

УДК 004.932

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА

Алпатов Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации и информационных технологий в управлении (АИТУ) Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: aitu@rsreu.ru
Бабаян П.В., к.т.н., начальник научной лаборатории кафедры АИТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru
Шубин Н.Ю., аспирант РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru

Ключевые слова: оценка координат, преобразование Радона, модифицированное преобразование Радона, обнаружение прямых.

Введение

Оценка координат объектов – одна из задач компьютерного зрения, которая решается в настоящее время с использованием большого количества подходов [1]. Одним из перспективных направлений в этой области является использование алгоритмов на основе структурного анализа изображений. В соответствии с ними изображение объекта рассматривается как комбинация геометрических примитивов, таких как точки, прямые, дуги эллипсов и т.д. Отслеживание их перемещений за кадр позволяет оценить изменения координат самого объекта.

Для обнаружения прямолинейных границ объектов часто используют преобразование Радона. В данной работе под прямолинейной границей объекта на изображении будет пониматься область сильного перепада яркости изображения, состоящая из пикселей, лежащих вдоль одной прямой. Однако в случае большого количества прямолинейных границ либо значительного уровня шума вероятность ложного обнаружения сильно возрастает. Известны различные пути увеличения устойчивости преобразования Радона к шумам на исходном изображении, такие как подбор подходящего фильтра выделения границ на исходном изображении, фильтрация результата преобразования Радона [2], уменьшение области интегрирования добавлением третьего измерения в параметрическое пространство [3].

Цель работы – разработка алгоритма оценки координат объектов на основе выделения прямолинейных границ с помощью преобразования Радона и модификация преобразования Радона для более эффективного его использования в задаче обнаружения прямых.

Преобразование Радона для непрерывной двумерной функции $f(x, y)$ определяется следующим выражением:

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \Big|_{\substack{x=s \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \\ y=s \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha}} dz, \quad (1)$$

Рассмотрена задача оценки координат объекта с прямолинейными границами с помощью преобразования Радона. Предложено модифицированное преобразование Радона, позволяющее более качественно выделять прямые в условиях значительного аддитивного некоррелированного шума на исходном изображении. Разработан алгоритм оценки координат объектов на основе обычного и модифицированного преобразований Радона. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма.

где $R(s, \alpha)$ – результат преобразования; (s, α) – параметры прямой, вдоль которой проводится интегрирование [4]. Наглядно геометрический смысл параметров s и α продемонстрирован на рис. 1.

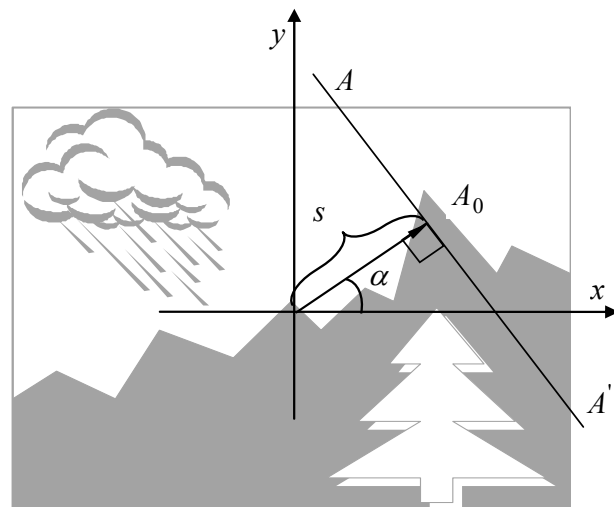
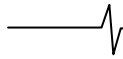


Рис. 1. Геометрический смысл преобразования Радона

На рис. 1 схематично изображено преобразуемое полутоновое изображение $f(x, y)$. Начало координат совпадает с центром изображения. Прямая AA' задаётся полярными координатами (s, α) ближайшей к началу координат точки A_0 прямой AA' . Величина $R(s, \alpha)$ вычисляется путём интегрирования $f(x, y)$ вдоль прямой AA' .

Модифицированное преобразование Радона

В большинстве известных алгоритмов, описанных в литературе, для обнаружения прямолинейных границ объектов используется преобразование Радона [5] от скалярного двумерного поля, являющегося результатом обработки исходного изображения каким-либо фильтром выделения границ. При этом информация о направлении яркостного перепада теряется, что неизбежно сказывается на качестве



обнаружения. Очевидно, что направление вектора градиента в области границы двух объектов различной яркости будет близко к направлению перпендикуляра к самой границе. Таким образом, учёт направления градиента может позволить улучшить качественные характеристики обнаружения прямолинейных границ объектов. Предлагается видоизменить выражение (1) путём замены подынтегрального выражения квадратом проекции вектора градиента исходного изображения на вектор нормали к прямой интегрирования. Результатом является выражение:

$$R'(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\nabla f(x, y), \vec{n} \right)^2 \Big|_{\substack{x=s \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \\ y=s \cdot \sin \alpha - z \cdot \cos \alpha}} \cdot dz, \quad (2)$$

где \vec{n} – нормаль к прямой AA' ($\vec{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$). В данном случае в качестве $f(x, y)$ выступает изображение оригинальное, а не обработанное алгоритмом обнаружения границ. Раскрыв скобки, можно привести выражение (2) к следующему виду:

$$\begin{aligned} R'(s, \alpha) = & \cos^2 \alpha \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right)^2 \Big|_{\substack{x=s \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \\ y=s \cdot \sin \alpha - z \cdot \cos \alpha}} \cdot dz + \\ & + \sin 2\alpha \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=s \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \\ y=s \cdot \sin \alpha - z \cdot \cos \alpha}} \cdot dz + \\ & + \sin^2 \alpha \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^2 \Big|_{\substack{x=s \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \\ y=s \cdot \sin \alpha - z \cdot \cos \alpha}} \cdot dz \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой взвешенную сумму трёх обычных преобразований Радона от квадратов производных исходного изображения по горизонтали и вертикали, а также от произведения этих производных.

Алгоритм измерения координат объекта на основе преобразования Радона

В рамках данной работы разработан алгоритм, использующий результат обычного либо модифицированного преобразования Радона для оценки координат объекта на видеоизображении. Положение объекта представлено в виде описанного вокруг объекта прямоугольника и на первом кадре задаётся вручную. На всех последующих кадрах алгоритм оценивает координаты объекта, основываясь на оценках перемещений прямолинейных границ внутри области интереса кадра. Область интереса имеет форму прямоугольника с центром в точке, где был обнаружен объект на предыдущем кадре. Алгоритм обработки очередного кадра состоит из следующих этапов:

- 1) обычное преобразование Радона от модуля градиента области интереса исходного изображения либо модифицированное преобразование Радона от области интереса исходного изображения;
- 2) поиск локальных максимумов результата обычного либо модифицированного преобразования Радона;
- 3) поиск взаимного соответствия полученных максимумов на текущем и предыдущем кадрах;
- 4) оценка сдвига изображения в области интереса;
- 5) сдвиг области интереса и оцениваемого положения объекта.

Рассмотрим некоторые этапы алгоритма более подробно.

Поиск локальных максимумов преобразования Радона выполняется с учётом особенностей преобразования Радона. Предполагается, что количество

искомых границ на изображении известно заранее. Составляется предварительный список всех локальных максимумов преобразования Радона в порядке убывания их значений. В окончательный список локальных максимумов поочередно добавляются максимумы из предварительного списка, начиная с самого первого элемента. При этом для снижения вероятности обнаружения двух близких максимумов, соответствующих одной прямой, для каждого нового максимума, претендующего на добавление в окончательный список, проверяется условие (4):

$$\left(\left(|s_i - s_j| \geq \Delta s_{\min} \right) \vee \left(|\alpha_i - \alpha_j| \geq \Delta \alpha_{\min} \right) \right) \wedge \left(\left(|s_i + s_j| \geq \Delta s_{\min} \right) \vee \left(|\alpha_i - \alpha_j| \leq 180^\circ - \Delta \alpha_{\min} \right) \right), \quad (4)$$

где: (s_i, α_i) – координаты проверяемого максимума; (s_j, α_j) – координаты максимума из окончательного списка; Δs_{\min} и $\Delta \alpha_{\min}$ – минимально допустимые расстояния между максимумами по осям s и α соответственно;

$$\alpha_i, \alpha_j \in [-90^\circ, 90^\circ], s_i, s_j \in \left[-\frac{d}{2}, \frac{d}{2} \right],$$

d – длина диагонали исходного изображения в пикселях. Очередной максимум (s_i, α_i) проверяется на близость по выражению (4) с каждым максимумом (s_j, α_j) , уже принадлежащим окончательному списку.

Если выражение (4) выполняется для каждого (s_j, α_j) , то (s_i, α_i) добавляется в окончательный список максимумов. Алгоритм выполняется до тех пор, пока количество максимумов в окончательном списке не достигнет заданного числа, либо предварительный список не подойдёт к концу.

Вторая пара неравенств (4) вытекает из следующего свойства преобразования Радона:

$$R(s, \alpha + 180^\circ) = R(-s, \alpha) \quad (5)$$

Из (5) следует, что точки $(s, -90^\circ)$ и $(-s, 90^\circ)$, находящиеся в двух противоположных границах области определения функции $R(s, \alpha)$, соответствуют одной прямой на исходном изображении.

Поиск взаимного соответствия максимумов на соседних кадрах производится в два этапа. Сначала составляется матрица, номера столбцов которой соответствуют максимумам, найденным в текущем кадре, а номера строк – максимумам в предыдущем кадре. Каждый элемент матрицы численно выражает степень отличия координат соответствующих максимумов, вычисляемую по следующей формуле:

$dif = k_\alpha \cdot \Delta \alpha + k_s \cdot \Delta s$, где: $\Delta \alpha$ и Δs – расстояния между максимумами по осям α и S , k_α и k_s – весовые коэффициенты. При этом, исходя из (5), берутся два различных значения $\Delta \alpha$ и Δs , а значение dif выбирается минимальным из этих двух вариантов.

Далее ведётся поиск минимального элемента заполненной матрицы. Соответствующие этому элементу максимумы преобразования Радона считаются принадлежащими одной прямой в разных кадрах. Из матрицы удаляется

строка и столбец, на пересечении которых лежал найденный элемент, а затем ищется следующий минимальный элемент. Операция повторяется до тех пор, пока в матрице есть элементы, а найденные минимумы не превышают некоторого порогового значения.

Оценка сдвига объекта в области интереса выполняется на основе полученных пар максимумов на соседних кадрах в предположении, что каждая найденная пара максимумов соответствует своей прямой, перемещающейся в зоне интереса от кадра к кадру. Если прямая с параметрами (s, α) будет параллельно перенесена на вектор $(\Delta x, \Delta y)$, то её новыми параметрами будут:

$$(s', \alpha') = (s - \Delta x \cdot \cos \alpha + \Delta y \cdot \sin \alpha, \alpha) \quad (6)$$

Для оценки $(\Delta x, \Delta y)$ составляется система уравнений вида:

$$\begin{pmatrix} -\cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ \vdots & \vdots \\ -\cos \alpha_m & \sin \alpha_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1' - s_1 \\ s_2' - s_2 \\ \vdots \\ s_m' - s_m \end{pmatrix} \quad (7)$$

где: (s_i', α_i') и (s_i, α_i) – координаты i -ой прямой в текущем и предыдущем кадрах соответственно, m – количество прямых. Система (7) в общем случае является несовместной, и ищется её псевдорешение.

На последнем этапе работы алгоритма вычисляются абсолютные координаты объекта на изображении путём суммирования координат объекта на предыдущем кадре с оценками сдвига объекта, полученными из (7).

Для компенсации смещения объекта относительно области интереса все найденные на текущем кадре прямые смещаются на $(-\Delta x, -\Delta y)$ по выражению (6). Полученные координаты прямых используются для обработки следующего кадра на этапе поиска соответствия максимумов.

Экспериментальные исследования

Для сравнения эффективности обычного и модифицированного преобразований Радона в задаче оценки координат объекта были проведены экспериментальные исследования. В качестве тестовой видеопоследовательности выбран видеосюжет, снятый с вертолёт, движущегося над городом. Ряд наземных объектов остаются в кадре на протяжении всего сюжета. Один из таких объектов с контрастом 0,5 (при изменении яркостей в диапазоне $[0,1]$) выбран в качестве объекта интереса. Для оценки качества работы алгоритмов измерения координат объектов используется критерий, подробно описанный в [6]. Он сравнивает рамку вокруг объекта, оцененную алгоритмом (рис. 2 а, б), с эталонной заданной вручную рамкой объекта в каждом кадре (рис. 2 в). Показатель качества определяется выражением:

$$K = \frac{2S_{\text{Po} \cap \text{Pa}}}{S_{\text{Po}} + S_{\text{Pa}}}, \quad (8)$$

где K – показатель качества оценки координат объекта в текущем кадре ($K \in [0,1]$); S_{Po} , S_{Pa} и $S_{\text{Po} \cap \text{Pa}}$ – площади эталонной рамки объекта, рамки объекта, оценённой алгоритмом, и их пересечения соответственно. В общем случае, как эталонная рамка, так и рамка, оценённая алгоритмом, способны менять не только положение, но и размер. Однако разработанный алгоритм учитывает лишь преобразования сдвига и не меняет размер рамки в процессе работы. При проведении экспериментальных исследований значения критерия (8) суммировались, начиная с первого кадра и до первого «срыва» алгоритма,

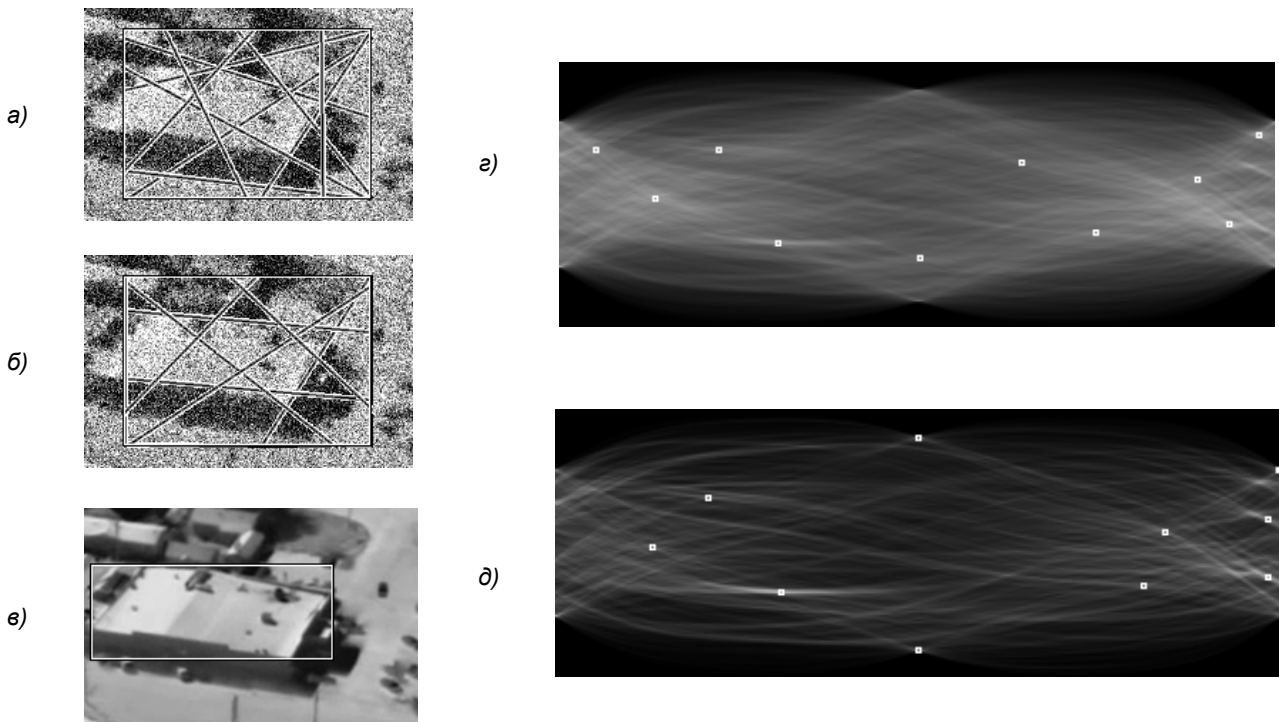
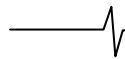


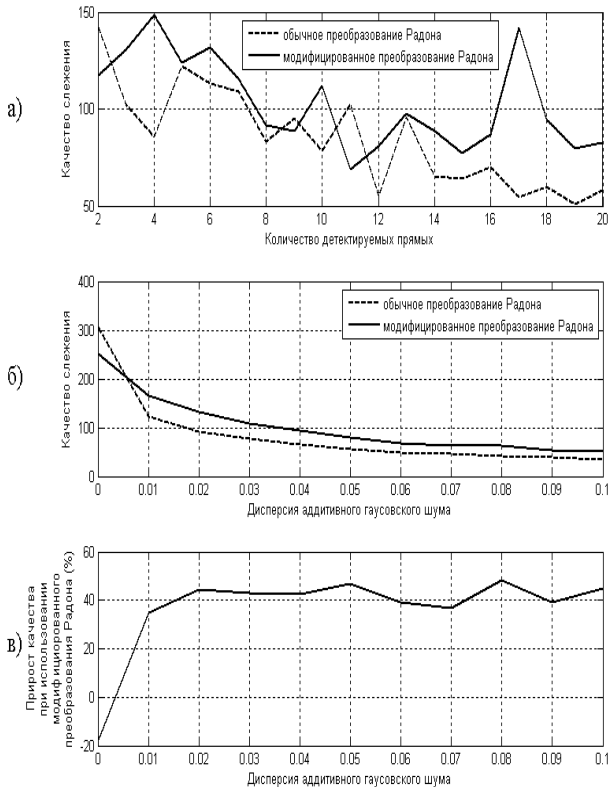
Рис. 2. Промежуточные результаты работы алгоритмов оценки координат объектов на примере видеопоследовательности, используемой в эксперименте (дисперсия аддитивного шума составляет 0,06; количество детектируемых прямых – 10); (а), (б) – прямолинейные границы объектов, обнаруженные с помощью алгоритмов на основе обычного и модифицированного преобразований Радона соответственно; (в) – исходное изображение без зашумления; (г), (д) – найденные максимумы результатов обычного и модифицированного преобразований Радона соответственно



т.е. до первого кадра, в котором $K = 0$.

Эксперименты проводились при различных значениях дисперсии аддитивного шума в диапазоне $[0; 0,1]$ с шагом 0,01. Количество прямых, детектируемых с помощью преобразования Радона, менялось в диапазоне $[2; 20]$. При каждом конкретном значении этих параметров моделирование проводилось более 10 раз для различных реализаций шума, а качество работы алгоритмов по результатам моделирования усреднялось по всем реализациям. Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

Рис. 3. Основные результаты экспериментальных исследований; (а) – усреднённая для разных уровней



шума зависимость качества работы алгоритмов от количества детектируемых прямых; (б) – усреднённая для различного количества детектируемых прямых зависимость качества работы алгоритмов от дисперсии аддитивного некоррелированного шума; (в) – прирост качества алгоритма оценки координат объекта при использовании модифицированного преобразования Радона в процентах по сравнению с алгоритмом на основе обычного преобразования Радона

Заключение

Алгоритм оценки координат объекта на основе преобразования Радона, предлагаемый в данной работе, имеет значительно большую устойчивость к аддитивному некоррелированному

шуму по сравнению с алгоритмом, основанным на обычном преобразовании Радона. Из рис. 3в очевидно, что в задаче оценки координат объектов с прямолинейными границами при наличии шума на изображении прирост качества составляет около 40%.

Алгоритм может быть реализован для использования в системах обнаружения и сопровождения объектов в реальном времени, в том числе в бортовых системах навигации роботов, пилотируемых и беспилотных аппаратов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 07.514.11.4034).

Литература

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 176: ил.
2. D.B. Volegov, V.V. Gusev and D.V. Yurin. Straight line detection on images via Hartley transform fast Hough transform // GraphiCon'2006, 16-th International Conference, Novosibirsk Akademgorodok, Russia, 2006.
3. A.C. Copeland, G. Ravichandran, and M.M. Trivedi. Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, Issue 1, 1995. – 35-45 pp.
4. Toft P.A., «The Radon Transform: Theory and Implementation», PhD Thesis, Technical University of Denmark, 1996.
5. Бабаян П.В., Шубин Н.Ю. Выделение прямолинейных границ на основе модифицированного преобразования Радона // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 16-й международной научнотехнической конференции. – Рязань, 2010. – С. 21-23.
6. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Шубин Н.Ю. Повышение точности измерения параметров подвижных объектов в оптико-механических системах // Тезисы докладов XII международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение». – М., 2010. Т.2 – С. 120-123.

OBJECT COORDINATES ESTIMATION ALGORITHM BASED ON RADON TRANSFORM

Alpatov B.A., Babayan P.V., Shubin N.J.

The problem of linear edge object coordinates estimation is described in this paper. The algorithm based on Radon transform is suggested. Line detection quality is increased by Radon transform modifying. Object coordinates estimation algorithm based on common and modified Radon transform is also suggested. The results of experimental research of the proposed algorithm are presented.