

Методы структурного анализа изображения и приложения с использованием свойств градиентного поля

Д.Г. Асатрян^{1,2}

¹Российско-Армянский (Славянский) университет, ул. Овсепя Эмина 123, Ереван, Армения, 0051

²Институт проблем информатики и автоматизации НАН Армении, ул. П. Севаки 1, Ереван, Армения, 0014

Аннотация. Статья посвящена применению характеристик градиентного поля в избранных задачах интеллектуального анализа и обработки изображений. Для описания свойств и структуры изображения предлагаются несколько подходов и моделей, основанных на использовании характеристик градиентного поля. В частности, рассматриваются модели, основанные на распределении Вейбулла, представлен алгоритм оценки доминирующего направления изображения с использованием параметров эллипса рассеивания компонент градиентного поля и предложена мера подобия двух изображений с произвольными размерами и ориентацией. Приведены примеры применения этих моделей для оценивания размытости изображения, оценивания качества алгоритмов и программ масштабирования, интеллектуального анализа видеопотоков, а также в задаче обнаружения определенного объекта на видеоизображении, поставляемом беспилотным летательным аппаратом.

1. Введение

В последние два десятилетия в литературе по обработке изображений появилась новая философия, согласно которой визуальная система человека (ВСЧ) извлекает из изображения структурную (содержательную) информацию и она хорошо приспособлена для этой цели [1-3]. Соответственно, появились методы обработки изображений, которые дают результаты, лучше согласующиеся с восприятием ВСЧ, чем традиционно применяемые методы с использованием среднеквадратических критериев. В работах американского профессора А. Бовика и его коллег предложены меры оценивания качества, основанные на использовании структурных свойств изображений, и в многочисленных публикациях этих авторов и их последователей наглядно демонстрируется эффективность применения предложенных подходов.

Плодотворность приведённой философии побудила исследователей к поиску других мер, использующих структурные свойства изображения, с целью расширения круга решаемых задач, а в некоторых случаях и улучшения получаемых результатов.

Обзор литературы по данному вопросу заслуживает отдельного исследования и не входит в цели настоящей работы. Однако отметим, что огромное число методов посвящены алгоритмам определения различных структурных элементов (края и границы, контуры, углы и др.), эффективность которых в конечном счёте оценивается визуально. Многие из этих алгоритмов опираются на использование градиентов интенсивностей пикселей и связанных с ними характеристик.

Настоящая работа также основана на использовании информации, доставляемой градиентами, рассматривая её как характеристику структуры изображения.

2. Применяемые математические модели

Рассмотрим основные математические модели, применяемые в статье.

2.1. Градиентное поле изображения

Математически градиент функции двух переменных для каждой точки изображения — двумерный вектор, компонентами которого являются производные яркости изображения по горизонтали и вертикали. Функция яркости известна только в дискретных точках [4].

Пусть задано полутоновое изображение I , элементы матрицы интенсивностей пикселей которого принимают значения $I(m, n) \in \{0, 1, \dots, 255\}$, $m = 0, 1, \dots, M - 1$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Компоненты градиентного поля (ГП) изображения принято определять с помощью оператора Собела [4]. Применение оператора Собела для вычисления вертикального и горизонтального компонент градиента G_V и G_H сводится к свёртке локальной окрестности размера 3×3 каждой точки изображения с элементами матрицы, обозначенной через A , с масками той же размерности, обозначенными через S_V и S_H соответственно,

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix}, S_V = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}, S_H = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В результате получаются следующие линейные комбинации элементов матрицы A

$$G_V = -a_1 - 2a_2 - a_3 + a_7 + 2a_8 + a_9, \quad (1)$$

$$G_H = -a_1 - 2a_4 - a_7 + a_3 + 2a_6 + a_9, \quad (2)$$

по которым впоследствии для соответствующих точек изображения вычисляется магнитуда градиента M по формуле

$$M = \sqrt{G_V^2 + G_H^2}. \quad (3)$$

Совокупность пар (G_V, G_H) , вычисленных для всего изображения I называется градиентным полем изображения.

Мы рассматриваем ГП как объект, в определённом смысле характеризующий структуру изображения. При этом мы исходим из положения, что ряд свойств ГП доступны восприятию ВСЧ при визуальном рассмотрении изображения и извлечении нужной информации из него. Для иллюстрации сказанного приведём несколько простых примеров: рассчитаем магнитуды градиентов для всего изображения и, соблюдая определённые требования, визуализируем соответствующую матрицу (см. рисунок 1).



Рисунок 1. Примеры с визуализацией магнитуды градиентов.

Мы видим, что по приведённым изображениям легко узнавать исходные изображения. Более того, основные структурные элементы и объекты хорошо различимы и могут являться частью описания исходного изображения. Таким образом, ВСЧ при извлечении информации из изображения существенно использует информативность ГП. Кстати, это обстоятельство послужило основанием для выполнения огромного числа научных работ в мире по обработке изображений с использованием ГП (достаточно упомянуть работы по определению краёв, границ и контуров).

В настоящей работе расширяется круг задач с использованием определённых структурных свойств ГП. Ниже приведены эти свойства, модели и приложения.

2.2. Эллипс рассеяния градиентного поля

Обозначим через $\mu_H, \mu_V, \sigma_H, \sigma_V$ средние, среднеквадратические отклонения градиентных компонент (G_V, G_H), и через ρ_{HV} коэффициент корреляции между компонентами. Тогда семейство эллипсов рассеяния будут определяться формулой

$$\frac{1}{1 - \rho_{HV}^2} \left[\frac{(g_H - \mu_H)^2}{\sigma_H^2} - \frac{2\rho_{HV}(g_H - \mu_H)(g_V - \mu_V)}{\sigma_H\sigma_V} + \frac{(g_V - \mu_V)^2}{\sigma_V^2} \right] = C^2, \quad (4)$$

где C - константа.

Главная ось эллипса (4) представляет собой прямую ортогональной регрессии [5], причём наклон главной оси задаётся формулой

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 * \sigma_H \sigma_V \rho_{HV}}{\sigma_H^2 - \sigma_V^2 - \sqrt{(\sigma_H^2 - \sigma_V^2)^2 + 4\sigma_H^2 \sigma_V^2 \rho_{HV}^2}}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) нами используются в качестве оценки "доминантной ориентации" (ДО) или доминантного направления изображения [6]. Эта формула оказалась полезной в ряде задач обработки, в частности - в задачах регистрации изображений.

На рисунке 2 приведены несколько изображений с оценками доминантного направления α (отметим согласие оценок с результатом восприятия ВСЧ).

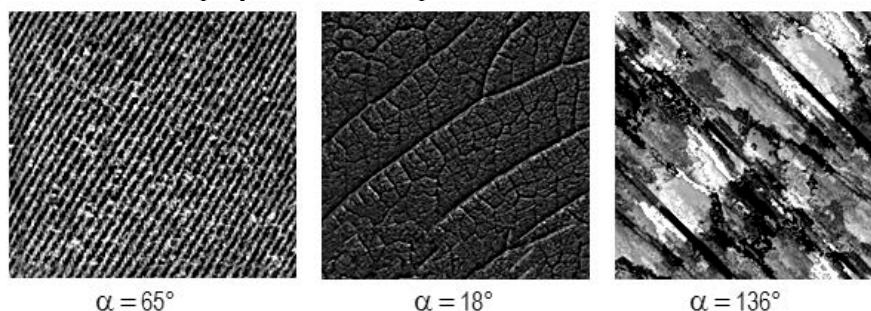


Рисунок 2. Примеры с результатами оценивания доминантного направления изображения.

В докладе приводятся несколько содержательных примеров использования предложенного понятия ДО.

2.3. Модели, основанные на распределении магнитуды градиента

Очевидно, что в общем случае говорить об определённом распределении интенсивностей пикселей всего изображения не совсем корректно ввиду того, что изображение несёт в основном смысловую нагрузку и зачастую содержит детали детерминированного характера. Однако формулы (1)-(2) позволяют, опираясь на приближённое выполнение центральной предельной теоремы, хотя бы с некоторыми оговорками и для малых окрестностей каждого пиксела, предлагать модели, позволяющие приближённо решать определённые задачи. Исходя из этого замечания для распределения магнитуды градиента принимаем двухпараметрическую функцию распределения Вейбулла [7]. Отметим, что в литературе по обработке изображений нередко применяют распределение Вейбулла, обобщённое гауссовское распределение и др.

Плотность распределения Вейбулла задаётся формулой

$$f(x; \lambda, \eta) = \frac{\eta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\eta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^\eta \right], x \geq 0, \quad (6)$$

где $\eta > 0$ - параметр формы, $\lambda > 0$ параметр масштаба.

Оценивание параметров η и λ можно производить методом моментов по матрице M . В частности, параметр формы η оценивается, решая относительно η уравнение

$$\frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}^2} + 1 = \frac{\Gamma(1 + 2/\hat{\eta})}{\Gamma^2(1 + 1/\hat{\eta})}, \tag{7}$$

где $\Gamma(\cdot)$ - Гамма-функция, $\hat{\mu}$ и $\hat{\sigma}^2$ выборочные среднее и дисперсия, рассчитанные по совокупности элементов матрицы M . Для численного решения уравнения (7) применяется метод деления отрезка пополам. Аналогично оценивается параметр масштаба.

2.3.1 Мера сходства двух изображений

Сходство (близость) двух изображений можно оценить по мере близости соответствующих эмпирических распределений Вейбулла, построенных по совокупности магнитуд градиентов сравниваемых изображений. Однако вместо непараметрических статистических критериев согласия мы применяем менее точную, но простую меру, основанную на близость оценок самих параметров вейбуллиевского распределения

$$W^2 = \frac{\min(\eta_1, \eta_2) \min(\lambda_1, \lambda_2)}{\max(\eta_1, \eta_2) \max(\lambda_1, \lambda_2)}, \quad 0 < W^2 \leq 1, \tag{8}$$

эта мера оказалась удобной и весьма полезной в ряде задач обработки больших массивов изображений. В частности, мера (8) устойчива при поворотах, сдвигах и обрезке изображений, если при данных трансформациях структурная информация мало искажена [7].

2.3.2. Примеры

На рисунке 3 приведены оригиналы изображения под номерами а), г) и е) и их трансформации, причём изображение б) получено поворотом изображения а) на 45° , а изображение в) получено увеличением размеров а) в 1,5 раза, изображение д) получено небольшой обрезкой г), а изображение ж) получено изменением размеров, поворотом и обрезкой е) одновременно.

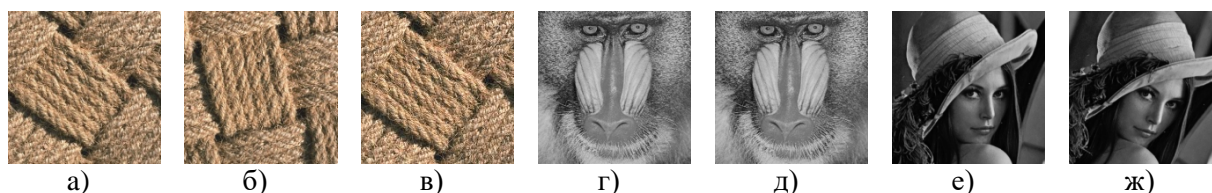


Рисунок 3. Примеры оригиналов изображений и их трансформаций.

В таблице 1 приведены результаты оценивания сходства соответствующих изображений при помощи известной меры PSNR и предложенной выше меры W^2 . Мы видим преимущество меры сходства W^2 относительно меры PSNR.

Таблица 1. Результаты оценивания сходства изображений рисунка 3.

Мера сходства	Изображения				
	а) и б)	а) и в)	б) и в)	г) и д)	е) и ж)
PSNR, дБ	12,5	-	-	18,5	13,5
W^2	0,97	0,94	0,96	0,998	0,97

Отмеченное выше свойство устойчивости рассматриваемой меры сходства относительно масштабирования и поворота позволяет успешно проводить исследования в различных прикладных задачах. В частности, эту меру можно использовать при пороскопических исследованиях отпечатков пальцев [8], классификации текстур [9] и др.

3. Приложения

3.1. Оценивание размытости изображения

Исследования показали, что в качестве меры размытости изображения можно использовать значение статистической оценки параметра формы η распределения Вейбулла, полученной по выборочным данным магнитуды градиента (матрица M). В работе [10] на смоделированных

данных размытия различных изображений показано, что значения оценок параметра η монотонно увеличивается по мере увеличения степени размытия. На рисунке 4 приведен пример изображения а) и его размытые образцы б) и в), а также пример выделения размытых участков д) изображения г). На изображении д) светлые участки соответствуют размытию.

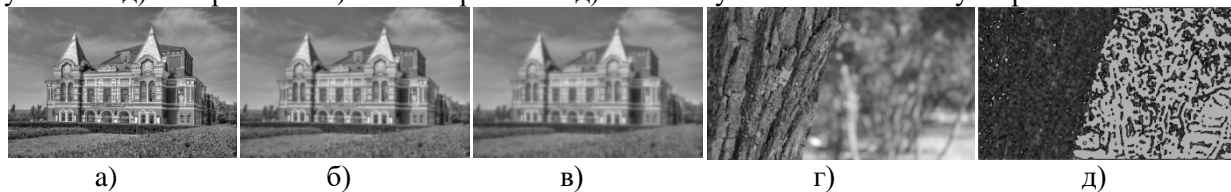


Рисунок 4. Примеры размытых изображений.

3.2. Оценивание качества алгоритмов масштабирования и поворота

Выполнение любой трансформации изображения с целью масштабирования или поворота вызывает искажение исходной информации, степень которого зависит от применяемого метода трансформации. В настоящее время оценивание качества получаемой в результате трансформации изображения, судя по доступной информации в Интернете, производится визуально, что нельзя признать приемлемым ввиду неоднозначности восприятия ВСЧ разными людьми. В литературе описаны также методы исследования качества алгоритмов масштабирования, основанные на выравнивании размера трансформированного изображения с исходным, чтобы можно было сравнивать их поточечными методами (см., например, [11]).

Для решения этой задачи важно применять методы, эффективно работающие в случае изображений с различными размерами и ориентацией, причём без дополнительных преобразований. Предложенный подход позволяет оценивать качество алгоритмов и программных средств масштабирования и поворота без привлечения дополнительных трансформаций [12].

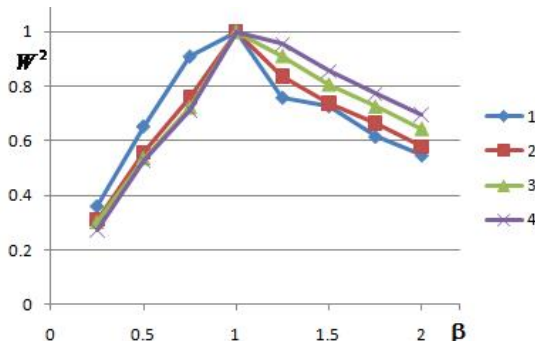


Рисунок 5. Зависимость меры сходства W^2 масштабированного (с коэффициентом β) изображения с исходным для четырёх алгоритмов интерполирования.

На рисунке 5 приведена зависимость меры сходства W^2 масштабированного изображения с исходным от коэффициента масштабирования β для четырёх популярных алгоритмов трансформации:

- 1 - интерполирование S-сплайнами;
- 2 - билинейное интерполирование;
- 3 - бикубическое интерполирование;
- 4 - интерполирование методом Lanczos.

Полученные результаты указывают на возможность выбора наиболее приемлемого метода масштабирования для конкретного изображения при значениях $\beta < 1$ или $\beta > 1$.

Отметим, что подобная методика разработана и для алгоритмов поворота [6]. В этой же работе введено понятие - "люфта" для алгоритмов трансформации изображения.

3.3. Интеллектуальный анализ видеопотоков

Используя предложенную в п. 2.3.1 меру сходства изображений разработана методика анализа видеопотоков с целью обнаружения в них скрытых закономерностей изменения содержания кадров. Процедура анализа включает следующие шаги:

Шаг 1. Сегментация видеопоследовательности при помощи нахождения точек скачка меры сходства изображений соседних кадров. Запоминание параметров (η, λ) распределения Вейбулла каждого обработанного кадра;

Шаг 2. Построение поля рассеивания параметров (η, λ) для каждого сегмента интереса;

Шаг 3. Поиск закономерности изменения флуктуаций внутри каждого сегмента методами регрессионного анализа.

В [13] описана предложенная процедура в деталях, а на рисунке 6 приводится пример, иллюстрирующий рассеивание значений параметров (η, λ) и прямая регрессии, характеризующие изменение содержания кадров внутри выбранного сегмента видеопоследовательности.

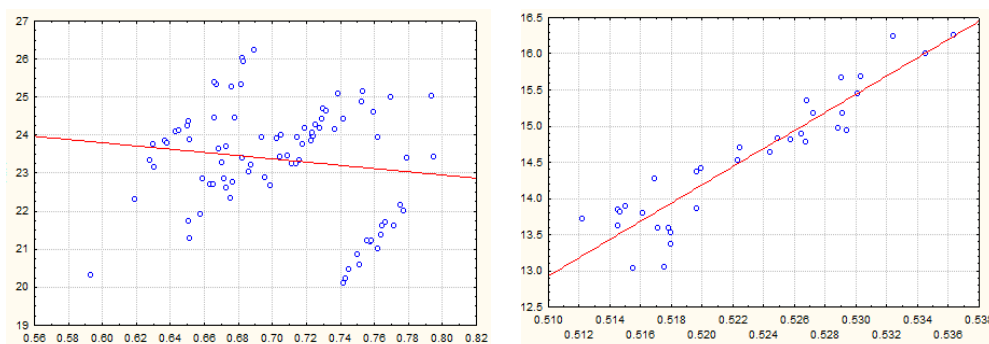


Рисунок 6. Рассеивание точек с параметрами (η, λ) и прямая регрессии. Зависимость незначима (слева); зависимость значима (справа).

Отметим, что приведённая процедура анализа также позволяет значительно ускорить процесс индексации видеопоследовательности, поскольку при этом вместо повторного анализа информации по всему кадру достаточно использовать уже найденные значения оценок параметров (η, λ) .

3.4. Поиск объекта беспилотным летательным аппаратом по заданному образцу

При помощи приведённых выше процедур оценивания сходства и ориентации изображений можно решать и более сложные задачи. Рассмотрим, например, задачу поиска объекта по заданному образцу в виде изображения, используя видеосъёмку БЛА на интересующей местности. Сложность этой задачи связана с наличием многочисленных факторов, влияющих на качество и содержание изображений на кадрах видеосъёмки. Основными факторами, постоянно действующими на процесс съёмки видеоизображения, являются эволюции аппарата, турбулентность атмосферы, наличие ветров, вибрации борта аппарата, а также внешние преднамеренные и непреднамеренные помехи и искажения изображения реальной сцены. Всё это приводит к тому, что в соседних кадрах видеосъёмки изображение одной и той же сцены, равно как и его геометрические параметры, отличаются непредсказуемым образом. Поэтому необходимо применять алгоритмы, достаточно устойчивые относительно искажений, вызванных указанными факторами.

В работе предложено при принятии решения о корректировке движения БЛА последовательно использовать оценки сходства и доминантных направлений изображений в текущем и предыдущем кадрах. Как показывают модельные расчёты [14,15], такая процедура позволяет решать задачу поиска объекта с приемлемым качеством. В докладе приводятся соответствующие примеры с экспериментальными результатами.

4. Заключение

В работе приведены основные математические модели, основанные на использовании распределения градиентного поля, которые характеризуют структурные свойства изображения. Рассматриваются некоторые задачи обработки изображения, решаемые с помощью приложения предложенных математических моделей. В частности, предложены методы и процедуры оценивания размытия изображения по величине оценки параметра формы распределения Вейбулла, согласованного с выборкой магнитуд градиентов, разработана методика оценивания качества алгоритмов и средств масштабирования и поворота изображения, приведён подход к интеллектуальному анализу видеопотоков, показана возможность поиска объекта беспилотным летательным аппаратом по заданному образцу, используя предложенную меру сходства изображений и алгоритм оценивания доминирующего направления изображения в кадрах видеопоследовательности.

5. Благодарности

Исследование выполнено в Российско-Армянском (Славянском) университете за счёт средств, выделенных в рамках субсидии МОН РФ на финансирование научно-исследовательской деятельности РАУ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 15Т-1В274.

6. Литература

- [1] Wang, Z. A universal image quality index / Z. Wang, A. C. Bovik // *IEEE Signal Process. Lett.* – 2002. – Vol. 9(3). – P. 81-84.
- [2] Wang, Z. Why is image quality assessment so difficult? / Z. Wang, A. C. Bovik, L. Lu // *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Orlando, FL.* – 2002. – Vol. 4. – P. 3313-3316.
- [3] Wang, Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang, A.C. Bovik // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 2004. – Vol. 13(4). – P. 600-612.
- [4] Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. - Москва: Техносфера, издание 3-е, исправленное и дополненное, 2012. – 1073 с.
- [5] Крамер Г. Математические методы статистики / под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1976. – 648 с.
- [6] Asatryan, D. Orientation Estimation with Applications to Image Analysis and Registration / D. Asatryan, K. Egiazarian, V. Kurkchian // *Information Theories and Applications.* – 2010. – Vol. 17(4). – P. 303-311.
- [7] Asatryan, D. Quality Assessment Measure Based on Image Structural Properties / D. Asatryan, K. Egiazarian // *Proc. of the International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing, Finland, Helsinki.* – 2009. – P. 70-73.
- [8] Asatryan, D. Novel Method for Analysis of Fingerprint Poroscopy Maps / D. Asatryan, G. Sazhmyan, B. Sakanyan // *Information Content and Processing.* – 2014. – Vol. 1(3). – P. 280-286.
- [9] Асатрян, Д.Г. Метод классификации текстур с использованием структурных характеристик изображения / Д.Г. Асатрян, В.В. Куркчян, Л.Р. Харатян // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 574-579.
- [10] Асатрян, Д.Г. Оценивание степени размытости изображения путём анализа градиентного поля / Д.Г. Асатрян // *Компьютерная оптика.* – 2017. – Т. 41(6). – С. 957-962.
- [11] Pankaj, S. Image Quality Comparison using PSNR and UIQI for Image Interpolation Algorithms / S. Pankaj, P. Parsania, V. Virparia // *Innovative Research in Computer and Communication Engineering.* – 2016. – Vol. 4(12). – P. 21679-21687. DOI: 10.15680/IJIRCC.2016.0412056.

- [12] Asatryan, D. A Method for Quality Assessment of Image Resizing Algorithms / D. Asatryan, V. Kurkchiyan, M. Bagramyan // *Mathematical Problems of Computer Science*. – 2012. – Vol. 36. – P. 128-132.
- [13] Asatryan, D. Novel Approach To Content-based Video Indexing and Retrieval by Using a Measure of Structural Similarity of Frames / D. Asatryan, M. Zakaryan // *Information Content and Processing*. – 2015. – Vol. 2(1). – P. 71-81.
- [14] Asatryan, D. Structure-Based Technique for Object Detecting in UAV Imagery / D. Asatryan // *Mathematical Problems of Computer Science*. – 2015. – Vol. 44. – P. 51-58.
- [15] Asatryan, D. Road Tracking from UAV Imagery Using Gradient Information / D. Asatryan, S. Hovsepyan, V. Kurkchiyan // *Information Technologies & Knowledge*. – 2016. – Vol. 10(2). – P. 191-199.

Gradient-Based Technique for Image Structural Analysis and Applications

D.G. Asatryan^{1,2}

¹Russian-Armenian (Slavonic) University - Hovsep Emin Str. 123, Yerevan, Armenia, 0051

²Institute for Informatics and Automation Problems of NAS Armenia - P. Sevaki Str. 1, Yerevan, Armenia, 0014

Abstract. The paper is devoted to application of gradient field characteristics in selected problems of image intellectual analysis and processing. To describe the properties and structure of an image several approaches and models based on the use of the gradient field characteristics, are proposed. In particular, the models based on Weibull distribution are considered, an image dominant direction estimation algorithm using the parameters of the scattering ellipse of the gradient field components is presented, and a similarity measure of two images with arbitrary dimensions and dominant orientation is proposed. Some examples of applications of these models for estimation of an image blur, for estimation of the quality of resizing algorithms and software, for intellectual analysis of a video are proposed, as well as a procedure for specified object detection on the image delivered by an unmanned aerial vehicle is described.

Keywords: Image gradient field, Weibull distribution, similarity measure, dominant orientation.