

УДК 004.932.2

**В. В. Юзефович¹, О. Н. Буточнов¹,
А. В. Мезенцев¹, С. В. Миронюк²**

¹Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

²ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»
ул. Криворожская, 3, 49008 Днепропетровск, Украина

Фрактальный метод формирования эталонных изображений в системах технического зрения

На основе анализа существующих методов обработки изображений в системах технического зрения предложено использовать фрактальный метод формирования эталонных изображений как наиболее целесообразный по критерию вычислительной реализуемости.

Ключевые слова: эталонное изображение, метод, взаимокорреляционная функция, фрактальная размерность, анализ изображений, обработка изображений.

Введение

Одной из принципиальных особенностей процесса обработки изображений в системах технического зрения является выделение информативных признаков, слабо чувствительных к разнообразным видам изменчивости. К таким специфическим видам изменчивости относятся геометрические искажения, а также различные виды искажений, не сводимые к вероятностным моделям (шумы формы). Для обнаружения объектов при обработке изображений с искажениями предложены как эвристические алгоритмы [1], так и методы, обладающие большей общностью: методы корреляционного обнаружения [1, 8], преобразование Хафа [2], морфологические подходы Пытьева и Серра [3]. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов обработки изображений и машинного зрения применительно к обсуждаемым задачам внесли работы Л.П. Ярославского, В.К. Злобина, В.Л. Лёвшина, Р. Харалика, Е. Дэвиса, Р. Неватиа, Е. Дикманнса, В. Фёрстнера и многих других. Однако, несмотря на полученные результаты, задача выделения и идентификации сложнотренированных объектов на моноскопических изображениях остается актуальной.

При использовании существующих методов обработки изображений необходимо учитывать следующие особенности и ограничения, связанные с характером решаемых задач [4]:

© В. В. Юзефович, О. Н. Буточнов, А. В. Мезенцев, С. В. Миронюк

1) априорная информация о характеристиках наблюдаемых объектов и фона чаще всего отсутствует или включает в себя лишь приблизительные сведения;

2) обработка изображений должна выполняться в реальном масштабе времени, что обусловлено использованием ее результатов в контуре управления движением.

Среди широко используемых методов обнаружения и определения координат объектов можно выделить методы на основе сопоставления наблюдаемой картины с эталонным изображением (ЭИ). Методы могут использоваться для определения координат движущихся и неподвижных объектов, наблюдаемых на однородном и неоднородном фоне, при малых отношениях сигнал/шум. Для реализации методов данного класса разработаны эффективные алгоритмы, в основе которых лежит совмещение эталонного и текущего изображений и межкадровая фильтрация ЭИ [5]. Эти методы наиболее широко применяются в современных корреляционно-экстремальных системах навигации (наведения) (КЭСН) летательных аппаратов (ЛА). Среди них наибольшее распространение получили методы корреляционного анализа, которые сводятся к вычислению степени корреляции изображения заданного объекта с наблюдаемым изображением [6]. Суть методов корреляционного анализа состоит в том, чтобы обнаруживать фрагменты и целые изображения интересующих объектов только в том случае, если между значениями яркости пикселей изображений в заданных каналах наблюдается устойчивая корреляционная связь. Корреляционные методы достаточно хорошо известны и описаны в литературе [6, 7].

При поиске и локализации информативных признаков выполняется расчет взаимокорреляционной функции имеющихся эталонного и входного изображений как с использованием порогов по величине сходства, так и без установления порога (когда ищется максимум сходства). Из множества альтернативных вариантов выбирается тот объект (или эталон), при котором достигается максимум функции взаимной корреляции. Корреляционные методы характеризуются большой вычислительной сложностью. Связано это с необходимостью масштабирования и поворотами изображений.

В настоящее время все более широкое применение находят методы анализа изображений с использованием поля фрактальных размерностей (ПФР) [8]. Понятие фрактала было введено в 1975 году французским ученым Бенуа Мандельбротом, чтобы обозначить нерегулярные, но самоподобные структуры, которыми он занимался. Его работы используют результаты исследования других ученых, которые изучали близкие теме вопросы: Пуанкаре, Кантор, Жюли, Хаусдорф. В наши дни все результаты исследований были объединены воедино. В результате было дано определение фрактала как структуры, состоящей из частей, которые в некотором смысле подобны целому.

Выбор метода формирования эталонных изображений для локализации объектов в системах технического зрения

Рассмотрим методы корреляционного и фрактального анализа как наиболее широко применяемые в настоящее время для решения задачи локализации изображений объектов.

В [9] рассмотрены различные варианты оценки информативности изображений, однако наиболее полным и универсальным показателем их информативности может служить взаимокорреляционная функция (ВКФ) исходного изображения и формируемого ЭИ.

Вычисление ВКФ на этапе синтеза ЭИ позволяет реализовать те же подходы, что и при корреляционной обработке текущих изображений [10]. Достоинством таких методов является возможность выбора информативных участков местности для формирования ЭИ с учетом максимально достижимой вероятности правильного местоопределения.

Алгоритм корреляционной обработки реализуется путем вычисления коэффициента взаимной корреляции K_{kl} ЭИ с координатами k и l при всех возможных сдвигах обрабатываемых изображений в соответствии с выражением [10]:

$$K_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \bar{f}][g(i+k-1, j+l-1) - \bar{g}_{kl}]}{N_1 N_2 \sigma_f \sigma_g}, \quad (1)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i, j), \quad \bar{g}_{kl} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} g(i+k-1, j+l-1), \quad (2)$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \bar{f}]^2, \quad (3)$$

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [g(i+k-1, j+l-1) - \bar{g}_{kl}]^2, \quad (4)$$

где K_{kl} — значения коэффициента взаимной корреляции (КВК) анализируемого изображения и ЭИ с координатами k и l , при $k = 1, 2, \dots, M_1 - N_1$, $l = 1, 2, \dots, M_2 - N_2$; $S_f = \|f(i, j)\|$ — матрица контрастности исходного изображения размером $M_1 \times M_2$; $S_{g_{kl}} = \|g_{kl}(i, j)\|$ — матрица контрастности ЭИ, как элемент исходного изображения $N_1 \times N_2$ с координатами k и l .

В [8] показано как использование свойств фрактальной геометрии может быть применено для описания различного рода поверхностей. Разработаны методы анализа изображений с использованием поля фрактальных размерностей, позволяющие выделять области наблюдения на изображении, проводить анализ слабоконтрастных изображений и т.д.

Целесообразность применения методов фрактального анализа (ФА) обусловлена их более простой вычислительной реализуемостью и представлением результатов обработки в виде селективного изображения [8], позволяющего локализовать информативные участки изображения поверхности визирования.

При фрактальном методе обработки изображение рассматривается как объединение областей с одинаковыми фрактальными размерностями. При этом значение фрактальной размерности лежит в пределах $2 \leq D \leq 3$, т.е. является дробным. Отличительной особенностью фрактальной размерности является то, что она ха-

рактирует степень заполнения пространства, в котором существует физическая система [8].

Величина фрактальной размерности D определяется как наклон логарифмической зависимости [8]

$$S(\varepsilon) = k\varepsilon^{-D}, \quad (5)$$

где S — измеряемый параметр (длина линии, периметр, площадь объекта); ε — шаг измерения (размер сканирующего окна); k — коэффициент пропорциональности;

При рассмотрении применимости методов ФА изображений для локализации областей привязки ЛА с КЭСН предложено использовать метод покрытия. Данный метод предполагает нахождение уравнения прямой

$$y = \lg C + Dx, \quad (6)$$

наилучшим образом согласующейся с точками, полученными внутри анализируемого окна, т.е. по имеющемуся набору x_i и y_i необходимо определить наилучшие значения $\lg C$ и D , где C — константа.

Как показано в [8] $\lg C$ и D находятся из решения системы уравнений:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot y_i]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (7)$$

$$\lg C = \bar{y} - D \cdot \bar{x}, \quad (8)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ — средние значения; n — количество точек прямой,

полученных по методу наименьших квадратов. Значение D определяется для всех элементов изображения с заданным шагом сканирования и представляется в виде матрицы ПФР.

В [8] опытным путем определено, что для решения задач выделения областей привязки ЛА на местности наиболее целесообразно использовать размер сканирующего окна 8×8 и 16×16 . Локализация информативных областей изображений фрактальным методом осуществляется путем построения селективных изображений в заданном диапазоне фрактальных размерностей $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$.

Одним из основных требований при рассмотрении методов оперативного анализа изображений является возможность представления результатов локализации информативных участков поверхности визирования в виде, удобном для программной (аппаратной) реализации.

Особенности классического корреляционного алгоритма локализации информативных областей изображений можно рассмотреть на примере обработки полутоновых изображений в оптическом диапазоне. Пример одного из изображений, содержащего контрастные (населенный пункт) участки местности, приведен

на рис. 1, что соответствует изображению участка ПВ размером 1210×626 м (1003×524) с высоты приблизительно 1500 м.



Рис. 1. Полутоновое исходное изображение, полученное из интернет-ресурса Google Earth

Для выбранного в качестве примера изображения (рис. 1) произведена корреляционная обработка, по результатам которой определено 4 области (обозначенные черными квадратами на рис. 2), обеспечивающие наибольшее значение коэффициента взаимной корреляции ЭИ размером $N_1 \times N_2$ (20×20 пикселей) и исходного изображения (рис. 1).

Для выделенных областей значение нормированного коэффициента взаимной корреляции находится в диапазоне $0,9 \leq K_{kl} \leq 1$. Представленное на рис. 2 изображение пересчитанно в значения градаций серого в диапазоне от 0 до 255. Для последующего сравнения результатов ФА с результатами КА назовем полученное изображение, по аналогии с методами ФА, полем корреляционного анализа (ПКА).

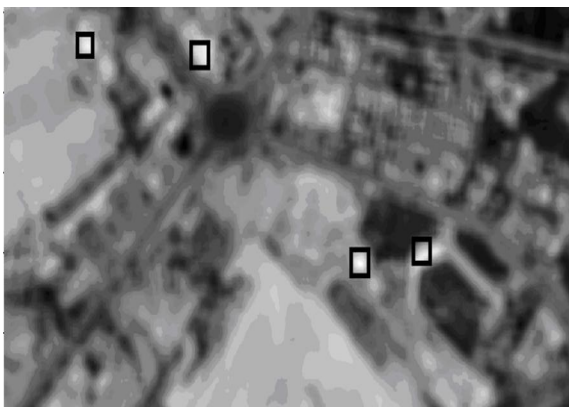


Рис. 2. Результат корреляционной обработки исходного изображения

Для полученного ПКА (рис. 2) на рис. 3 приведена гистограмма ПКА как зависимость относительной интенсивности значений КВК по градациям серого на изображении. Указанным областям с наибольшим значением КВК на рис. 2 соответствует хвост гистограммы ПКА на рис. 3 в заштрихованной области.

Синтез ЭИ в соответствии с классическим корреляционным алгоритмом (КА) по выражению (1) предполагает выполнение большого количества операций умножения. Прибли-

зительное выражение для оценки вычислительной реализуемости корреляционного алгоритма, (используемого для поиска информативных признаков путем последо-

вательного сдвига изображения ЭИ размера $N_1 \times N_2$ с шагом в 1 пиксель), количество операций умножения имеет вид

$$A_{KA} \approx N_1 N_2 M_1 M_2 (M_1 - N_1)(M_2 - N_2), \quad (9)$$

где M_1, M_2 — количество элементов исходного (анализируемого) изображения, которое в рассматриваемых примерах составляет 1003×524 пикселей.

В этом случае для реализации корреляционного алгоритма анализа изображений при размере ЭИ 20×20 пикселей необходимо выполнить $A_{KA} > 10^{14}$ операций умножения, для осуществления которых может потребоваться несколько десятков часов. При необходимости оперативного создания ЭИ такие вычислительные затраты являются недопустимыми.

При использовании ФА, количество операций умножения, необходимое для выделения информативных участков изображений методом покрытия, определяется из выражений (7), (8) и для скользящего окна размером $L \times L$ описывается формулой

$$A_{\Phi A} = 2L(M_1 - L)(M_2 - L), \quad (10)$$

где $L = 2^{(n-1)}$ — размер скользящего окна анализа.

В ходе исследований экспериментальным путем установлено, что объектам наилучшей контрастности на гистограмме ПФР соответствует диапазон размерности $2,88 \leq D \leq 3$ (рис. 4). По указанному интервалу фрактальных размерностей могут быть локализованы участки изображений, которые предпочтительно использовать в качестве информативных признаков ЭИ. На рис. 5 представлено селективное изображение, построенное для диапазона ФР $2,88 \leq D \leq 3$.

В результате такой трансформации гистограмма ПФР (рис. 4) становится похожей на гистограмму ПКА (рис. 3), а выделенные по хвосту гистограммы ПФР области потенциально обеспечивают коэффициент взаимной корреляции ЭИ и ТИ в интервале от 0,9 до 1.

Сравнение результатов локализации информативных областей, предпочтительных для использования в качестве эталонных, полученных корреляционным (рис. 2) методом и фрактальным методом с устранением информативной избыточности (рис. 4), свидетельствует о предпочтительности использования методов фрактального анализа изображений для подготовки ЭИ в силу более высокой их вычислительной реализуемости [5].

Для ФА изображения, выбранного в качестве примера (рис. 1), и размера скользящего окна 16×16 количество необходимых операций умножения составляет

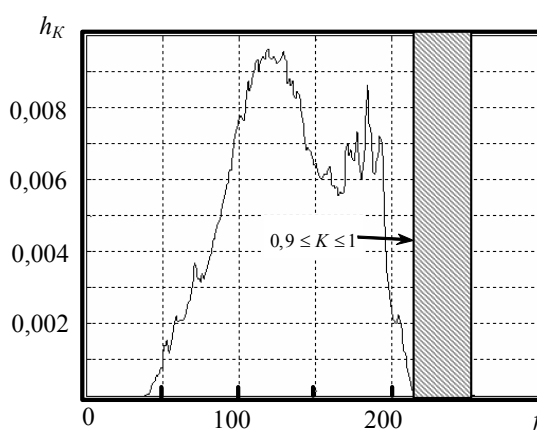


Рис. 3. Гистограмма ПКА исходного изображения

$A_{\phi_A} \approx 1,6 \cdot 10^7$. Если принять, что $N_1 = N_2 = N \approx L$ выигрыш от использования фрактального метода выделения информативных участков изображения по сравнению с корреляционным приблизительно можно оценить соотношением

$$\frac{A_{KA}}{A_{\phi_A}} = \frac{N^2 M_1 M_2 (M_1 - N)(M_2 - N)}{2L(M_1 - L)(M_2 - L)} = \frac{1}{2} N M_1 M_2. \quad (11)$$

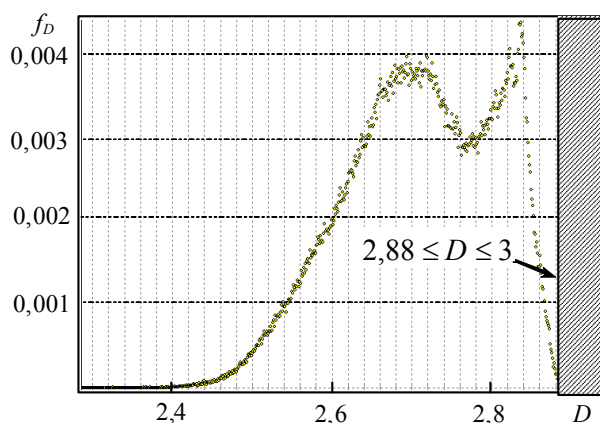


Рис. 4. Гистограмма ПФР исходного изображения



Рис. 5. Результат фрактальной обработки исходного изображения ($D_{\min} = 2,888$; $D_{\max} = 3$; $L = 16$)

Выводы

На основе анализа известных методов локализации объектов на изображениях предложен метод фрактального анализа изображений для формирования эталонных изображений, используемых в системах технического зрения. Выигрыш от использования фрактального метода выделения информативных участков изображения по сравнению с корреляционным по быстродействию составляет несколько порядков по количеству умножений, а по информативности практически полностью совпадает с корреляционным методом. Таким образом, сравнение ре-

зультатов локализации информативных областей, предпочтительных для использования при формировании ЭИ, полученных корреляционным методом и фрактальным методом, свидетельствует о целесообразности использования методов фрактального анализа изображений для подготовки ЭИ в силу более высокой их вычислительной реализуемости.

1. *Левшин В.Л.* Биокрибернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений / В.Л. Левшин. — М.: Машиностроение, 2006. — 176 с.
2. *Duda R.O.* Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures / Duda R.O., Hart P.E. // Communications of the ACM. — 2011. — Vol. 15. — P. 11–15.
3. *Serra J.* Image Analysis and Mathematical morphology / J. Serra. — L.: Academic Press, 2010.
4. *Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010:* тр. науч.-техн. конференции-семинара. — Вып. 4; под ред. Р.Р. Назирова. — М.: КДУ, 2011. — 328 с.
5. *Алпатов Б. А.* Цифровая обработка изображений в задаче отслеживания движущегося объекта / Алпатов Б.А., Селяев А.А., Степашкин А.И. // Изв. вузов. Сер. «Приборостроение». — 2010. — № 2. — С. 39–43.
6. *Методы компьютерной обработки изображений;* коллектив авторов под ред. В.А. Соифера. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 784 с.
7. *Нестеров А.В.* Анализ методов цифровой обработки информации в системах компьютерного зрения и обзор областей применения данных систем / А.В. Нестеров // Вестник РГРТУ. — Рязань, 2008. — № 4 (Вып. 26). — С. 121–125.
8. *Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов:* коллективная монография; под ред. Р.Э. Пашенко. — Х.: ХООО «НЭО» ЭкоПерспектива», 2006. — 348 с.
9. *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения:* Курс лекций и практических занятий / [Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. и др.]. — М.: Физматкнига, 2010. — 672 с.
10. *Баклицкий В.К.* Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. — Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. — 360 с.

Поступила в редакцию 23.10.2014