

Локализация круглых объектов на изображениях с применением быстрого преобразования радиальной симметрии

*О.В. Ильина¹, С.А. Ляшева¹, Р.М. Шакирзянов¹, М.П. Шлеймович¹,
Г.Б. Шаханов²*

*¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань*

²Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад

Аннотация: В настоящее время наблюдается рост количества научных работ по моделям, методам и программно-аппаратным средствам обработки и анализа изображений. Это связано с широким внедрением технологий компьютерного зрения в системы обработки информации и управления. При этом актуальны подходы, обеспечивающие быструю обработку изображений в реальном времени с использованием ограниченных вычислительных ресурсов. Такие подходы, как правило, базируются на низкоуровневых алгоритмах фильтрации изображений. Одной из задач, подлежащих решению в системах на основе компьютерного зрения, является локализация круглых объектов. Данные объекты обладают свойством радиальной симметрии. Поэтому, для решения указанной задачи, эффективен подход на основе быстрого преобразования радиальной симметрии, который рассматривается в данной работе. В статье описаны основные шаги базового преобразования, приведена процедура определения центров радиально-симметричных областей для локализации круглых объектов на изображениях, рассмотрены примеры ее применения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, обработка изображений, анализ изображений, локализация объектов, методы локализации круглых объектов, быстрое преобразование радиальной симметрии, определение центров радиально-симметричных областей.

Введение

На текущем этапе развития систем обработки информации и управления широко применяются технологии компьютерного зрения и обработки изображений [1], что ведет к значительному росту числа исследований в данной области [2, 3].

Одной из задач анализа изображений является локализация круглых объектов, например, для анализа расстояния между центрами зрачков [4], отслеживания движения глаз [5], локализации частиц [6] и др. Для ее решения применяются методы двух классов. Первый класс методов базируется на низкоуровневых алгоритмах фильтрации изображений, а второй – на высокоуровневых алгоритмах с использованием машинного

обучения, прежде всего, глубокого обучения. Методы на основе глубокого обучения развиваются наиболее активно [7]. Их применение показало свою эффективность для решения практически всех задач компьютерного зрения. Однако этот подход требует достаточно большое обучающее множество и является ресурсоемким. Поэтому развитие подходов к локализации круглых объектов на основе методов низкоуровневой обработки изображений также представляется перспективным для реализации быстрых процедур в системах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Локализация круглых объектов на основе быстрого преобразования радиальной симметрии

Рассмотрим следующее преобразование полутонового изображения:

1. Задать множество значений целочисленных радиусов $\mathbf{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где $r_1 < r_2 < \dots < r_n$;

2. Создать множества матриц $\{\mathbf{O}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$ и $\{\mathbf{M}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$, где каждая матрица \mathbf{O}_r и \mathbf{M}_r имеет размеры исходного изображения \mathbf{I} ;

3. Инициализировать все матрицы \mathbf{O}_r и \mathbf{M}_r нулевыми значениями:

$$\mathbf{O}_r(\mathbf{p}) := 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_r(\mathbf{p}) := 0; \quad (2)$$

4. Вычислить градиент $\mathbf{g}(\mathbf{p})$ интенсивности в каждом пикселе $\mathbf{p} = [x \ y]^T$ исходного изображения \mathbf{I} , где x, y – координаты пикселя;

5. Выполнить для каждого пикселя \mathbf{p} исходного изображения \mathbf{I} и каждого значения радиуса r из множества \mathbf{R} изменение соответствующих значений матриц \mathbf{O}_r и \mathbf{M}_r :

$$\mathbf{O}_r\left(\mathbf{p} + \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor\right) := \mathbf{O}_r\left(\mathbf{p} + \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor\right) + 1, \quad (3)$$

$$\mathbf{O}_r\left(\mathbf{p} - \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor\right) := \mathbf{O}_r\left(\mathbf{p} - \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor\right) - 1, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_r \left(\mathbf{p} + \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor \right) := \mathbf{M}_r \left(\mathbf{p} + \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right) + \|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_r \left(\mathbf{p} - \left\lfloor \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right\rfloor \right) := \mathbf{M}_r \left(\mathbf{p} - \frac{\mathbf{g}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|} r \right) - \|\mathbf{g}(\mathbf{p})\|, \quad (6)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – округление вещественного числа до ближайшего целого;

6. Сформировать множества матриц $\{\tilde{\mathbf{O}}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$ и $\{\tilde{\mathbf{M}}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$:

$$\tilde{\mathbf{O}}_r(\mathbf{p}) := \frac{\mathbf{O}_r(\mathbf{p})}{\max_{\mathbf{q} \in \mathbf{I}} |\mathbf{O}_r(\mathbf{q})|}, \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_r(\mathbf{p}) := \frac{\mathbf{M}_r(\mathbf{p})}{\max_{\mathbf{q} \in \mathbf{I}} |\mathbf{M}_r(\mathbf{q})|}; \quad (8)$$

7. Сформировать множество матриц $\{\mathbf{F}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$:

$$\mathbf{F}_r(\mathbf{p}) := |\tilde{\mathbf{O}}_r(\mathbf{p})|^\alpha \tilde{\mathbf{M}}_r(\mathbf{p}), \quad (9)$$

где α – параметр радиальной жесткости;

8. Сформировать множество матриц $\{\mathbf{S}_r \mid r \in \mathbf{R}\}$:

$$\mathbf{S}_r := \mathbf{F}_r * \mathbf{G}_r, \quad (10)$$

где $*$ – операция свертки, \mathbf{G}_r – ядро гауссова фильтра для значения радиуса r (размеры ядра равны $n_r \times n_r$, элементы ядра вычисляются в соответствии со значением стандартного отклонения σ_r), $\mathbf{G}_r \in \mathbf{G}$;

9. Сформировать матрицу признаков радиальной симметрии \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} := \sum_{r \in \mathbf{R}} \mathbf{S}_r. \quad (11)$$

Данное быстрое преобразование радиальной симметрии предложено Г. Лойем и А. Зеленским [8]. При решении конкретных задач оно может быть модифицировано [9, 10]. Например, могут использоваться только пары выражений (3), (5) или (4), (6) для определения только светлых или только темных радиально-симметричных областей.

В качестве примера применения преобразования рассмотрим следующую процедуру:

1. Получить исходное изображение;
2. Преобразовать исходное изображение в полутоновый вид;
3. Выполнить быстрое преобразование радиальной симметрии;
4. Привести результаты преобразования в полутоновый вид;
5. Выполнить пороговую обработку;
6. Выполнить морфологическую обработку;
7. Детектировать контуры связных областей;
8. Вычислить центральные моменты контуров;
9. Вычислить координаты центров областей внутри контуров.

При реализации процедуры использовались параметр радиальной жесткости $\alpha = 3$, множество значений радиусов $\mathbf{R} = [50, 150]$, размеры ядер гауссовых фильтров $n_r = r / 2$, $r \in \mathbf{R}$, значения стандартного отклонения для вычисления ядер гауссовых фильтров $\sigma_r = 0,5r$.

На рис. 1 – 3 показаны исходное изображение в полутоновом виде, содержащее объекты различной формы (в том числе три круга), результат применения быстрого преобразования радиальной симметрии (видно, что преобразование позволяет подчеркнуть положение кругов) и результат определения центров кругов на исходном изображении.

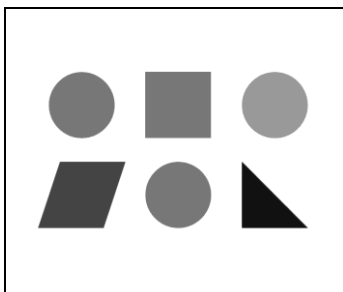


Рис. 1. – Исходное изображение в полутоновом виде



Рис. 2. – Результат преобразования

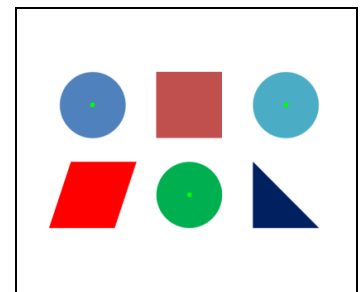


Рис. 3. – Результат определения центров кругов

Рассмотрим условия применимости предложенного подхода к локализации круглых объектов на изображении. На рис. 4 – 6 приведены круги различной яркости с радиусом 50, результат применения к ним быстрого преобразования радиальной симметрии с параметрами $\alpha = 3$, $\mathbf{R} = [40, 60]$, $n_r = r / 2$, $r \in \mathbf{R}$, $\sigma_r = 0,5r$ и результат определения центров кругов соответственно. На рис. 4 и 6 верхний ряд содержит круги с яркостями 0, 30, 60, средний ряд – 90, 120, 150, нижний ряд – 180, 210, 240.

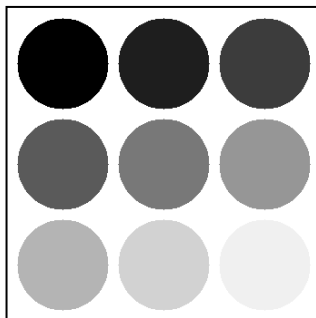


Рис. 4. – Круги различной яркости

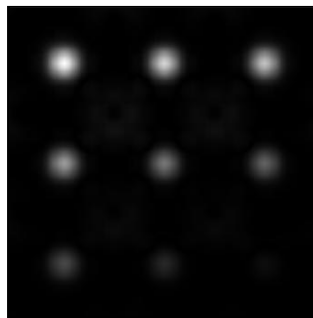


Рис. 5. – Результат преобразования

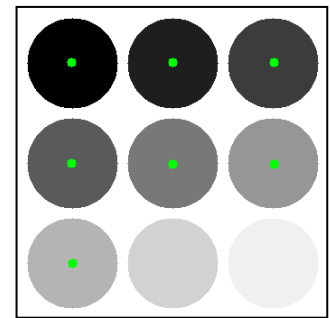


Рис. 6. – Результат определения центров

При рассмотрении рис. 5, видно, что базовое преобразование чувствительно к соотношению между наибольшей и наименьшей яркостями радиально-симметричных объектов на изображении. Это иллюстрируется рис. 7 – 9, где показано определение центров кругов того же радиуса, что и на рис. 4, но одинаковой яркости, равной 210 (второй круг в нижнем ряду на рис. 4). На рис. 8 и 9 видно, что преобразование локализует соответствующие области для определения центров кругов.

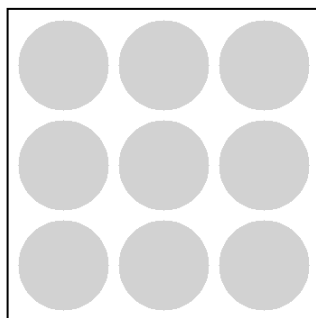


Рис. 7. – Круги одинаковой яркости

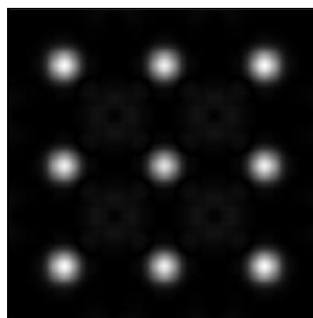


Рис. 8. – Результат преобразования

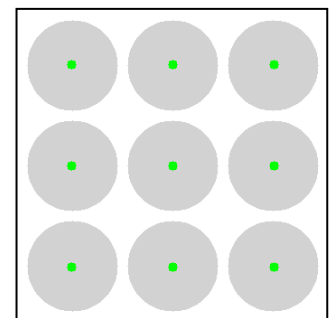


Рис. 9. – Результат определения центров

Проведенные экспериментальные исследования показали, что уменьшение чувствительности к яркости обеспечивается локальной обработкой на основе оконного преобразования. В этом случае учитываются только те значения яркости, которые соответствуют пикселям внутри скользящего окна. Кроме того, применение оконного преобразования позволяет учесть различные размеры радиально-симметричных областей.

Заключение

В работе описан подход к локализации круглых объектов с применением быстрого преобразования радиальной симметрии. Данный подход предназначен для применения в системах с ограниченными вычислительными ресурсами, например, в бортовых системах беспилотных летательных аппаратов для реализации процедур взлета, посадки, обнаружения маркеров, сбросе грузов и др., где необходимо учитывать жесткие требования к вычислительным устройствам по массе, габаритам и энергопотреблению. Он базируется на низкоуровневых методах обработки изображений, прост в реализации, обеспечивает высокую скорость и точность решения задачи локализации круглых объектов на изображениях.

Литература

1. Дэвис Р., Терк М. Компьютерное зрение. Современные методы и перспективы развития. М.: ДМК Пресс, 2022. 690 с.
2. Мосева М.С., Харрасов К.Р. О существующих методах удаления зашумлений на изображении // Инженерный вестник Дона, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8643/.
3. Сергеев А.М. О совмещении изображений и способах их реализации // Инженерный вестник Дона, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7832/.

4. Utama J., Fitriani V.R.L. Pupil Center Detection Using Radial Symmetry Transform to Measure Pupil Distance in the Eye // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2023. V. 36, №5. pp. 870-878.

5. Larumbe-Bergera A., Garde G., Porta S., Cabeza R., Villanueva A. Accurate Pupil Center Detection in Off-the-Shelf Eye Tracking Systems Using Convolutional Neural Networks // Sensors. 2021. V. 21. 6847.

6. Kashchuk A.V., Perederiy O., Caldini C., Gardini L., Pavone F.S., Negriyko A.M., Capitanio M. Particle Localization Using Local Gradients and Its Application to Nanometer Stabilization of a Microscope // ACS Nano. 2023. V. 17, №2. pp. 1344-1354.

7. Макаров Р.А. Алгоритм распознавания маркировки грузового контейнера с использованием глубоких нейронных сетей // Инженерный вестник Дона, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8340/.

8. Loy G., Zelinsky A. A Fast Radial Symmetry Transform for Detecting Points of Interest // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. V. 25, №8. pp. 959-973.

9. Barnes N., Zelinsky A. Real-time radial symmetry for speed sign detection // IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2004. pp. 566-571.

10. Шакирзянов Р.М., Шлеймович М.П., Новикова С.В. Метод автоматического позиционирования беспилотных аппаратов на основе распознавания сигнальных радиально-симметричных маркеров подводных целей // Автоматика и телемеханика. 2023. № 7. С. 93-120.

References

1. Djevis R., Terk M. Komp'yuternoe zrenie. Sovremennye metody i perspektivy razvitiya [Computer vision. Modern methods and prospects of development]. M.: DMK Press, 2022. 690 p.



2. Moseva M.S., Harrasov K.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8643/.
3. Sergeev A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7832/.
4. Utama J., Fitriani V.R.L. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2023. V. 36, №5. pp. 870-878.
5. Larumbe-Bergera A., Garde G., Porta S., Cabeza R., Villanueva A. Sensors. 2021. V. 21. 6847.
6. Kashchuk A.V., Perederiy O., Caldini C., Gardini L., Pavone F.S., Negriyko A.M., Capitanio M. ACS Nano. 2023. V. 17, №2. pp. 1344-1354.
7. Makarov R.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8340/.
8. Loy G., Zelinsky A. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. V. 25, №8. pp. 959-973.
9. Barnes N., Zelinsky A. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2004. pp. 566-571.
10. Shakirzjanov R.M., Shlejmovich M.P., Novikova S.V. Avtomatika i telemekhanika. 2023. № 7. pp. 93-120.