


Формирование панорамного изображения внутренней поверхности трубы

А.С. Лошкарев 

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Обоснование. Визуальный неразрушающий контроль внутренней поверхности труб является важным аспектом при их производстве и эксплуатации. Вовремя обнаруженный и устраненный дефект может существенно сократить количество брака при производстве и предотвратить различные чрезвычайные происшествия при эксплуатации. Формирование полного панорамного изображения внутренней поверхности труб, пригодных для анализа качества, является актуальной и востребованной задачей, которая может быть решена с помощью систем компьютерного зрения. **Цель.** Исследование и разработка телевизионных методов формирования полного панорамного изображения внутренней поверхности трубы, которое можно анализировать для поиска дефектов. **Методы.** Для формирования цилиндрического панорамного изображения использованы математические модели формирования эквидистантной проекции сферических изображений, полученных с помощью объектива Fisheye. Для качественной сшивки полученных кадров использовались методы цифровой обработки изображений, включающие преобразования яркости и контраста, поиск особых точек алгоритмом MSER. Теоретические результаты проверены методом натурального моделирования. **Результаты.** Результатом данной работы является алгоритм сшивки кадров видеопоследовательности, сформированной телевизионной камерой с оптической системой типа Fisheye, равномерно перемещаемой вдоль продольной оси трубы, в единое панорамное изображение внутренней поверхности. **Заключение.** Алгоритм обеспечивает формирование качественного изображения полной панорамы внутренней поверхности труб с отсутствием ярких артефактов.

Ключевые слова – телевизионная камера; видеопоследовательность; объектив Fisheye; панорамное изображение; особые точки; внутренняя поверхность трубы; алгоритм MSER.

Введение

При производстве, ремонте и инспекции труб в различных областях народного хозяйства контроль внутренней поверхности, как правило, выполняет специально обученный оператор, который производит визуальный контроль каждой трубы с целью поиска дефектов. При подозрении на наличие дефекта в трубу вводится видеоэндоскоп, и на экране видеоконтрольного устройства детально просматривается подозрительный участок. Исключить субъективные факторы и автоматизировать операцию контроля качества можно с помощью системы компьютерного зрения, которая представляет собой аппаратно-программный комплекс с высокоразрешающей ТВ-камерой, оснащенной сверхширокоугольным объективом и равномерно перемещаемой внутри трубы. Для удобства анализа получаемой видеоинформации ее целесообразно представлять в виде цилиндрической панорамы внутренней поверхности, изображение которой может являться паспортом качества трубы. Формирование такой панорамы является одной из главных задач системы компьютерного зрения.

Для формализации алгоритма построения панорамного изображения внутренней поверхности рассмотрим модель, показанную на рис. 1. Модель включает видеокамеру, находящуюся внутри цилиндрического объекта (трубы), оптическая ось которой совмещена с продольной осью симметрии трубы.

В модели используется несколько систем координат.

1. Трехмерная система координат камеры $X_C Y_C Z_C$, начало которой O совпадает с оптическим центром объектива, а ось глубины Z_C – с продольной осью симметрии трубы. На расстоянии OF по оси Z_C , которое равно фокусному расстоянию объектива f , находится поверхность светочувствительного сенсора, на которой формируется оптическое изображение объектов, находящихся в поле зрения.

2. С поверхностью сенсора совмещена система вещественных координат изображений $X_I Y_I$, которая является двумерной. Ее начало находится в точке F камеры, а оси X_I и Y_I параллельны осям X_C и Y_C камерной системы.

3. Формируемое камерой изображение анализируется на экране монитора в системе двумер-

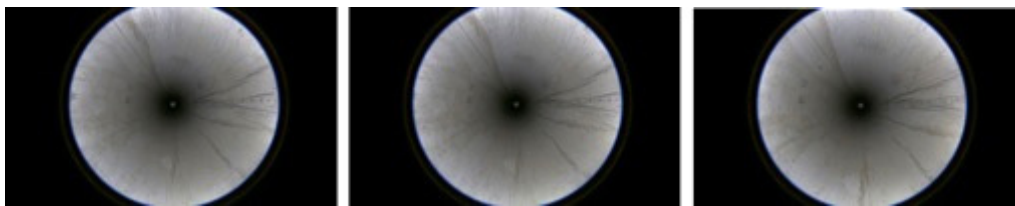


Рис. 2. Последовательность из трех кадров круговой панорамы внутренней поверхности
Fig. 2. Sequence of three frames of a circular panorama of the inner surface

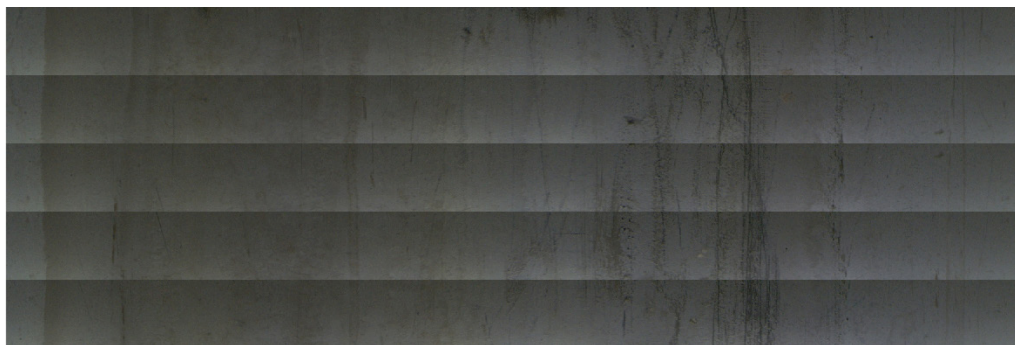


Рис. 3. Пять кадров цилиндрической панорамы внутренней поверхности трубы, подлежащие сшивке
Fig. 3. Five frames of a cylindrical panorama of the inner surface of the pipe, subject to stitching

3) Сшивка кадров цилиндрической панорамы для получения полного панорамного изображения внутренней поверхности.

Этап 1 реализован с помощью аппаратно-программного комплекса, изготовленного в лаборатории Научно-прикладного телевидения и компьютерного зрения ПГУТИ (см. раздел 2) в соответствии с описанным выше алгоритмом. Этап 2 достаточно подробно изложен в работе [3], написанной с участием автора. Для реализации этапа 3 необходимо решить ряд задач, обусловленных спецификой формирования изображения внутренней поверхности:

- компенсации вариаций яркости и контраста изображений, возникающих из-за неравномерного освещения внутренней поверхности и особенностей характеристик оптической системы Fisheye;
- оптимизации процесса поиска особенностей на сшиваемых кадрах;
- выравнивания яркости и контраста изображений в области перекрытия сшиваемых кадров.

Задача компенсации вариаций яркости и контраста изображений по полю порождена особенностями оптической системы, которая приводит к снижению освещенности на краях поля изображения, и неравномерностью освещенности на внутренней поверхности трубы, создаваемой светодиодным осветителем. Наличие вариаций яркости и контраста ведет к сильному ухудшению качества сшитого панорамного изображения. Это иллю-

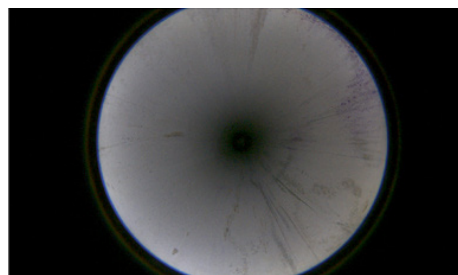


Рис. 4. Кадр круговой панорамы, снимаемый с выхода ТВ-камеры
Fig. 4. A frame of a circular panorama taken from the output of a TV camera

стрируется рис. 3, на котором представлены пять кадров цилиндрической панорамы, подлежащие сшивке. Анализ показывает, что использование таких изображений приводит к неприемлемой заметности сшивки.

Еще одной причиной необходимости компенсации вариаций яркости и контраста является поиск соответственных особых точек в области перекрытия соседних кадров, которые применяются для сшивки панорамы. Если пары соответственных особых точек, находящихся в области перекрытия, будут различаться яркостью, это затруднит процесс их поиска и сопоставления.

Компенсацию вариаций яркости и контраста можно осуществить разными способами. Для снижения вычислительных затрат ее целесообразно выполнять на изображениях круговых панорам, снимаемых с видеокамеры. Один кадр такого изображения показан на рис. 4.

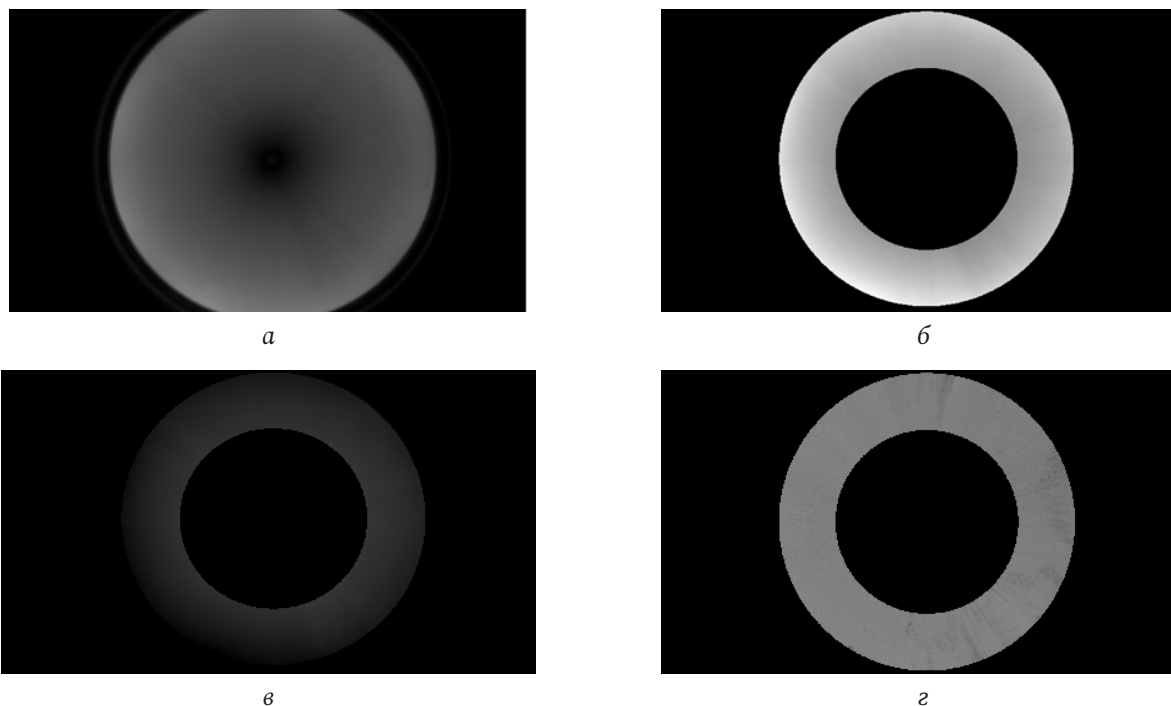


Рис. 5. Шаги компенсации изменений яркости по полю изображения
Fig. 5. Steps to compensate for brightness changes across the image field

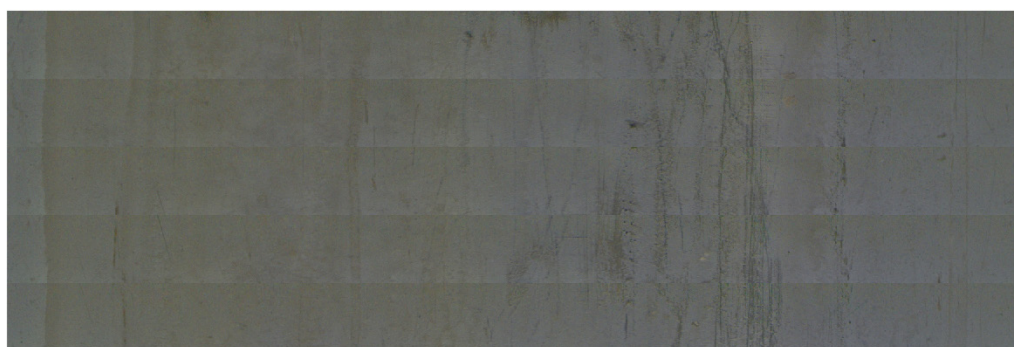


Рис. 6. Пять кадров цилиндрической панорамы после коррекции неравномерности фона
Fig. 6. Five frames of a cylindrical panorama after background unevenness correction

Компенсация указанных вариаций происходит выполнением следующих действий.

1. Кадры исходного цветного *RGB* изображения преобразуются в цветовое пространство *HSI*, в котором выделяется компонента яркости *I*.

2. Полученная яркостная компонента подвергается низкочастотной фильтрации фильтром большого размера с целью выделения фона. Результат такой фильтрации показан на рис. 5, а. Видно, что низкочастотная фильтрация позволила отделить низкочастотную фоновую составляющую от информативных элементов на внутренней поверхности трубы.

3. Из усредненной яркостной компоненты вырезается кольцевая область, которая будет использоваться для формирования цилиндрической панорамы (рис. 5, б), и из нее путем привязки ми-

нимального значения яркости к нулю и инверсии формируется матрица коррекции (рис. 5, в).

4. Коррекция путем добавления инвертированной матрицы коррекции к кольцевой яркостной компоненте. Скорректированная компонента яркости представлена на рис. 5, г.

5. В изображении *HSI* компонента яркости заменяется на скорректированную, затем скорректированное *HSI* изображение преобразуется в цветовую систему *RGB*, которое используется для формирования цилиндрической панорамы, кадры которой приведены на рис. 6.

Для выполнения сшивки соседних кадров цилиндрической панорамы, на которых скомпенсирована неравномерность фона (рис. 6), нужно произвести поиск особых точек в области перекрытия и установить их соответствие. В результате экс-

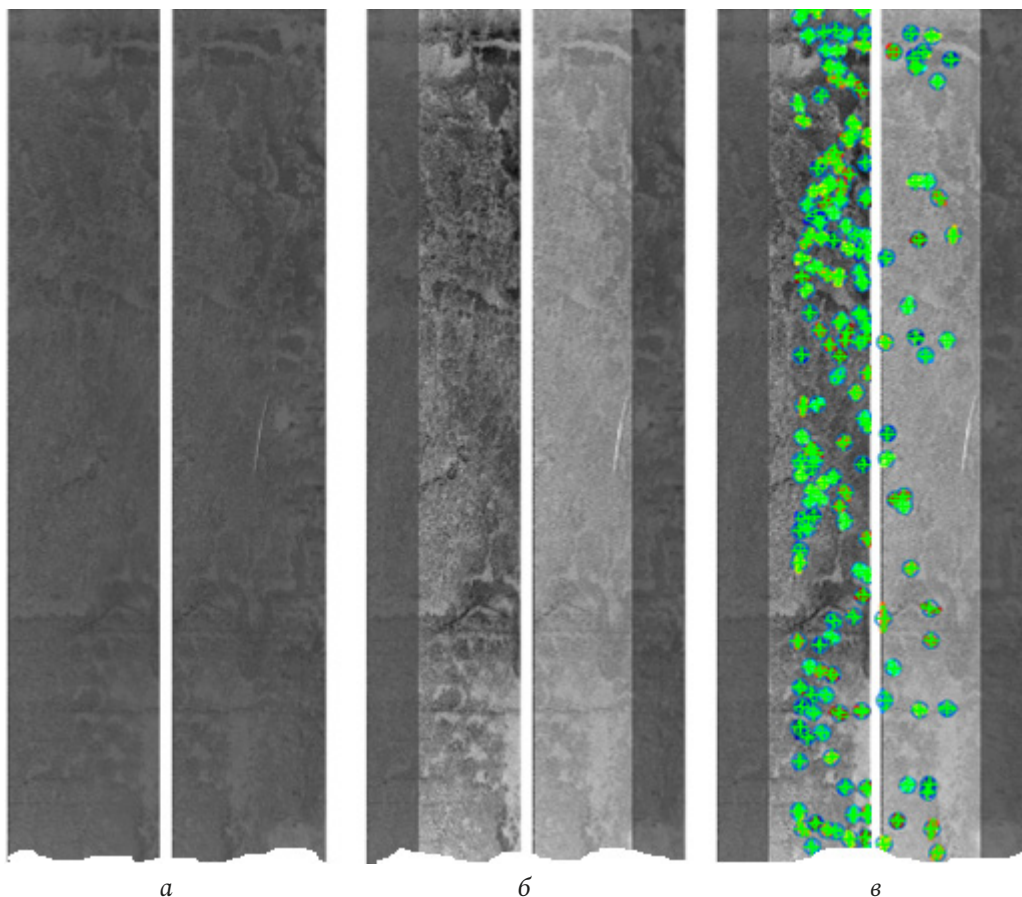


Рис. 7. Иллюстрация процесса шивки двух соседних кадров: *a* – два соседних кадра формируемой панорамы; *б* – два соседних кадра после контрастирования в областях перекрытия; *в* – два соседних кадра с обнаруженными регионами MSER
 Fig. 7. Illustration of the process of stitching two adjacent frames: *a* – two adjacent frames of the generated panorama; *b* – two adjacent frames after contrasting in areas of overlap; *c* – two adjacent frames with detected MSER regions

периментальных исследований было установлено, что наиболее подходящим методом поиска особых точек является метод обнаружения максимально устойчивых экстремальных областей – MSER (Maximally Stable Extremal Region) [5; 6]. Метод MSER использует монохромное изображение и производит поиск регионов с экстремальными свойствами функции интенсивности (яркости) внутри региона и на его внешней границе. Метод решает проблемы инвариантности при изменении масштаба, что является весьма важным. Существующие программные реализации алгоритма MSER включены в библиотеки MATLAB и OpenCV [7].

Использование функции `detectMSERFeatur`s в системе MATLAB с синтаксисом

```
regions = detectMSERFeatur(I)
```

возвращает дескрипторы найденных в изображении *I* регионов MSER в виде структуры, состоящей из пяти полей:

- *Count* – скаляр *nr*, равный числу обнаруженных регионов;

- *Location* – матрица $nr \times 2$, включающая координаты центров обнаруженных регионов;
- *Axes* – матрица $nr \times 2$, содержащая длины большой и малой осей эллипсов, описанных вокруг обнаруженных регионов;
- *Orientation* – матрица $nr \times 1$, показывающая векторы ориентации описанных эллипсов в виде угла диапазона $[-\pi/2 \dots \pi/2]$;
- *PixelList* – матрица $nr \times 2$, содержащая координаты каждого пиксела обнаруженных регионов.

Использование дескрипторов координат центров регионов (*Location*) позволяет установить соответствия между обнаруженными особыми точками и вычислить взаимные смещения изображений соседних кадров для их шивки. Это реализуется выполнением последовательности следующих операций и иллюстрируется рис. 7.

1. Цветные RGB кадры цилиндрической панорамы преобразуются в монохромные, поскольку для работы алгоритма MSER требуется только компонента яркости изображения (рис. 7, *a*).

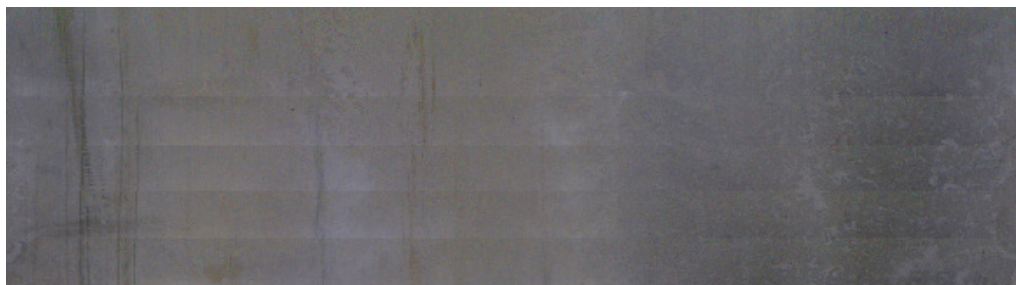


Рис. 8. Пять кадров цилиндрической панорамы, сшитых методом обрезки перекрывающихся областей
Fig. 8. Five frames of a cylindrical panorama, stitched using the method of cropping overlapping areas

2. Область предполагаемого перекрытия соседних кадров контрастируется с целью повышения вероятности обнаружения особых точек на малоконтрастном изображении (рис. 7, б).

3. Детектор MSER обнаруживает особые точки и формирует их дескрипторы. Эти особые точки на рис. 7, в выделены зелеными окружностями.

4. Установка соответствий особых точек происходит сопоставлением дескрипторов центров соседних кадров, исходя из условий: точки считаются соответствующими, если модуль разности их вертикальных координат не превышает две строки:

$$\begin{aligned} & \text{abs}(\text{Location_gf_1}(i,2) - \\ & - \text{Location_gf_2}(k,2)) \leq 2 \end{aligned}$$

и разность горизонтальных координат не превышает допустимого шага перемещения камеры:

$$\begin{aligned} & dD_{\min} < n - \text{Location_gf_2}(k,1) + \\ & + \text{Location_gf_1}(i,1) < dD_{\max}, \end{aligned}$$

где gf_1, gf_2 – изображения текущего и следующего кадров; n – размер изображения по горизонтали; dD_{\min}, dD_{\max} – минимальный и максимальный шаг перемещения камеры.

Горизонтальные координаты особых точек, соответствие которых установлено, записываются в таблицу.

5. Вычисление взаимных смещений изображений соседних кадров производится по формуле

$$\begin{aligned} DX = n - \text{Location_gf_2}(k,1) + \\ + \text{Location_gf_1}(i,1), \end{aligned}$$

причем если в сформированной таблице координат оказались записанными горизонтальные координаты нескольких пар особых точек, то значение смещения DX вычисляется как среднее арифметическое.

6. После вычисления величины взаимных смещений DX выполняется сшивка соседних кадров. Это можно сделать двумя способами.

Способ 1 предполагает обрезку одного из кадров (рис. 7, а) слева или справа на величину перекрытия DX и выполнение конкатенации матриц изображений по горизонтали. Результат такой сшивки для пяти кадров, которые для наглядности расположены горизонтально, показан на рис. 8.

Из анализа результата (рис. 8) видно, что, несмотря на выполненную коррекцию неравномерности освещенности, на изображении наблюдаются места сшивки отдельных кадров. Это объясняется тем, что зрение очень чувствительно к ступенчатым изменениям яркости (эффекту «полос Маха»). Поэтому выполненной коррекции неравномерности недостаточно для получения качественного сшитого изображения.

Способ 2 предполагает совмещение соседних кадров без обрезки перекрывающихся областей, а путем их наложения и суммирования. При этом в областях перекрытия сшиваемых кадров яркость изображений должна изменяться линейно, но с градиентами, направления которых противоположны. Это иллюстрируется рис. 9, а и б. А на рис. 9, в содержится результат такого совмещения для двух кадров из которого видно, что граница сшивки визуально незаметна.

Это подтверждается и результатом сшивки девяти кадров, которые расположены горизонтально и приведены на рис. 10.

2. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования предлагаемого алгоритма выполнялись на макете аппаратно-программного комплекса телевизионного контроля внутренней поверхности труб, созданного с участием автора [8; 9]. В аппаратную часть комплекса входят: высокоскоростная IP-видеокамера со сверхширокоугольным объективом типа Fisheye с угловым полем 180 градусов; светодиодный осветитель, размещенный на камере и блок



Рис. 9. Сшивка кадров способом наложения перекрывающихся областей: *a* – следующий кадр с линейным градиентом в области перекрытия; *б* – текущий кадр с линейным градиентом в области перекрытия; *в* – результат совмещения двух кадров
Fig. 9. Stitching frames by overlapping overlapping areas: *a* – next frame with a linear gradient in the overlap area; *b* – current frame with a linear gradient in the overlap area; *c* – the result of combining two frames



Рис. 10. Результат сшивки девяти кадров способом наложения перекрывающихся областей
Fig. 10. The result of stitching nine frames using the method of overlapping overlapping areas

линейного перемещения камеры внутри трубы. В качестве камеры используется видеочамера для машинного зрения Basler a2F1920-51gmBAS с интерфейсом GigE, CMOS-матрицей IMX392. Камера формирует изображения с максимальной частотой 51 кадр/с с числом элементов 2,3 Мрх.

За счет синхронизации затвора камеры с блоком линейного перемещения формирование кадров происходит с фиксированным шагом, который выбирается из условий частичного перекрытия соседних кадров, что необходимо для формирования общей панорамы внутренней поверхности. Кадры видеопоследовательности представляют

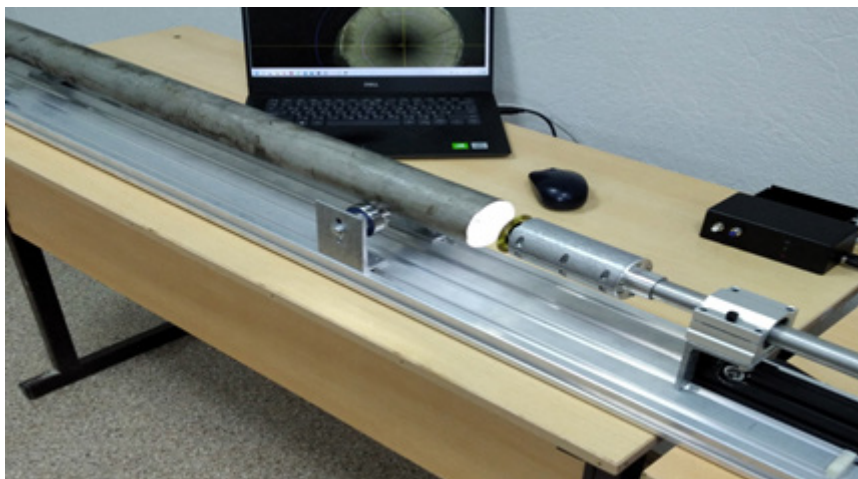


Рис. 11. Аппаратно-программный комплекс для телевизионного контроля внутренней поверхности труб
 Fig. 11. Hardware and software complex for television monitoring of the internal surface of pipes

собой круговые изображения объектов, которые попадают в полусферу поля зрения камеры с разрешением 1980×1200 px (см. рис. 2).

Программная часть комплекса включает специально разработанное программное обеспечение [10–12] для обработки кадров видеопоследовательности, снимаемой с видеокамеры, развернутое на ноутбуке Dell с характеристиками:

- ОС: Windows 11 для образовательных учреждений, x64;
- Процессор Intel(R) Core™ i7-11370H, 3,30 ГГц;
- ОЗУ: 32 Гб, 3200 МГц;
- Видеокарта: Nvidia GeForce MX450, 2 Гб.

Внешний вид аппаратно-программного комплекса показан на рис. 11.

Комплекс позволяет проводить эксперименты с трубами внутренним диаметром от 50 до 160 мм и длиной до 1000 мм.

Построение панорамного изображения выполняется с помощью разработанного программного обеспечения. Программное обеспечение производит ввод изображения от видеокамеры и его отображение на дисплее. Выводиться на дисплей может как исходное изображение, в том числе статический кадр, так и полученное панорамное изображение в различных режимах отображения.

Программное обеспечение разработано на языке Python, имеет стандартный оконный интерфейс пользователя, содержащий главное меню для доступа ко всем основным функциям и окно отображения видеoinформации. В программном обеспечении широко используются библиотеки языка Python, в частности библиотека обработки изображений и компьютерного зрения OpenCV.

Разработанная версия программы предоставляет пользователю следующие возможности:

- ввод изображения от видеокамеры со сверхширокоугольным объективом, перемещающейся внутри трубопровода;
- фиксацию кадров и их отображение в окне дисплея оператора контрольно-измерительной установки;
- построение панорамного изображения для каждого кадра и коррекцию геометрических искажений;
- компоновку единого изображения внутренней поверхности трубопровода из полученных панорам;
- управление направлением и скоростью перемещения камеры внутри трубопровода;
- включение освещения.

Кроме перечисленных выше функций поддерживаются вспомогательные операции:

- калибровка геометрических преобразований;
- установка режимов работы программы;
- сохранение и считывание файлов неподвижных кадров, видеопоследовательностей, панорам, таблиц геометрических преобразований, настроек программы.

Практическая реализация рассмотренного алгоритма показывает, что принятые решения позволяют обеспечить высокое качество изображения полной панорамы внутренней поверхности труб. Пример панорамного изображения для трубы с внутренним диаметром 50 мм показан на рис. 12. Оно состоит из 100 сшитых кадров и имеет размер 3487×11849 px. Такое изображение можно использовать как «паспорт качества» трубы.



Рис. 12. Сформированное панорамное изображение внутренней поверхности трубы из 100 последовательных кадров
Fig. 12. Generated panoramic image of the inner surface of a pipe from 100 consecutive frames

Заключение

Представленный в статье алгоритм и его экспериментальное исследование показали эффективность принятых решений. В результате на сформированном панорамном изображении отсутствуют визуально заметные яркостные артефакты, которые могут приводить к ошибкам обнаружения дефектов на внутренней поверхности.

Для обнаружения и классификации дефектов можно использовать различные детекторы, на-

пример семейство YOLO. Однако это целый комплекс крупных по объему и сложности задач – необходим анализ возможных архитектурных решений, формирование обучающего датасета, правильное и корректное обучение детектора. Эти задачи требуют полноценного исследования в отдельной статье.

Финансирование

Исследования проводились при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-21-10075.

Список литературы

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
2. Bettonvil F. Imaging: Fisheye lenses // WGN. International Meteor Organization. 2005. Vol. 33, no. 1. P. 9–14.
3. Reconstruction of images in video analytics systems with ultra-wide angle optics / O.L. Kulyas [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. 2019. Vol. 11516. P. 115161C. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2566125>
4. Измерение характеристик и оценка возможностей видеокамер со сверхширокоугольной оптикой / О.Л. Куляс [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 1. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.89-99>
5. Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation / R. Girshick [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. Vol. 38, no. 1. P. 142–158. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2437384>
6. Zhan Y., Wang Y., Yu X. Semisupervised hyperspectral image classification based on generative adversarial networks and spectral angle distance // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 22019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49239-2>
7. Gonzalez C., Woods R.E., Steven L.E. Digital Image Processing Using MATLAB. Philadelphia: Gatesmark Publishing, 2020. 1009 p.
8. Проблемы визуального контроля / О.Л. Куляс [и др.] // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: мат. XXIV Международной научно-технической конференции. Уфа, 2022. С. 485–486.
9. Куляс О.Л., Лошкарев А.С. Мониторинг продольного положения видеокамеры при телевизионном контроле внутренней поверхности труб // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 1. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.25791/pribor.1.2024.1465>
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021681918. Программа телевизионного контроля внутренней поверхности трубопроводов / О.Л. Куляс, А.С. Лошкарев, К.А. Никитин, П.А. Назаренко, О.И. Захарова; 27.12.2023.
11. Свидетельство регистрации программы для ЭВМ RU 2023688742. Программа формирования полного панорамного изображения внутренней поверхности труб / О.Л. Куляс, А.С. Лошкарев, К.А. Никитин, П.А. Назаренко, О.И. Захарова; 25.12.2023.
12. Программное обеспечение контроля внутренней поверхности трубопроводов / О.Л. Куляс [и др.] // Физика и технические приложения волновых процессов (ФитПВП-2021): мат. XIX Международной научно-технической конференции. 2021. С. 78–79.

Информация об авторе

Лошкарев Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: обработка изображений, компьютерное зрение, виртуальная реальность.

E-mail: lozhkarev-as@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8598-8908>
SPIN-код (eLibrary): 1743-0740
AuthorID (eLibrary): 1169315
ResearcherID (WoS): L-1597-2018

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 2, pp. 45–55

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.2.45-55](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.2.45-55)
UDC 621.397: 004.932
Original Research

Received 28 March 2024
Accepted 29 April 2024
Published 29 June 2024

Formation of a panoramic image of the inner surface of the pipe

Alexey S. Loshkarev 

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Background. Visual non-destructive testing of the inner surface of pipes is an important aspect in their production and operation. A defect detected and corrected in a timely manner can significantly reduce the number of defects in production and prevent various emergency incidents during operation. Formation of a complete panoramic image of the inner surface of pipes suitable for quality analysis is an urgent and sought-after task that can be solved using computer vision systems. **Aim.** This work is the research and development of television methods for forming a complete panoramic image of the inner surface of a pipe, which can be analyzed to search for defects. **Methods.** To form a cylindrical panoramic image, mathematical models for the formation of an equidistant projection of spherical images obtained using a fisheye lens were used. For high-quality stitching of the resulting frames, digital image processing methods were used, including brightness and contrast transformations, and searching for special points using the MSER algorithm. Theoretical results are verified by full-scale modeling. **Results.** The result of this work is an algorithm for stitching frames of a video sequence generated by a television camera with a fisheye optical system, uniformly moved along the longitudinal axis of the pipe, into a single panoramic image of the internal surface. **Conclusion.** The algorithm ensures the formation of a high-quality image of a full panorama of the inner surface of the pipes with the absence of brightness artifacts.

Keywords – television camera; video sequence; «fisheye» lens; panoramic image; singular points; inner surface of the pipe; MSER algorithm.

✉ lozhkarev-as@mail.ru (Alexey S. Loshkarev)

 © Alexey S. Loshkarev, 2024

References

1. N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. N. Kuzichev, *Theory of Optical Systems*. Moscow: Mashinostroenie, 1992. (In Russ.)
2. F. Bettonvil, “Imaging: Fisheye lenses,” *WGN. International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, pp. 9–14, 2005.
3. O. L. Kulyas et al., “Reconstruction of images in video analytics systems with ultra-wide angle optics,” *Optical Technologies for Telecommunications*, vol. 11516, p. 115161C, 2019, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2566125>.
4. O. L. Kulyas et al., “Measurement of characteristics and assessment of the capabilities of cameras with ultra-wide angle optics,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 89–99, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.1.89-99>. (In Russ.)
5. R. Girshick et al., “Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, no. 1, pp. 142–158, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2437384>.
6. Y. Zhan, Y. Wang, and X. Yu, “Semisupervised hyperspectral image classification based on generative adversarial networks and spectral angle distance,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, pp. 22019, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49239-2>.
7. C. Gonzalez, R. E. Woods, and L. E. Steven, *Digital Image Processing Using MATLAB*. Philadelphia: Gatesmark Publishing, 2020.
8. O. L. Kulyas et al., “Visual inspection problems,” *Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsiy: mat. XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Ufa, pp. 485–486, 2022. (In Russ.)
9. O. L. Kulyas and A. S. Loshkarev, “Monitoring the longitudinal position of a video camera during television inspection of the internal surface of pipes,” *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, no. 1, pp. 10–18, 2024, doi: <https://doi.org/10.25791/pribor.1.2024.1465>. (In Russ.)
10. O. L. Kulyas, A. S. Loshkarev, K. A. Nikitin, P. A. Nazarenko, and O. I. Zakharova “Program for television monitoring of the internal surface of pipelines,” Certificate of registration of the computer program RU 2021681918, Dec. 25, 2023. (In Russ.)

11. O. L. Kulyas, A. S. Loshkarev, K. A. Nikitin, P. A. Nazarenko, and O. I. Zakharova “Program for forming a complete panoramic image of the inner surface of pipes,” Certificate of registration of the computer program RU 2023688742, Dec. 25, 2023. (In Russ.)
12. O. L. Kulyas et al., “Pipe internal surface inspection software,” *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov (FiTPVP-2021): mat. XIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, pp. 78–79, 2021. (In Russ.)

Information about the Author

Alexey S. Loshkarev, senior lecturer of the Department of Information Systems and Technologies, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: image processing, computer vision, virtual reality.

E-mail: lozhkarev-as@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8598-8908>

SPIN-код (eLibrary): 1743-0740

AuthorID (eLibrary): 1169315

ResearcherID (WoS): L-1597-2018