. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2006, 1072 p. (in Russ.).

9. Jane B. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007, 584 p. (in Russ.).

10. Shapiro L., Stokman Dzh. *Komp'yuternoe zrenie* [Computer vision]. Moscow, BINOM, Laboratorija znaniy Publ., 2006, 752 p. (in Russ.).

11. Culjak I. A brief introduction to OpenCV. *Proc. 35th international convention MIPRO*. IEEE, 2012, p. 1725-1730.

12. Laganieri R. *Open CV Computer Vision Application Programming Cook book Second Edition*. Packt Publ. Ltd, 2014, 376 p.

13. Marchuk G.I. *Metody vychislitel'noj matematiki* [Methods of Computational Mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 608 p. (in Russ.).

14. Dorninger P., Pfeifer N. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction and regularization from airborne laser scanning point clouds. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 11, p. 7323-7343.

15. Pu S., Vosselman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, vol. 64, no. 6, pp. 575-584.

16. Hidayatullah P., Zuhdi M. Color-texture based object tracking using HSV color space and local binary pattern. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2015, vol. 7, no. 2, p. 161.

17. Karavaev J.L., Klekovkin A.V., Lesin S.K. [Multisensory information and measurement system of mobile robot for implementation of motion in non-deterministic environment]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, vol. 4, pp. 111-115 (in Russ.).

Development of an Algorithm for Evaluation of Geometric Characteristics of Walls by Computer Vision System

Yu.L. Karavaev, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

M.V. Karavaeva, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper considers the problems of assessing the quality of construction work. The main defects of the walls are revealed: the deviation of the wall from verticality, convexity and concavity, deviations of wall angles from 90 degrees, the taper of door and window openings.

The algorithm of the operating of the computer vision system is presented. It allows for restoring the three-dimensional coordinates of walls by analyzing the deformation of the structured grid projected to them. The key objects for reconstructing the geometry are the intersections of the horizontal and vertical lines of the contrast grid. The obtained coordinates of the key points are compared with the coordinates of the key points in the ideal case, i.e. when projected to an absolutely vertical plane.

The formula for calculating the deviation from the vertical for each key point is presented. The method for approximating the obtained discrete values by an analytically given surface is proposed. It allows to accurately classify defects and determine their quantitative characteristics, as well as calculate the volume of materials to eliminate them. The most applicable types of second-order surfaces are considered.

As part of the study, it is planned to create functional software with a convenient user interface, based on the developed algorithm, and evaluate the developed system in practice.

Keywords: computer vision, wall defects, structured light, evaluation algorithm.

Получено 15.11.2019

Образец цитирования

Караваяев Ю. Л., Караваяева М. В. Разработка алгоритма оценки геометрических характеристик стен с помощью системы технического зрения // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 57–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-57-63.

For Citation

Karavaev Yu.L., Karavaeva M.V. [Development of an Algorithm for Evaluation of Geometric Characteristics of Walls by Computer Vision System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 57-63 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-57-63.