

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРОПЛАТФОРМЫ

С. Май¹, С. Бяо², Ц. Хуэй³, П. Минцзин¹, Ч. Ао¹, Д. Чжаовэнь¹, Е. Чжифэн¹

¹Нанкинский университет авиации и космонавтики,
Нанкин, 210016, Китайская Народная Республика
²Колледж Лонгдун,
Цинъюань, 745000, Китайская Народная Республика
³Харбинский технологический институт,
Сучжоу, 215000, Китайская Народная Республика

Для более точного измерения деформации оборудования под воздействием вибрации в лабораторных условиях авторы внедрили улучшенный метод преобразования Хафа для калибровки, а затем провели исследование с помощью виброплатформы. В ходе экспериментов разработанный метод был успешно применен для изучения влияния вибрации на различные типы оборудования. Соответствующие данные и результаты успешно доказали эффективность использования вышеописанного процесса.

Ключевые слова: преобразование Хафа, фотограмметрия, анализ маркеров, виброплатформа, деформация оборудования, высокоскоростные вычисления.

Введение

Все виды промышленного и военного оборудования подвержены воздействию вибрации во время работы, особенно прецизионные системы, где влияние вибрации на точность особенно выражено. Вибрация возникает в результате активных сигналов двигателя или пассивных сигналов окружающей среды, и в любом случае наличие вибрации влияет на оборудование при длительной работе.

Необходимым условием исследования является измерение сигналов. Использование точек маркировки на оборудовании для анализа состояния деформации оборудования является эффективным средством измерения, метод прост и легко реализуем, требования к оборудованию просты, и на эту методику обращают внимание все больше инженеров и техников [1, 2].

В статье объединены основные научно-исследовательские проекты, выполненные нашей лабораторией. В ней анализируется деформация оборудования в экспериментальной среде трясущегося стола с использованием точек маркировки, обработанных методом преобразования Хафа, в качестве эталона и данного усовершенствованного метода.

Теория и дизайн Преобразование Хафа

Преобразование Хафа — это метод выделения признаков [3, 4]. Оно может быть использовано как метод выделения признаков определенной формы в изображении и находит применение в анализе изображений, компьютерном зрении и цифровой обработке изображений. Цель состоит в том, чтобы найти несовершенные экземпляры объекта в пределах определенного типа фигуры с помощью процедуры голосования. Процедура голосования

выполняется в пространстве параметров, где объекты-кандидаты получают как локальные максимумы в так называемом пространстве аккумуляторов, причем пространство аккумуляторов явно строится алгоритмом, используемым для вычисления преобразования Хафа.

Самым простым преобразованием Хафа является выделение прямых линий (сегментов линий) из черно-белого изображения. Основное преимущество преобразования Хафа заключается в том, что оно допускает пробелы в описании границ объекта и относительно не подвержено влиянию шума изображения [5, 6].

Преобразование Хафа является простейшим для обнаружения прямых линий. Известно, что уравнение прямой линии может быть представлено наклоном и перехватом (такое представление называется наклоном-перехватом) следующим образом:

$$y = mx + b. \quad (1)$$

Если выразить его в пространстве параметров, то это будет (b, m) , т.е. прямая линия может быть представлена наклоном и перехватом. Но это параметризовало бы проблему, наклон перпендикулярной линии не существует (или бесконечен), что делает значение параметра наклона m близким к бесконечному [7, 8]. По этой причине для улучшения вычислений Ричард О. Дуда и Питер Э. Харт в апреле 1971 г. предложили нормальную форму Гесса (Hesse normal form):

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (2)$$

где r — расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой, а θ — угол между осью x и прямой, соединяющей начало координат и ближайшую точку, как показано на рис. 1.

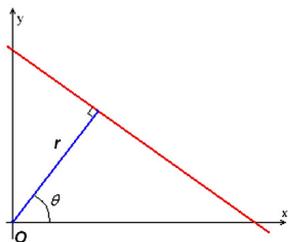


Рис. 1. Схематическая диаграмма
Fig. 1. Schematic diagram

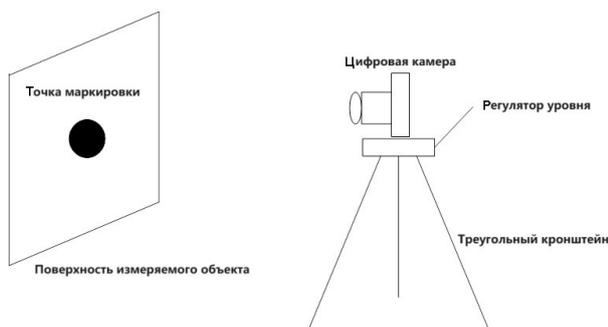


Рис. 2. Схема фотограмметрической системы
Fig. 2. Photogrammetric system schematic

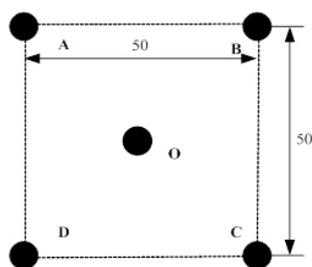


Рис. 3. Размеры отмеченных вручную точек
Fig. 3. Dimensions of manually marked points

Таким образом, можно связать каждую линию изображения с парой параметров (r, θ) . Эту плоскость с параметрами (r, θ) иногда называют пространством Хафа для набора двумерных прямых. Если задана единственная точка на плоскости, то набор всех прямых, проходящих через эту точку, соответствует синусоидальной кривой в плоскости (r, θ) , которая уникальна для этой точки. Набор из двух или более точек, образующих прямую, даст синусоидальную кривую, пересекающуюся в точке (r, θ) этой прямой. Соответствующие кривые ковариантных точек имеют общие точки пересечения. Таким образом, задача обнаружения ковариантных точек может быть преобразована в задачу поиска совпадающих кривых [9, 10], то есть нахождения точек пересечения в пространстве Хафа, образованном каждой кривой.

Высокоскоростной фотограмметрический метод

В качестве измерительного инструмента для проведения поставленных экспериментов использовалась цифровая видеокамера SONY HDR-SR12,

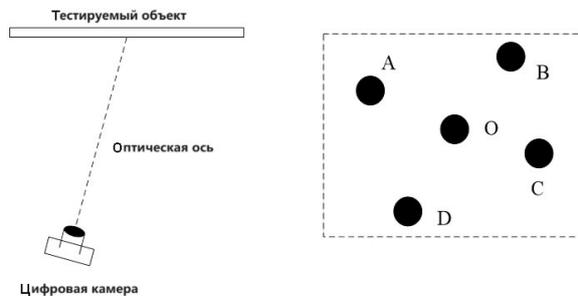


Рис. 4. Изображение искусственно помеченных областей в ПЗС-матрицах
Fig. 4. Imaging of artificially marked regions in CCDs

как показано на рис. 2. Камера имеет предельную частоту дискретизации до 800 фм/с при максимальном разрешении [11, 12], что позволяет удовлетворить требование низкой частоты дискретизации при испытаниях модели шейкера [13, 14]. Ручная маркировка точек, показанных на рис. 2, была выполнена путем печати графиков на белой глянцевой бумаге. В частности, на рис. 3 показано, что A, B, C, D, O представляют собой центры масс пяти сплошных окружностей, $ABCD$ — квадрат с длиной стороны 50 мм, а центральная точка O расположена в центре квадрата $ABCD$, радиус которого равен 5 мм. При наклеивании на глянцевую бумагу искусственной метки в точке измеряемого смещения следует обратить внимание на то, чтобы AD, BC располагались в вертикальном направлении, а для корректировки направления можно использовать отвес. Определить центр знака O до и после деформации центра тяжести можно по координатам, полученным до и после деформации конструкции в центре знака смещения точки.

Принцип калибровки системы

Искусственные маркеры, изготовленные в данном эксперименте, должны держать AD и BC вертикально вниз, когда они прикреплены к поверхности конструкции, а в процессе измерений мы должны стараться избегать чрезмерных углов между оптической осью объектива и горизонтальной плоскостью во время деформации при фотографировании конструкции. На рис. 4 показан один из наиболее часто используемых в реальной съемке способов [15, 16]: оптическая ось объектива не перпендикулярна плоскости искусственного маркера, а нижний край камеры расположен негоризонтально.

Длина отрезка BC на изображении меньше длины AD , а AD и BC не параллельны оси u системы координат изображения. В данной работе предполагается, что отрезок AD параллелен BC . Смещение искусственной опорной точки до и после деформации конструкции показано на рис. 5.

Точка разметки до деформации — $ABCD O$, точка разметки после деформации — $A_1 B_1 C_1 D_1 O_1$, пиксельные координаты центра масс круговой точки разметки до деформации — $A(x_1, y_1), B(x_3, y_3), C(x_4, y_4), D(x_2, y_2), O(x_0, y_0)$, а центр масс круговой маркировочной точки после деформации соответствует O , — $O_1(x_1, y_1)$. Боковое смещение H центра маркера O до и после деформации в пикселях может быть получено с помощью обработки изображений и т.д. Калибровочный коэффициент направления бокового смещения равен $\delta_{H'}$, а фактическое боко-

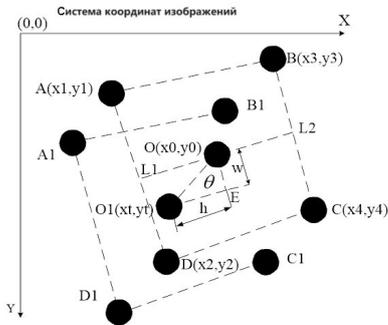


Рис. 5. Схема геометрического перемещения искусственных маркерных точек
Fig. 5. Schematic of the geometric displacement of artificial marker points

вое смещение равно $h = \delta_h \cdot H$, и следующий шаг заключается только в нахождении калибровочного коэффициента δ_h .

Следующим шагом является нахождение калибровочного коэффициента δ_h в направлении поперечного смещения. На рис. 5 направление линии $L1L2$ является направлением поперечного смещения O , линии $L1L2 \perp AD$, $L1L2 \perp BC$, а фактическая длина линии $L1L2$ составляет 50 мм, поэтому, получив длину пикселей $L1L2$, мы можем найти калибровочный коэффициент δ_h .

В системе координат изображения линейное уравнение отрезка AD имеет вид:

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

Упростить до:

$$(y_2 - y_1)x - (x_2 - x_1)y + (x_2 - x_1)y_1 - (y_2 - y_1)x_1 = 0 \quad (4)$$

Линейное уравнение BC имеет вид:

$$\frac{y - y_3}{x - x_3} = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \quad (5)$$

Упростить до:

$$(y_4 - y_3)x - (x_4 - x_3)y + (x_4 - x_3)y_3 - (y_4 - y_3)x_3 = 0 \quad (6)$$

Используя формулу расстояния от точки до прямой, вы можете найти длину пикселя от точки $B(x_3, y_3)$ до прямой AD :

$$d_b = \frac{|(y_2 - y_1)x_3 - (x_2 - x_1)y_3 + (x_2 - x_1)y_1 - (y_2 - y_1)x_1|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (7)$$

Аналогично длина пикселя от точки $C(x_4, y_4)$ до отрезка AD равна:

$$d_c = \frac{|(y_2 - y_1)x_4 - (x_2 - x_1)y_4 + (x_2 - x_1)y_1 - (y_2 - y_1)x_1|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (8)$$

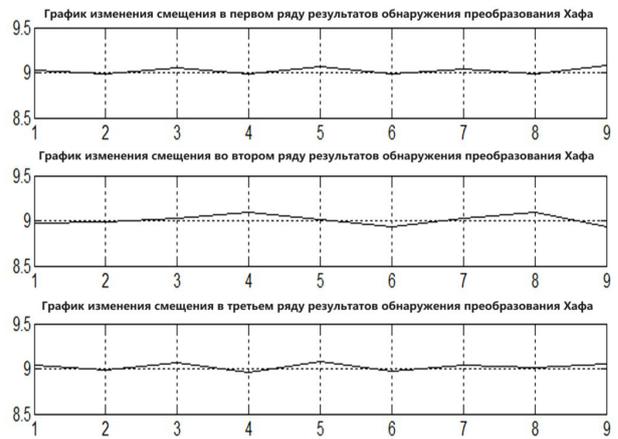


Рис. 6. Изменение смещения результатов обнаружения с помощью преобразования Хафа
Fig. 6. Displacement variation of Hough transform detection results

Длина пикселя $L1L2$ может быть получена как:

$$L_{L1L2} = \frac{d_b + d_c}{2} \quad (9)$$

В свою очередь, можно вывести

$$\delta_h = \frac{50}{L_{L1L2}} \quad (10)$$

δ_h — калибровочный коэффициент для полученного бокового направления смещения. Поскольку длины L_{L1O} и L_{L12} при съемке не равны, в данной работе в качестве значения калибровочного коэффициента δ_h в поперечном направлении смещения используется половина общей длины $L1L2$, что является лишь приблизительным способом.

Экспериментальное исследование

Были проведены экспериментальные исследования для проверки точности метода обнаружения смещения, описанного в разделе «Принцип калибровки системы».

Данный метод используется для проверки результатов обнаружения (рис. 5) после преобразования Хафа, поскольку расстояние между двумя точками маркировки составляет 9 мм. Графический анализ рис. 6, полученного в разработанной программе на основе MATLAB, показал, что кривая изменяется вблизи 9 мм, а максимальная ошибка составляет 1,1 %.

Результаты показывают, что использование преобразования Хафа для определения центральных координат круговых точек маркеров и применение алгоритма обнаружения деформации из предыдущего раздела позволяет получить изменение смещения точек маркеров.

Конкретная конструкция будет проверена в ходе экспериментов на вибростолу. Во время горизонтальной вибрации столешницы смещение в вертикальном направлении очень мало, что вызвано вибрацией столешницы и может быть проигнорировано. Поскольку точки G и H находятся очень близко к столу, деформационное смещение в процессе вибрации стола очень мало, и им также можно пренебречь. Поэтому мы в основном рас-

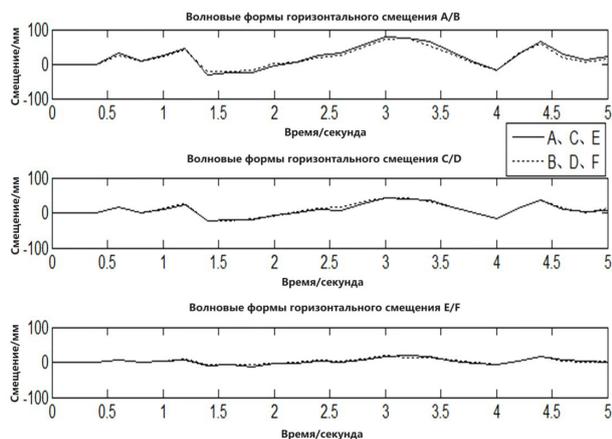


Рис. 7. Горизонтальное смещение каждой точки маркировки
Fig. 7. Horizontal displacement of each marking point

считываем горизонтальное смещение и деформацию каждой точки маркировки при горизонтальной вибрации стола.

Данные испытаний обрабатываются, и результаты показывают, что изменения смещения вибрирующего объекта могут быть рассчитаны (рис. 7).

Поскольку точки *A* и *B*, *C* и *D*, *E* и *F* находятся на одной высоте, из рис. 7 видно, что чем дальше от поверхности стола, тем больше виброперемещение; виброперемещение точки маркировки той же высоты хорошо повторяется; в определенный момент виброперемещение двух точек той же высоты немного отличается, что указывает на то, что образец был в определенной степени скручен во время вибрации, и измерение деформации было выполнено с помощью такого подхода.

Выводы

Технология высокоскоростной фотограмметрии применяется для испытания структурной модели трясущегося стола, а преобразование Хафа позволяет достичь относительно высокой точности в процессе определения центра окружности точки маркировки. По сравнению с методом обычных контактных датчиков, этот метод является более точным и может широко использоваться в испытаниях на обнаружение деформации структурной модели трясущегося стола. Применение фотограмметрии относительно просто и может одновременно захватить большое количество информации о структурной модели, не контактирует с тестируемым объектом, не мешает ему и обладает высокой степенью интеллектуальности.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность за значительную поддержку, оказанную Нанкинским университетом авиации и астронавтики, колледжем энергетики и энерготехники.

Список источников

1. Zhang Z., He L., Qi Y. [et al.]. Polarizing image fusion-based pose-measuring approach considering the measuring baseline for hand-eye calibration of a SCARA robot // *Optics and*

Lasers in Engineering. 2024. Vol. 181. P. 108437–108437. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108437.

2. Murata N., Toda H., Ubukata H. [et al.]. Development of Automated Visual Acuity Measurement Using a Calibration-Free Eye-Tracking System // *Cureus*. 2024. Vol. 16 (7). e64401. DOI: 10.7759/cureus.64401.

3. Romanengo Ch., Falcidieno B., Biasotti S. Extending the Hough transform to recognize and approximate space curves in 3D models // *Computer Aided Geometric Design*. 2024. Vol. 113. P. 102377–102377. DOI: 10.1016/j.cagd.2024.102377.

4. Sundari L. K. Sowmya, Mallikarjuna M. K., Halakeri Pooja [et al.]. Semi-automatic Labeling of Satellite Images Using Texture Features and Hough Circle Transformation // *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. DOI: 10.1007/S42979-024-02834-0.

5. Ristori L. A new track finding algorithm based on a multi-dimensional extension of the Hough Transform // *Journal of Instrumentation*. Vol. 19. 2024. DOI: 10.1088/1748-0221/19/05/P05011.

6. Pala M. A., Yıldız M. Z. Improving cellular analysis throughput of lens-free holographic microscopy with circular Hough transform and convolutional neural networks // *Optics and Laser Technology*. 2024. Vol. 176. 110920. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110920.

7. Alfonsi F., Del Corso F., Gabrielli A. Hough Transform FPGA solution for High Energy Physics online fast tracking // *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19 (02). C02070. DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/C02070.

8. Sagae K., Nishimura T., Nakahara H. [et al.]. Fine Structure of Tremor Migrations Beneath the Kii Peninsula, Southwest Japan, Extracted With a Space-Time Hough Transform // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2023. Vol. 128 (6). DOI: 10.1029/2022JB026248.

9. Guddhur J. P., Sreepathi B. IrisSeg-drunk: enhanced iris segmentation and classification of drunk individuals using Modified Circle Hough Transform // *Iran Journal of Computer Science*. 2023. Vol. 7. P. 41–54. DOI: 10.1007/S42044-023-00157-6.

10. Chiara R., Fugacci U., Falcidieno B. [et al.]. Piecewise polynomial approximation of spatial curvilinear profiles using the Hough transform // *Applied Mathematics and Computation*. 2023. Vol. 457 (6). 128213. DOI: 10.1016/j.amc.2023.128213.

11. Liu X., Li Sh., Zhang D., [et al.]. High-Speed Videogrammetry with Mutually Guided Target Tracking under Occlusion for Masonry Building Structure Displacement on a Shaking Table // *Buildings*. 2023. Vol. 13 (12). DOI: 10.3390/buildings13122959.

12. Rivera Y., Bidon M., Mucoz-Cobo J. L. [et al.]. A Comparative Analysis of Conductance Probes and High-Speed Camera Measurements for Interfacial Behavior in Annular Air–Water Flow // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (20). 8617. DOI: 10.3390/S23208617.

13. André H., Leclère Q., Anastasio. D. [et al.]. Using a smartphone camera to analyse rotating and vibrating systems: Feedback on the SURVISHNO 2019 contest // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 154. 107553. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107553.

14. Koračin N., Zupančič M., Vrečer F. [et al.]. Characterization of the spray droplets and spray pattern by means of innovative optical microscopy measurement method with the high-speed camera // *International journal of pharmaceutics*. 2022. Vol. 629. P. 122412–122412. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2022.122412.

15. Liu X., B. Hu, Y. Yin [et al.]. Parallel camera network: Motion-compensation vision measurement method and system for structural displacement // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 165. P. 105559–105559. DOI: 10.1016/j.autcon.2024. 105559.

16. Liu X., Li Sh., Zhang D. [et al.]. High-Speed Videogrammetry with Mutually Guided Target Tracking under Occlusion for Masonry Building Structure Displacement on a Shaking Table // *Buildings*. 2023. Vol. 13 (12). DOI: 10.3390/buildings13122959.



МАЙ СИНЬ, кандидат наук, старший инженер Ключевой лаборатории аэрокосмических энергетических систем провинции Цзянсу Колледжа энергетике и энергетического машиностроения Нанкинского университета авиации и астронавтики, Нанкин, Китайская Народная Республика. ORCID: 0000-0002-6977-0113

Адрес для переписки: xinmai_xm@nuaa.edu.cn

БЯО СЮЭ, магистр, доцент Школы электротехники Колледжа Лонгдун, Цинъян, Китайская Народная Республика.

Адрес для переписки: Xuebiao_lutqy@163.com

ХУЭЙ ЦИНЬ, технический директор, старший инженер Научно-исследовательского института Сучжоу Харбинского технологического института, Сучжоу, Китайская Народная Республика.

Адрес для переписки: qinhui_nustt@163.com

МИНЦЗИН ПЭЙ, кандидат наук, старший инженер Колледжа искусственного интеллекта Нанкинского университета авиации и астронавтики, Нанкин, Китайская Народная Республика.

Адрес для переписки: reimj@wxc.edu.cn

АО ЧЖОУ, кандидат наук, старший инженер Колледжа автоматизированного проектирования Нанкинского университета авиации и астронавтики, Нанкин, Китайская Народная Республика. ORCID: 0009-0008-2727-856X

Адрес для переписки: ao.zhou@nuaa.edu.cn

ЧЖАОВЭНЬ ДЭН, кандидат наук, старший инженер Ключевой лаборатории аэрокосмических энергетических систем провинции Цзянсу Колледжа энергетике и энергетического машиностроения Нанкинского университета авиации и астронавтики, Нанкин, Китайская Народная Республика.

Адрес для переписки: dengzw_qc@huat.edu.cn

ЧЖИФЭН Е, доктор технических наук, профессор Ключевой лаборатории аэрокосмических энергетических систем провинции Цзянсу Колледжа энергетике и энергетического машиностроения Нанкинского университета авиации и астронавтики, Нанкин, Китайская Народная Республика.

Адрес для переписки: yezhifeng@nuaa.edu.cn

Для цитирования

Май С., Бяо С., Хуэй Ц., Минцзин П., Ао Ч., Чжаовэнь Д., Чжифэн Е. Исследование деформации оборудования на основе высокоскоростной съемки с использованием виброплатформы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 80–86. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-80-86.

Статья поступила в редакцию 23.09.2024 г.

© С. Май, С. Бяо, Ц. Хуэй, П. Минцзин, Ч. Ао,

Д. Чжаовэнь, Е. Чжифэн

STUDY OF EQUIPMENT DEFORMATION BASED ON HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY USING A VIBRATING PLATFORM

X. Mai¹, X. Biao², Q. Hui³, P. Mingjing¹, Zh. Ao¹, D. Zhaowen¹, Y. Zhifeng¹

¹Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, People's Republic of China

²Longdong University,
Qingyang, People's Republic of China

³Harbin Institute of Technology,
Suzhou, People's Republic of China

To better measure equipment deformation due to vibration in a laboratory environment the project team has introduced an improved Hough transform method for calibration and then carried out the study with the help of a vibration platform. Through experiments, the designed method is successfully used to study the effects of vibration on various types of equipment. The corresponding data and results have successfully proved the effectiveness of using the above process.

Keywords: Hough transform, photogrammetry, marker analysis, vibrating platform, equipment deformation, high-speed computing.

Acknowledgements

We would like to express our deep gratitude for the support provided by Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Power and Energy Engineering.

References

1. Zhang Z., He L., Qi Y. [et al.]. Polarizing image fusion-based pose-measuring approach considering the measuring baseline for hand-eye calibration of a SCARA robot // *Optics and Lasers in Engineering*. 2024. Vol. 181. P. 108437–108437. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108437. (In Engl.).
2. Murata N., Toda H., Ubukata H. [et al.]. Development of Automated Visual Acuity Measurement Using a Calibration-Free Eye-Tracking System // *Cureus*. 2024. Vol. 16 (7). e64401. DOI: 10.7759/cureus.64401. (In Engl.).
3. Romanengo Ch., Falcidieno B., Biasotti S. Extending the Hough transform to recognize and approximate space curves in 3D models // *Computer Aided Geometric Design*. 2024. Vol. 113. P. 102377–102377. DOI: 10.1016/j.cagd.2024.102377. (In Engl.).
4. Sundari L. K. Sowmya, Mallikarjuna M. K., Halakeri Pooja [et al.]. Semi-automatic Labeling of Satellite Images Using Texture Features and Hough Circle Transformation // *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. DOI: 10.1007/S42979-024-02834-0. (In Engl.).
5. Ristori L. A new track finding algorithm based on a multi-dimensional extension of the Hough Transform // *Journal of Instrumentation*. Vol. 19. 2024. DOI: 10.1088/1748-0221/19/05/P05011. (In Engl.).
6. Pala M. A., Yıldız M. Z. Improving cellular analysis throughput of lens-free holographic microscopy with circular Hough transform and convolutional neural networks // *Optics and Laser Technology*. 2024. Vol. 176. 110920. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110920. (In Engl.).
7. Alfonsi F., Del Corso F., Gabrielli A. Hough Transform FPGA solution for High Energy Physics online fast tracking // *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19 (02). C02070. DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/C02070. (In Engl.).
8. Sagae K., Nishimura T., Nakahara H. [et al.]. Fine Structure of Tremor Migrations Beneath the Kii Peninsula, Southwest

Japan, Extracted With a Space-Time Hough Transform // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2023. Vol. 128 (6). DOI: 10.1029/2022JB026248. (In Engl.).

9. Guddhur J. P., Sreepathi B. IrisSeg-drunk: enhanced iris segmentation and classification of drunk individuals using Modified Circle Hough Transform // *Iran Journal of Computer Science*. 2023. Vol. 7. P. 41–54. DOI: 10.1007/S42044-023-00157-6. (In Engl.).

10. Chiara R., Fugacci U., Falcidieno B. [et al.]. Piecewise polynomial approximation of spatial curvilinear profiles using the Hough transform // *Applied Mathematics and Computation*. 2023. Vol. 457 (6). 128213. DOI: 10.1016/j.amc.2023.128213. (In Engl.).

11. Liu X., Li Sh., Zhang D., [et al.]. High-Speed Videogrammetry with Mutually Guided Target Tracking under Occlusion for Masonry Building Structure Displacement on a Shaking Table // *Buildings*. 2023. Vol. 13 (12). DOI: 10.3390/buildings13122959. (In Engl.).

12. Rivera Y., Bidon M., Muñoz-Cobo J. L. [et al.]. A Comparative Analysis of Conductance Probes and High-Speed Camera Measurements for Interfacial Behavior in Annular Air–Water Flow // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (20). 8617. DOI: 10.3390/S23208617. (In Engl.).

13. André H., Leclère Q., Anastasio D. [et al.]. Using a smartphone camera to analyse rotating and vibrating systems: Feedback on the SURVISHNO 2019 contest // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 154. 107553. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107553. (In Engl.).

14. Koráčin N., Zupančič M., Vrečer F. [et al.]. Characterization of the spray droplets and spray pattern by means of innovative optical microscopy measurement method with the high-speed camera // *International journal of pharmaceutics*. 2022. Vol. 629. P. 122412–122412. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2022.122412. (In Engl.).

15. Liu X., B. Hu, Y. Yin [et al.]. Parallel camera network: Motion-compensation vision measurement method and system for structural displacement // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 165. P. 105559–105559. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105559. (In Engl.).

16. Liu X., Li Sh., Zhang D. [et al.]. High-Speed Videogrammetry with Mutually Guided Target Tracking under Occlusion for Masonry Building Structure Displacement on a

MAI XIN, PhD Candidate, Senior Engineer of Jiangsu Province Key Lab in Aerospace Power System, College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, People's Republic of China.

ORCID: 0000-0002-6977-0113

Correspondence address: xinmai_xm@nuaa.edu.cn

BIAO XUE, Master's Degree, Associate Professor of Electrical Engineering School, Longdong University, Qingyang, People's Republic of China.

Correspondence address: Xuebiao_lutqy@163.com

HUI QIN, Doctor of Technical Sciences, Technical Manager, Senior Engineer of Suzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Suzhou, People's Republic of China.

Correspondence address: qinhui_nustt@163.com

MINGJING PEI, PhD Candidate, Senior Engineer of College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, People's Republic of China.

Correspondence address: peimj@wxc.edu.cn

AO ZHOU, PhD Candidate, Senior Engineer of College of Automation Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing, People's Republic of China.

ORCID: 0009-0008-2727-856X

Correspondence address: ao.zhou@nuaa.edu.cn

ZHAOWEN DENG, PhD Candidate, Senior Engineer of Jiangsu Province Key Lab in Aerospace Power System, College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, People's Republic of China.

Correspondence address: dengzw_qc@huat.edu.cn

ZHIFENG Ye, Doctor of Technical Sciences, Professor of Jiangsu Province Key Lab in Aerospace Power System, College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, People's Republic of China.

Correspondence address: yezhifeng@nuaa.edu.cn

For citations

Mai X., Biao X., Hui Q., Mingjing P., Ao Zh., Zhaowen D., Zhifeng Y. Study of equipment deformation based on high-speed photography using a vibrating platform // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 80–86. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-80-86.

Received September 23, 2024.

© X. Mai, X. Biao, Q. Hui, P. Mingjing, Zh. Ao,

D. Zhaowen, Y. Zhifeng