

УДК 621.391

ПРОСТРАНСТВЕННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ УГЛОВАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РЕПЕРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А.А. ЖУРАВЛЁВ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

Поступила в редакцию 3 июня 2014

Предложен метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на изображениях, основанный на определении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственной ориентации. Показано, что метод обеспечивает устойчивость идентификационных параметров реперов при изменении ориентации, масштаба, яркости, контраста, резкости и ракурса формирования изображения.

Ключевые слова: угловая параметризация реперов, угловая локализация реперов.

Введение

Локализация и параметризация реперов (характерных элементов) являются одними из центральных задач совмещения изображений. Для локализации и параметризации реперов широко используются методы SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [1] и SURF (Speeded-Up Robust Features) [2], основанные на вычислении значений градиентных полей в окрестностях реперов на множестве разномасштабных представлений изображения. Использование точек в качестве реперов и градиентных полей в окрестностях этих точек обуславливает ряд недостатков и ограничивает область применения данных методов. Во-первых, градиентные поля в окрестности точечных реперов имеют определенные размеры и ориентацию и, поэтому, чувствительны к масштабированию и повороту изображения. Для обеспечения инвариантности идентификационных параметров реперов к масштабированию и повороту в методах SIFT и SURF используется многомасштабное представление изображений и определение ориентации градиентного поля, что требует существенных вычислительных ресурсов, особенно на этапе локализации реперов. Другие элементы изображений, подходящие для использования в качестве реперов, такие как линии и сегменты, имеют определенную ориентацию и соотношение размеров, что обеспечивает инвариантность их параметров к масштабированию и повороту изображения. Во-вторых, при изменении яркости, контраста, резкости и ракурса формирования изображения точки, представленные их градиентными полями, уступают по вероятности и стабильности локализации другим элементам изображений, таким как линии и сегменты, хорошо сохраняющим свои характерные признаки даже при значительных искажениях изображений [3]. Данные недостатки обуславливают необходимость разработки новых методов локализации и параметризации реперов, основанных на использовании более стабильных элементов изображений в качестве реперов.

Целью работы является разработка метода локализации и параметризации реперов в точках пересечения прямых контурных линий, обеспечивающего стабильность идентификационных параметров реперов при изменении масштаба, ориентации, яркости, контраста, резкости и ракурса формирования изображения.

Метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на изображениях

Предлагается метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов (ARCP – Angular Range of Crossing Points) в точках пересечения прямых

контурных линий, основанный на определении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственной ориентации. Сущность метода состоит в определении угловых ориентаций прямых контурных линий относительно доминирующей ориентации, локализации реперов в точках пересечения прямых контурных линий и использовании длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственных ориентаций в качестве идентификационных параметров реперов. Метод обеспечивает инвариантность идентификационных параметров реперов к повороту и масштабированию изображения и их устойчивость к изменению яркости, контраста, резкости и ракурса формирования изображения за счет использования прямых контурных линий, имеющих стабильные локализацию, ориентацию и соотношение размеров.

Исходными данными для угловой параметризации реперов является множество $\{P_L(n)\}_{(n=0, N_L-1)}$ идентификационных параметров прямых контурных линий изображения, состоящее из идентификаторов $P_L(n) = \{(y_1(n), x_1(n)), (y_2(n), x_2(n))\}$, каждый из которых включает координаты $(y_1(n), x_1(n))$ и $(y_2(n), x_2(n))$ концов n -ой прямой контурной линии, удовлетворяющие условиям $b < y_i(n) < Y - b$ и $b < x_i(n) < X - b$ при $i=1,2$, где N_L – количество прямых контурных линий в области угловой параметризации реперов на изображении; Y, X – размеры изображения по вертикали и горизонтали; $b < \min(\lfloor Y/2 \rfloor, \lfloor X/2 \rfloor)$ – число пикселей, ограничивающих область угловой параметризации реперов на изображении; $\min(\cdot)$ – операция выбора минимального из двух значений; $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления до ближайшего целого с недостатком.

Алгоритм, реализующий метод угловой параметризации реперов, состоит из следующих шагов.

1. Определение угловых ориентаций прямых контурных линий изображения. Для каждой n -ой прямой контурной линии, задаваемой параметрами из множества $\{P_L(n)\}_{(n=0, N_L-1)}$, определяется угол $\alpha(n)$ ее наклона (угловая ориентация) относительно нижней границы изображения с помощью выражения

$$\alpha(n) = \arctan(|y_1(n) - y_2(n)| / |x_1(n) - x_2(n)|), \quad (1)$$

где $|\cdot|$ – операция по модулю.

2. Построение фазовой гистограммы прямых контурных линий изображения. Формируется фазовая матрица $D_P = \|d_P(\varphi)\|_{(\varphi=0, N_\varphi-1)}$ распределения вероятностей угловых ориентаций прямых контурных линий изображения, значения элементов $d_P(\varphi)$ которой определяют количества прямых контурных линий с угловыми ориентациями $\varphi(180/N_\varphi)$, где φ – индекс элемента фазовой матрицы; N_φ – число элементов в фазовых матрицах, определяющее точность учета угловых ориентаций прямых контурных линий. Для расчета индексов φ элементов фазовой матрицы используется выражение

$$\varphi = \lfloor \alpha(n) / N_\varphi \rfloor \text{ при } n = \overline{0, N_L - 1}. \quad (2)$$

Графическим отображением фазовой матрицы D_P является фазовая гистограмма, показывающая статистику угловых ориентаций прямых контурных линий на изображении. В качестве примера на рис. 1 приведены изображение и его фазовая гистограмма.

3. Определение доминирующей угловой ориентации прямых контурных линий изображения. Находится максимальный элемент фазовой матрицы D_P . Индекс φ_{MAX} максимального элемента указывает на доминирующую угловую ориентацию α_D прямых контурных линий, определяемую с помощью выражения

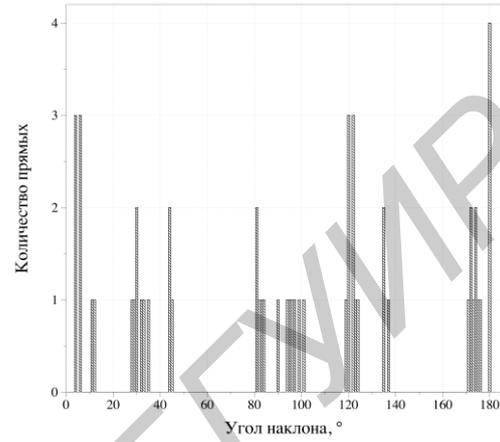
$$\alpha_D = \varphi_{MAX} (180 / N_\varphi). \quad (3)$$

4. Переопределение угловых ориентаций прямых контурных линий относительно доминирующей угловой ориентации. Для каждой n -ой прямой контурной линии с угловой ориентацией $\alpha(n)$ вычисляется нормированная угловая ориентация $\bar{\alpha}(n)$ относительно доминирующей угловой ориентации α_D с помощью выражения

$$\bar{\alpha}(n) = \alpha(n) - \alpha_D \text{ при } n = \overline{0, N_L - 1}. \quad (4)$$



a



б

Рис. 1. Статистика угловых ориентаций прямых контурных линий изображения:
a – тестовое изображение; *б* – фазовая гистограмма прямых контурных линий

5. Локализация реперов в точках пересечения прямых контурных линий. Для каждой бесконечной прямой, соответствующей прямой контурной линии с нормированной угловой ориентацией $\bar{\alpha}(n)$, определяются координаты $(y_C(n, m), x_C(n, m))$ реперов в точках пересечения с бесконечными прямыми, соответствующими прямым контурным линиям с нормированными угловыми ориентациями $\bar{\alpha}(m)$. Для управления точностью и скоростью локализации реперов значения нормированных угловых ориентаций $\bar{\alpha}(n)$ и $\bar{\alpha}(m)$ ограничиваются условиями

$$0 \leq \bar{\alpha}(n) < 90 - \alpha_S, \quad (5)$$

$$\text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) + 90 - \alpha_S) \leq \bar{\alpha}(m) \leq \text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) + 90 + \alpha_S), \quad (6)$$

где α_S – угол, определяющий сектор с угловым размером $2\alpha_S$, в котором отыскиваются пересекающиеся прямые; $\text{mod}_{180}(\cdot)$ – операция по модулю 180.

Значение α_S выбирается исходя из требуемой точности локализации и допустимого времени на локализацию реперов. Увеличение α_S приводит к увеличению числа реперов, времени и средней точности их локализации за счет увеличения числа пересекающихся прямых.

6. Угловая параметризация реперов. Для каждого репера с координатами $(y_C(n, m), x_C(n, m))$ формируется набор $\{\alpha_L(n, m), \alpha_C(n, m), R_L(n, m), R_C(n, m)\}$ идентификационных параметров, включающий угловую ориентацию $\alpha_L(n, m)$ n -ой прямой контурной линии, угол $\alpha_C(n, m)$ пересечения бесконечных прямых, соответствующих n -ой и m -ой прямым контурным линиям, нормированное расстояние $R_L(n, m)$ от конца n -ой прямой контурной линии до репера, нормированное расстояние $R_C(n, m)$ от конца m -ой прямой контурной линии до репера, которые вычисляются с помощью выражений

$$\alpha_L(n, m) = \bar{\alpha}(n), \quad (7)$$

$$\alpha_C(n, m) = \text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) - \bar{\alpha}(m)), \quad (8)$$

$$R_L(n, m) = L(n) / \max(L_1(n, m), L_2(n, m)), \quad (9)$$

$$R_C(n, m) = L(m) / \max(L_1(m, n), L_2(m, n)), \quad (10)$$

где $L(n) = \sqrt{(y_1(n) - y_2(n))^2 + (x_1(n) - x_2(n))^2}$, $L(m) = \sqrt{(y_1(m) - y_2(m))^2 + (x_1(m) - x_2(m))^2}$ – длины пересекающихся прямых контурных линий; $L_1(n, m) = \sqrt{(y_1(n) - y_C(n, m))^2 + (x_1(n) - x_C(n, m))^2}$, $L_2(n, m) = \sqrt{(y_C(n, m) - y_2(n))^2 + (x_C(n, m) - x_2(n))^2}$, $L_1(m, n) = \sqrt{(y_1(m) - y_C(n, m))^2 + (x_1(m) - x_C(n, m))^2}$, $L_2(m, n) = \sqrt{(y_C(n, m) - y_2(m))^2 + (x_C(n, m) - x_2(m))^2}$ – расстояния от концов отрезков до точек пересечения прямых контурных линий; $\max(\cdot)$ – операция выбора максимального из двух значений.

7. Отбор уникальных реперов. Для исключения ошибок идентификации при совмещении изображений в качестве реперов могут использоваться те, идентификационные параметры которых удовлетворяют условию $\forall \alpha_L(n, m) \exists \alpha_L(n, k) ((\alpha_C(n, m) = \alpha_C(n, k)) \wedge (R_L(n, m) = R_L(n, k)) \wedge (R_C(n, m) = R_C(n, k)))$ (11) при $n = 0, N_L - 1, m \neq k$.

8. Ранжирование уникальных реперов. В зависимости от взаимного положения и длин двух прямых контурных линий уникальные реперы, локализуемые в точках пересечения бесконечных прямых, которым принадлежат рассматриваемые прямые контурные линии, могут быть ранжированы с присвоением ранга $G(n, m)$, устанавливающим приоритет выбора реперов для идентификации при совмещении изображений в порядке убывания значений. Ранг $G(n, m)$ вычисляется с помощью выражения

$$G(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } L_1(n, m) + L_2(n, m) = L(n), \\ 2 & \text{при } (L_1(n, m) + L_2(n, m) > L(n)) \wedge (b < y_C(n, m) < Y - b) \wedge (b < x_C(n, m) < X - b), \\ 3 & \text{при } (L_1(n, m) + L_2(n, m) > L(n)) \wedge ((y_C(n, m) \leq b) \vee (y_C(n, m) \geq Y - b) \vee \\ & \vee (x_C(n, m) \leq b) \vee (x_C(n, m) \geq X - b)), \end{cases} \quad (12)$$

где $G(n, m) = 1$ – определяет реперы, локализуемые в точках пересечения прямых контурных линий (рис. 2, а); $G(n, m) = 2$ – определяет реперы, локализуемые в пределах области угловой параметризации реперов в точках пересечения прямых, которым принадлежат непересекающиеся прямые контурные линии (рис. 2, б); $G(n, m) = 3$ – определяет реперы, локализуемые за пределами области угловой параметризации реперов в точках пересечения прямых, которым принадлежат непересекающиеся прямые контурные линии.

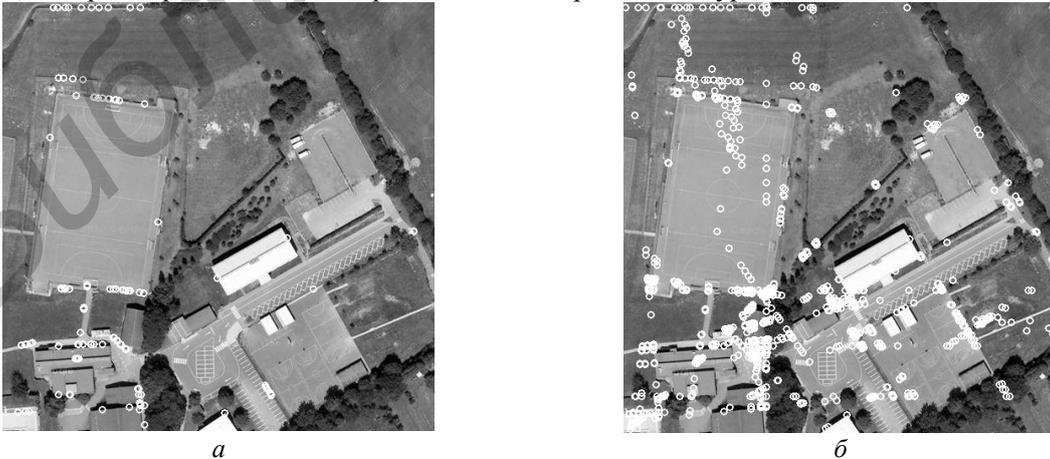


Рис. 2. Ранжирование уникальных реперов: а – реперы с рангом 1; б – реперы с рангом 2

9. Формирование реперных идентификаторов. Каждому уникальному реперу, локализованному на шаге 7 и ранжированному на шаге 8 алгоритма, ставится в соответствие

элемент множества $P_R = \{p_R(i)\}_{(i=0, N_R-1)}$ реперных идентификаторов, где N_R – число локализованных на изображении уникальных реперов; $p_R(i) = \{\hat{G}(i), \hat{\alpha}_L(i), \hat{\alpha}_C(i), \hat{R}_L(i), \hat{R}_C(i), \hat{y}(i), \hat{x}(i)\}$ – реперный идентификатор, состоящий из параметров $\hat{G}(i) = G(n, m)$, $\hat{\alpha}_L(i) = \alpha_L(n, m)$, $\hat{\alpha}_C(i) = \alpha_C(n, m)$, $\hat{R}_L(i) = R_L(n, m)$, $\hat{R}_C(i) = R_C(n, m)$, $y_C(i) = y_C(n, m)$, $x_C(i) = x_C(n, m)$ при $n \in [0, N_L - 1]$, $m \in [0, N_L - 1]$, $n \neq m$.

Сформированные в результате выполнения данного алгоритма реперные идентификаторы $p_R(i) = \{\hat{G}(i), \hat{\alpha}_L(i), \hat{\alpha}_C(i), \hat{R}_L(i), \hat{R}_C(i), \hat{y}(i), \hat{x}(i)\}$ позволяют идентифицировать соответствующие реперы на двух перекрывающихся изображениях. Это может быть сделано, например, с помощью метода RANSAC [4] или другого аналогичного метода. Параллакс, возникающий при изменении ракурса формирования изображения, может быть учтен за счет определения допустимого разброса значений для параметров $\hat{\alpha}_L(i)$, $\hat{\alpha}_C(i)$, $\hat{R}_L(i)$, $\hat{R}_C(i)$.

Оценка эффективности пространственно-ориентированной угловой параметризации реперов

Для оценки эффективности предложенного метода локализации и параметризации реперов произведено его сравнение с методами SURF/RANSAC. В качестве критериев эффективности использованы устойчивость идентификационных параметров реперов к изменению яркости и контраста изображения.

Оценка устойчивости идентификационных параметров реперов получена на основе вычисления значений числа сохраненных реперов при различных значениях яркости и контраста изображения.

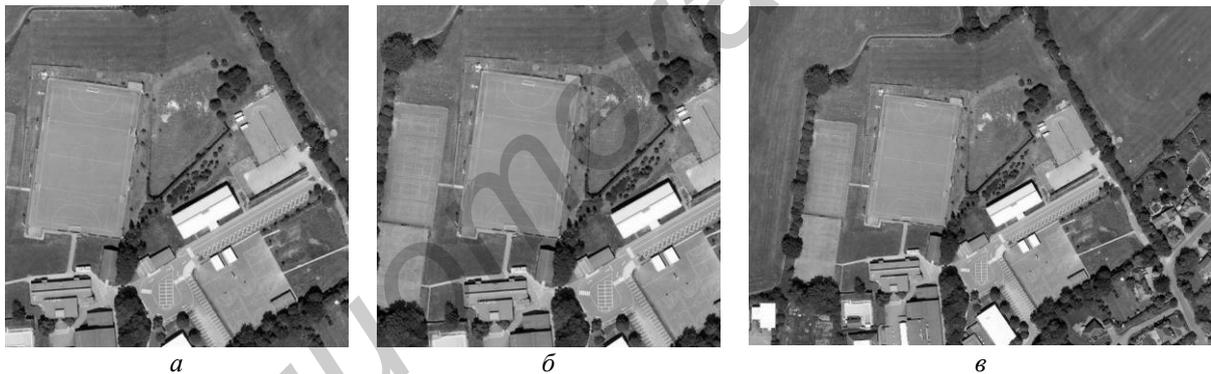


Рис. 3. Тестовые изображения:

а – прогнозируемый кадр; б – опорный кадр; в – фрагмент фотоплана

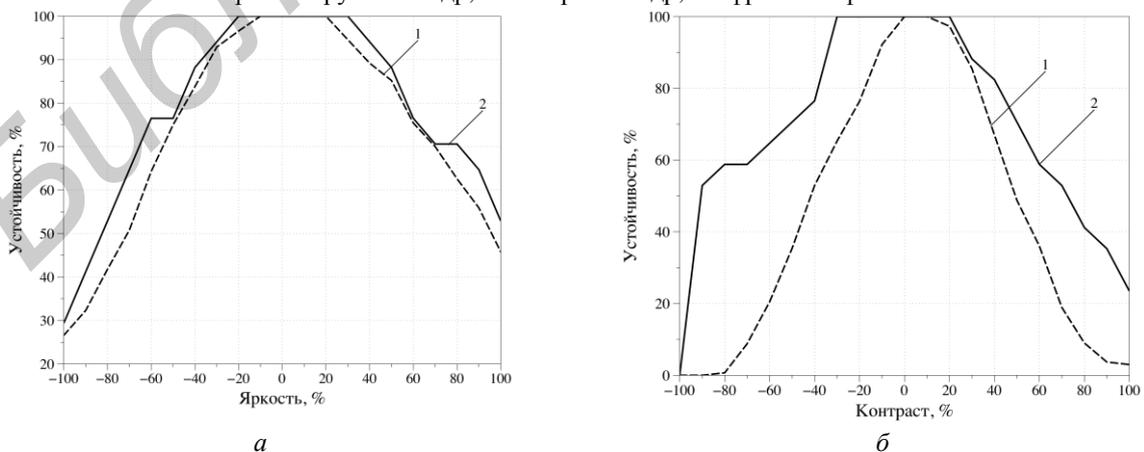


Рис. 4. Устойчивость к изменению: а – яркости; б – контраста; 1 – SURF/RANSAC, 2 – ARCP

В результате эксперимента над тестовыми изображениями (рис. 3), установлено, что при изменении яркости в пределах от -90 до -50 %, а также от 75 до 90 % предложенный

метод примерно на 8 % более устойчив по сравнению с методами SURF/RANSAC (рис. 4). При изменении контраста изображения в пределах от –100 до –20 % и от 40 до 100 % предложенный метод обеспечивает выигрыш в устойчивости на 25–55 % и 15–30 % соответственно по сравнению с SURF/RANSAC.

Экспериментально установлено, что локализация, параметризация и идентификация реперов на изображении на компьютере (процессор Intel i5 2,27 ГГц) в среде MatLab 2012b с использованием предложенного метода составляет 0,74 с, что на 20 % быстрее по сравнению с методами SURF/RANSAC (время локализации, параметризации и идентификации 0,89 с).

Заключение

Предложен метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на изображении, ориентированный на применение в условиях изменения яркости и контраста изображения. Сущность метода состоит в определении угловых ориентаций прямых контурных линий относительно доминирующей ориентации изображения, локализации реперов в точках пересечения прямых контурных линий и использовании длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственных ориентаций в качестве идентификационных параметров реперов. Показано, что при изменении яркости изображения в пределах от –90 до –50 % и от 75 до 90 % предложенный метод обеспечивает увеличение устойчивости на 8 % по сравнению с методами SURF/RANSAC. При изменении контраста изображения в пределах от –100 до –20 % и от 40 до 100 % предложенный метод обеспечивает повышение устойчивости на 25–55 % и 15–30 % соответственно по сравнению с методами SURF/RANSAC. Выигрыш предложенного метода в быстродействии на 20 % по сравнению с известными методами SURF/RANSAC достигается за счет уменьшения вычислительной сложности.

DIMENSIONAL ORIENTED ANGULAR LOCALIZATION AND PARAMETERIZATION

A.A. ZHURAVLYOV, V.Yu. TSVIATKOU

Abstract

A method of dimensional oriented angular localization and parameterization is proposed. The method based on detection of lengths and angles of crossings of straight contour lines uses dimensional orientation. This method ensures the stability of identification parameters of reference points when the orientation, scale, brightness, contrast, sharpness are changes.

Список литературы

1. *Lowe D.G.* // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60, № 2. P. 91–110.
2. *Bay H.* // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110, № 3. P. 346–359.
3. *Журавлев А.А., Цветков В.Ю.* // Тез. докл. 5-й Международ. научн. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. Минск, 25–26 мая 2011 г. С. 112–114.
4. *Fischler M.A., Bolles R.C.* // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24 (6). P. 381–395.