

УДК 004.932

АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ДЕСКРИПТОРА ВНЕШНЕГО КОНТУРА

Алпатов Б.А., д.т.н., заведующий кафедрой автоматики и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: aitu@rsreu.ru;

Бабаян П.В., к.т.н., доцент кафедры автоматики и информационных технологий в управлении РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru;

Смирнов С.А., н.с. кафедры автоматики и информационных технологий в управлении РГРТУ;

Масленников Е.А., студент РГРТУ.

Ключевые слова: определение ориентации, дескриптор внешнего контура, геосфера, углы Эйлера.

Введение

Оценивание пространственной ориентации объекта по его изображению является актуальной задачей технического зрения [1]. Оценивание пространственной ориентации объектов наиболее востребовано в таких приложениях как:

- управление наземными мобильными роботами, пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами;
- автоматическая дозаправка летательных аппаратов;
- стыковка космических кораблей [2];
- формирование изображений в системах улучшенного и синтезированного видения;
- анализ и индексация видеосюжетов.

В работах [3, 4] был предложен подход к решению задачи оценивания пространственной ориентации объекта, состоящий из двух этапов: обучение и оценивание. На этапе обучения происходит расчет дескрипторов эталонных изображений объекта при равномерно распределенных на сфере ориентациях. Эталонные изображения формируются на основе 3D-модели исследуемого объекта. На этапе оценивания для определения ориентации объекта находится дескриптор эталонного изображения, который в наибольшей степени соответствует дескриптору наблюдаемого изображения. Представлено 3 алгоритма оценивания пространственной ориентации объекта, основанных на данном подходе: с использованием БПФ, с использованием текстурных характеристик, с использованием структурного анализа. Следует отметить, что предложенные алгоритмы обладают рядом недостатков. Так, алгоритм на основе текстурного анализа чувствителен к шуму. Два других алгоритма обладают большой вычислительной сложностью. В настоящей работе представлен алгоритм, при разработке которого предпринималась попытка удовлетворить требованиям к невысокой вычислительной сложности и устойчивости к шуму.

Основным отличием предлагаемого алгоритма от разработанных в [4], является способ описания изображения объекта. В качестве описания изображения используется дескриптор внешнего контура. Дескриптор внешнего контура обладает следующими преимуществами:

- независимость от текстурных характеристик изобра-

Рассмотрена задача оценивания пространственной ориентации объекта по его двумерному изображению с использованием известной трехмерной модели объекта. Предложен алгоритм предварительного оценивания пространственной ориентации объекта с помощью дескриптора внешнего контура. Представлены результаты экспериментальных исследований предложенного алгоритма.

жения объекта;

- устойчивость к изменению освещения объекта;
- небольшой размер дескриптора;
- низкие вычислительные затраты для вычисления дескриптора и функции сопоставления дескриптора;
- высокая устойчивость к шуму.

Результатом работы представленного в статье алгоритма является множество ориентаций-кандидатов, в наилучшей степени соответствующих наблюдаемому изображению объекта по критерию близости дескриптора внешнего контура. Выбор из этого множества одного элемента, который принимается за оценку текущей ориентации объекта, не является предметом рассмотрения в настоящей статье и может осуществляться на основе анализа яркостных, геометрических, спектральных параметров объекта, а также их поведения во времени.

Представление ориентации объекта в пространстве. Дискретизация сферы

Для математического описания пространственной ориентации объекта будем использовать углы Эйлера [5, 6] (α, β, γ) . Для нашей задачи примем соглашение, при котором осуществляются последовательные повороты вокруг осей X, Y, Z в глобальной системе координат. Углы Эйлера в данном случае будут соответствовать матрице вращения, которую можно вычислить по формуле:

$$R = R_z \cdot R_y \cdot R_x, \quad (1)$$

где R_z, R_y, R_x – матрицы вращения вокруг осей Z, Y, X соответственно.

Отметим, что в этом случае третий угол Эйлера γ соответствует углу поворота камеры вокруг оптической оси.

Поскольку в предложенном алгоритме осуществляется сопоставление дескриптора наблюдаемого с эталонными дескрипторами, возникает задача построения множества эталонов, равномерно охватывающих все возможные ориентации объекта интереса. Использо-

ние равномерно дискретизированных углов Эйлера не позволяет построить такое множество, поэтому для решения этой задачи в данной работе был использован алгоритм построения геосферы [7].

Для описания равномерно распределенных ориентаций рассмотрим сферу единичного радиуса, в центре которой находится объект интереса. Каждой точке сферы (x, y, z) можно сопоставить углы Эйлера α и β , оставив γ свободным (поворот камеры вокруг оптической оси). Пары углов (α, β) , равномерно распределенные по сфере, получаются в результате построения геосферы фактора g , вписанной в рассматриваемую единичную сферу. Вершины построенной геосферы соответствуют первым двум углам Эйлера. Параметр γ не дискретизируется, поскольку используемая в предложенном алгоритме критериальная функция, рассматриваемая ниже, инвариантна к параметру γ .

Выбор фактора геосферы влияет на количество точек геосферы (N_g) и максимально возможным углом между радиус-векторами точки единичной сферы и ближайшей точки геосферы (E_{max}). В табл. 1 приведены параметры геосферы в зависимости от фактора геосферы.

Таблица 1. Параметры геосферы в зависимости от фактора геосферы

g	N_g	$E_{max}, ^\circ$
1	12	17,6
2	42	10,2
3	92	6,8
4	162	5,4
5	252	4,3
6	362	3,6
7	492	3,1
8	642	2,7
9	812	2,4

Выбор фактора геосферы должен происходить исходя из компромисса между вычислительной сложностью, пропорциональной параметру N_g и требуемой точностью оценивания ориентации, который имеет один порядок с параметром E_{max} . В данной работе для построения геосферы был выбран фактор $g = 6$.

Экспериментальные исследования в настоящей работе проводились на синтезированных изображениях с использованием 3D-модели пассажирского самолёта Airbus A320.

Дескриптор внешнего контура

Для каждой точки геосферы производится синтез изображения объекта интереса и вычисляется дескриптор, основанный на характеристиках контура объекта. После бинаризации эталонного изображения (рис. 1а) получаем бинарное изображение объекта с ярко выраженным контуром (рис. 1б). Данное изображение переводится в полярную систему координат с началом координат в центре бинарного изображения объекта (рис. 1в). Зададимся длиной дескриптора N_D . Для вычисления дескриптора объекта формируем функцию

$$\rho_i = \tilde{D}(\phi_i), \text{ выбирая для каждого } \phi_i = \frac{(i-1) \cdot 2\pi}{N_D},$$

$i = \overline{1, N_D}$, максимальное соответствующее ему ρ . Для удаления артефактов, связанных с синтезом изображения, функция $\tilde{D}(\phi_i)$ подвергается медианной фильтрации с окном фильтра длиной 5 элементов. Полученную дискретную функцию $\rho_i = D(\phi_i)$ (рис. 1г) назовём дескриптором внешнего контура объекта. Для упрощения дальнейшего изложения будем использовать аргумент i вместо ϕ_i , таким образом $\rho_i = D(i)$.

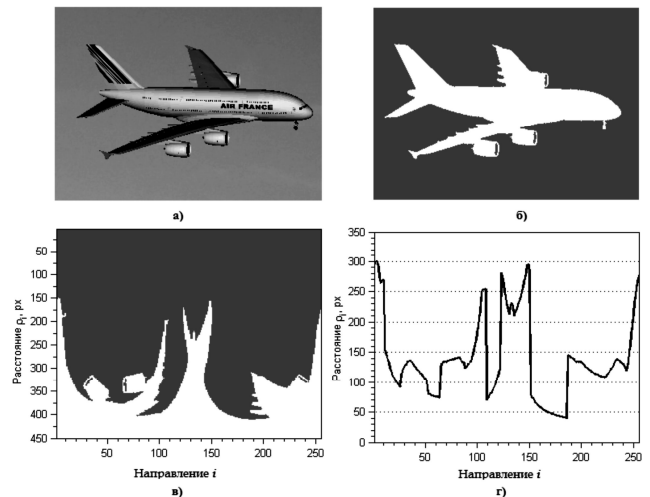


Рис. 1. Этапы вычисления дескриптора внешнего контура: а – исходное изображение объекта; б – бинарное изображение объекта; в – бинарное изображение в полярной системе координат; г – дескриптор внешнего контура объекта

Экспериментально было подтверждено, что данный дескриптор обладает высокой устойчивостью к шуму. Для оценки устойчивости к шуму был введен показатель отличия дескрипторов, вычисляющийся по формуле:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} \frac{|D(i) - G(i)|}{D(i)}, \quad (2)$$

где $D(i)$ – i -й элемент дескриптора без зашумления, $G(i)$ – i -й элемент дескриптора, вычисленного на зашумленном изображении с ОСШ $= \sigma$.

Величина ε_σ описывает, насколько изменяется дескриптор зашумленного изображения объекта относительно дескриптора того же изображения объекта без зашумления. Значения показателя ε_σ для различного уровня зашумления приведены в табл. 2.

Таблица 2. Показатель отличия дескриптора на зашумленном изображении

ОСШ	50	20	10	5
$\varepsilon_\sigma, \%$	0,03	0,16	0,65	2,63

Сопоставление дескрипторов

Определение ориентации объекта происходит в результате сопоставления дескриптора наблюдаемого изображения с каждым дескриптором эталонной геосферы. Определение сходства дескриптора наблюдаемого изо-

бражения с дескрипторами эталонных изображений осуществляется с использованием критериальной функции:

$$f_{crit}(j) = \min_{s \in S} \left[\sum_{i=1}^{N_D} (D_0(i-s) - D_j(i))^2 \right], \quad (3)$$

$$S = \{s : s = \overline{1, N_D}\}$$

где D_0 – дескриптор наблюдаемого изображения, D_j – дескриптор текущего эталонного изображения, i – индекс элемента дескриптора, j – индекс эталонного дескриптора, s – величина циклического сдвига дескриптора.

Выбранный тип критериальной функции обеспечивает инвариантность дескриптора к повороту изображения.

Индекс j эталонного дескриптора соответствует точке геосферы, то есть двум углам α и β из тройки углов Эйлера.

Обозначим через s_0 значение сдвига s , при котором выражение в квадратных скобках в (3) принимает минимальное значение.

$$s_0(j) = \arg \min_{s \in S} \left[\sum_{i=1}^{N_D} (D_0(i-s) - D_j(i))^2 \right], \quad (4)$$

$$S = \{s : s = \overline{1, N_D}\}$$

Отсюда угол γ вычисляется по формуле:

$$\gamma = \frac{s_0 \cdot 2\pi}{N_D} \quad (5)$$

В результате вычисления критериальной функции для каждого дескриптора из эталонной базы получается вектор значений критериальной функции:

$$M = (f_{crit}(j) | j = \overline{1, N_g}) \quad (6)$$

Обозначим через M_{sort} вектор значений критериальной функции, сортированный по возрастанию. Были проведены исследования, в результате которых было обнаружено, что, как правило, хотя бы один из первых $m = N_g \cdot 0,025$ элементов вектора M_{sort} соответствует текущей ориентации объекта с ошибкой оценивания ориентации до 10° . Так, для геосферы фактора 6, получаем $m = 9$ ориентаций-кандидатов.

Среди полученных m ориентаций-кандидатов встречаются похожие ориентации. Для сокращения неопределенности оценивания ориентации производится объединение групп ориентаций-кандидатов в кластеры [8]. Для кластеризации строится граф, вершинами которого являются ориентации-кандидаты. Между вершинами строится дуга, только в случае, когда угловое отличие между ними не превышает заданного порога. Связные компоненты графа образуют кластеры. В качестве углового отличия между ориентациями-кандидатами используется расстояние в гиперкомплексном пространстве между соответствующими им кватернионами.

На рис. 2 показаны ориентации, отобранные как кандидаты при оценивании ориентации $E = [-80,3^\circ -49^\circ 83,4^\circ]$.

Рассчитанные кластеры для приведенного выше примера показаны в табл. 3

Таблица 3. Результат кластеризации

№ кластера	1	2	3	4
Элементы кластера	1 3 4 5	2 6 9	7	8

Элементом, представляющим кластер, можно считать элемент кластера соответствующий наименьшему значению критериальной функции или усредненное значение всех элементов в кластере. На рис. 3 показаны ориентации-кандидаты после кластеризации.

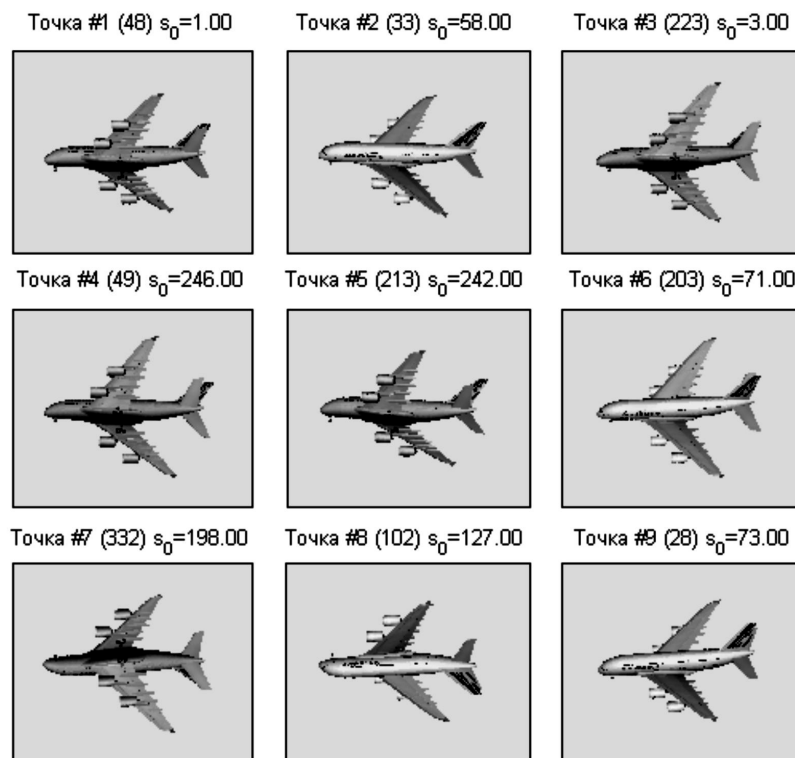
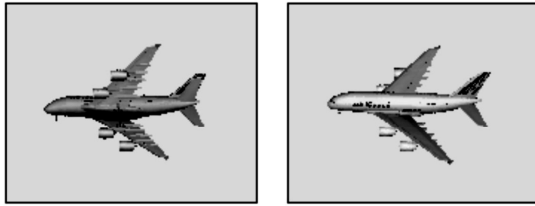


Рис. 2. Изображения 9 ориентаций-кандидатов

Кластер #1 (Точка=48) $s_0=1$ Кластер #2 (Точка=33) $s_0=58$



Кластер #3 (Точка=223) $s_0=3$ Кластер #4 (Точка=49) $s_0=246$

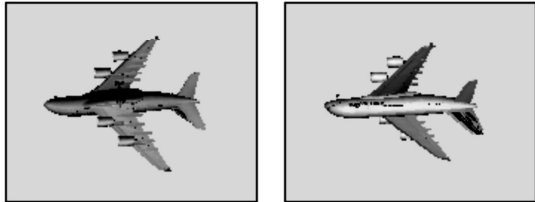


Рис. 3. Изображения 4 лучших кандидатов после этапа кластеризации

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований было синтезировано 500 изображений. Распределение ориентаций объекта было близко к равномерному. Полученные изображения были искажены равномерным аддитивным шумом с различной интенсивностью. На стадии обучения были рассчитаны дескрипторы объекта по геосфере фактора 6. В ходе исследования производилась совмещение дескриптора наблюдаемого изображения с эталонными дескрипторами. Затем проводилась кластеризация наилучших отобранных точек.

Частота события, заключающегося в том, что ориентация, соответствующая первому элементу вектора M_{sort} , является правильным результатом оценивания для различных уровней зашумления показана в табл. 4.

Таблица 4

ОСШ	∞	25	15	10	5
Частота	98,5%	98,1%	97,2%	94,5%	77,9%

Была рассчитана величина m – минимальное количество элементов вектора M_{sort} , среди которых присутствует элемент, соответствующий значению ориентации с допустимой ошибкой e . Значения m для различных уровней зашумления и величины допустимой ошибки $e < 10^\circ$ показаны в табл. 5. Вычисленные значения становятся полезными на этапе кластеризации отобранных дескрипторов.

Таблица 5

ОСШ	∞	25	15	10	5
Величина m при $e < 10^\circ$	4	3	5	9	30

В ходе исследования было выявлено, что в результате кластеризации ориентаций-кандидатов всегда получалось от 1 до 5 кластеров. Распределение частот различного количества кластеров показано в табл. 6.

Таблица 6

Количество кластеров	1	2	3	4	5
Частота	3,2%	53,5%	32%	9,5%	1,8%

Заключение

Разработанный алгоритм предварительного определения ориентации подтвердил свою работоспособность в ходе экспериментальных исследований. Данный алгоритм обладает невысокой вычислительной сложностью (составление дескрипторов производится в 20 раз быстрее, чем в алгоритмах, предложенных в [4]). Экспериментальные исследования подтвердили устойчивость алгоритму к шуму на наблюдаемом изображении.

В отличие от алгоритмов, предложенных в [4], результатом рассматриваемого в этой работе алгоритма является набор ориентаций-кандидатов. Следуя данным из табл. 4, можно сделать вывод, что если считать результатом оценивания первую ориентацию-кандидата, то вероятность правильного оценивания будет составлять от 78% до 98,5% в зависимости от интенсивности зашумления изображения.

Работа выполнена при поддержке гранта RFMEFI57414X0056 Министерства образования и науки РФ.

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. – 176 с
2. Бахшиев А.В., Степанов Д.Н., Кирпань Н.А. Программный комплекс определения пространственной ориентации объектов по телевизионному изображению // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – №1 (1) – С.71-75
3. Бабаян П.В., Масленников Е.А. Алгоритмы оценивания пространственной ориентации объекта по его двумерному изображению // Доклады 15-й междунар. конф. DSPA-2013 том-2. – М., 2013 – С.58-62.
4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Масленников Е.А. Алгоритмы оценивания ориентации объекта по его двумерному изображению в бортовых системах видеослежения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2013. – №3. – С. 3-8.
5. Bekir E. Introduction to Modern Navigation Systems // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 255 p., 2007.
6. Slabaugh, G.G. (1999). Computing Euler angles from a rotation matrix. Retrieved on August, 6, 2000.
7. Saff E., Kuijlaars A. «Distributing many points on a sphere» // The Mathematical Intelligencer, 1997, Vol. 19, No. 1. – pp. 5-11.
8. Schaeffer S. E. Graph clustering // Computer Science Review. – 2007. – Т. 1. – №. 1. – С. 27-64.

ALGORITHM OF PRELIMINARY POSE ESTIMATION USING EXTERNAL CONTOUR DESCRIPTOR

Alpatov B.A., Babayan P.V., Maslennikov E.A.

Problem of object three-dimensional pose estimation from its two-dimensional image using 3d-model of object is considered. The algorithm of preliminary pose estimation using external contour descriptor is offered. Results of experimental research of these algorithms are shown.