

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ И ВЫСОКОТОЧНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ТРЕХМЕРНОГО БЕСТЕКСТУРНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ КОНТУРНОГО АНАЛИЗА

А.Е. Артемьев

arsoft@mail.ru

ГосНИИАС, Москва, Российская Федерация
УУНиТ, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Приведен быстродействующий алгоритм определения трех угловых координат трехмерного бестекстурного объекта на основе контурного анализа монокулярных изображений. Алгоритм можно применять для определения углового положения воздушных судов, космических аппаратов и других объектов. Вычисление угловых координат основано на сопоставлении дескрипторов наблюдаемого и эталонного контуров объекта. На этапе подготовки дескриптора эталонного контура объекта его трехмерная поверхность, задаваемая полигональной сеткой, преобразуется в трехмерный дескриптор на основе трехмерного дискретного преобразования Фурье. Угловые координаты определены путем решения задачи минимизации разности дескриптора Фурье наблюдаемого контура и дескриптора эталонного контура, получаемого двухмерной интерполяцией из трехмерного дескриптора эталонного контура. Для достижения быстродействия и высоких показателей точности в алгоритме реализован принцип итерационного повышения точности интерполяции дескриптора эталонного контура. В целях повышения скорости работы алгоритма выполнено распараллеливание процесса поиска оптимизационных минимумов. Приведено описание алгоритма, продемонстрированы результаты моделирования работы реализованного алгоритма с синтезированными изображениями воздушного судна на этапе посадки. По результатам моделирования быстродействие алгоритма без применения графического процессора составило 0,25 мс на один

Ключевые слова

Контурный анализ, угловые координаты, ориентация, навигация, воздушное судно, космический аппарат, бестекстурный объект, компьютерное зрение

объект в режиме обнаружения и менее 0,1 мс в режиме слежения. Среднеквадратическое отклонение погрешности определения угловых координат составило порядка 0,23...0,3°

Поступила 20.12.2023

Принята 03.05.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. Распознавание и определение пространственного положения объекта, слежение за объектом на изображении в реальном масштабе времени являются актуальными задачами для наземных, бортовых, космических систем технического зрения. Однако решение этих задач требует существенных вычислительных ресурсов и быстродействующих методов обработки информации. Разработанные в настоящее время алгоритмы определения пространственного положения объекта могут быть быстродействующими, но недостаточно точными, либо точными, но недостаточно быстродействующими. Для разрешения данного противоречия актуальным является разработка быстродействующего и высокоточного алгоритма. Подобный алгоритм может быть применен при решении следующих задач:

- улучшение характеристик навигационной информации (точности, целостности, непрерывности) для воздушных судов и беспилотных воздушных судов на этапах посадки и взлета;

- распознавание угрожающих объектов и определение их относительного пространственного положения, например, при рулении в районе аэродрома;

- контроль пространственного положения относительно наблюдаемого объекта, например, при стыковке космических аппаратов на орбите.

При определении навигационных параметров объекта по монокулярному изображению нахождение углового положения является ключевой задачей, поскольку линейные координаты вычисляются по соотношениям радиусов наблюдаемого и эталонного контуров, угловым координатам объекта и положению центра объекта на изображении. При этом точность определения угловых координат очень важна, поскольку влияет на точность линейных координат. Вычисление пространственной ориентации также требует больших вычислительных ресурсов.

Цель настоящей работы — разработка быстродействующего высокоточного алгоритма определения угловых координат объекта в качестве основного метода определения его пространственного положения.

Разработка алгоритмов контурного анализа, позволяющих определять пространственное положение объекта, ведется достаточно давно. Так, в [1] рассмотрены алгоритмы применения дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в задачах распознавания и определения ориентации воздушных су-

дов, уделено внимание интерполяционным свойствам дескрипторов Фурье, отмечено, что основной проблемой является низкое быстродействие подобных алгоритмов, например, для изображений размером 128×128 получено быстродействие в 3,6 с на платформе PDP 11/45.

Сравнение результатов моделирования из [1] с реальными данными выполнено в [2], там же приведена блок-схема алгоритма. Среди более поздних работ можно отметить [3], где рассмотрен метод определения пространственного положения летательного аппарата, основанный на минимизации невязки площадей между реальным и эталонным контурами по метрике Никодима. При этом угловые координаты объекта определены перебором по двум углам с применением ε -сети эталонных контуров и по третьему углу, вершинам выпуклых оболочек реального и эталонного контуров. Моделирование выполнялось на аппаратной платформе Intel Core Quad 8200 для изображений размером 640×480 . Быстродействие составило 0,5...2 с для задачи определения пространственного положения и 1...4 с для задачи распознавания объектов. При математическом моделировании получены следующие характеристики погрешностей: средние погрешности по углам курса, тангажа и крена равны 4,08, 0,76 и $2,76^\circ$ соответственно; максимальные погрешности — 24, 3 и 16° соответственно.

Сравнение быстродействия различных алгоритмов на базе дескрипторов Фурье, структурного анализа, текстурного анализа и дискретных дескрипторов приведено в [4]. В результате сравнения изображений размером 256×256 выявлено: быстродействие дескрипторов Фурье составляет 1,2 с, структурного анализа — 2,1 с, текстурного анализа — 0,6 с и дискретного дескриптора — 0,5 с, средние абсолютные погрешности равны $9,1...9,9^\circ$, $4,6...5,6^\circ$, $7,5...50,1^\circ$ и $5,1...5,6^\circ$ соответственно.

Метод обработки двумерных монокулярных 2D-изображений для решения задачи определения положения бестекстурных космических объектов с шестью степенями свободы рассмотрен в [5]. Предложенный метод основан на поэтапном уточнении положения объекта по форме контура. На первом этапе для грубого сравнения метод использует порядка 3000 эталонных изображений объекта в разных положениях, наблюдаемое изображение сравнивается с эталонным посредством инвариантных моментов Ху. Затем на этапе точного поиска выявляются 2D-3D-соответствия путем сопоставления признаков алгоритма ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) и индексации цвета. Быстродействие предложенного алгоритма составляет 1,1 с, средние абсолютные погрешности по углам курса, тангажа и крена равны 0,653, 0,411 и $0,244^\circ$ соответственно.

Метод определения пространственного положения воздушного судна на основе моментов псевдо-Цернике предложен в [6]. На этапе подготовки данных сформирована библиотека изображений объекта и соответствующих им моментов контуров объекта в разных положениях. Для этого синтезируются эталонные изображения контуров при изменении двух угловых координат при фиксированном значении расстояния до объекта. Всего формируется 1396 эталонных изображений контуров. На этапе анализа изображения для приблизительной оценки пространственного положения вычисляется момент псевдо-Цернике наблюдаемого контура, который сравнивается с моментами, хранящимися в эталонной базе данных, при этом определяются три пространственные координаты: две угловые и одна линейная. Далее выполняется сравнение форм посредством метода *Shape context*, который позволяет определить оставшиеся две линейные и одну угловую координаты. На финальном этапе полученные координаты уточняются с помощью метода *Distance Image Iterative Least Square (DI-ILS)*. В результате моделирования на аппаратной платформе Intel Core i5-3470 определены время вычисления относительного положения 2,78 с и погрешности по углам $\sim 0,5^\circ$. Оценка выполнялась для одного изображения.

Алгоритм контурного анализа на базе дискретных дескрипторов предложен в [7], эталоном является набор дескрипторов для 252 угловых положений на сфере, координаты вычисляются путем сравнения наблюдаемого контура и набора эталонных дескрипторов с распараллеливанием процесса на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Оценка быстродействия алгоритма проводилась на аппаратной платформе Intel Core i7-4790 3.6 МГц (ПК) и Xilinx Virtex 7 FPGA (ПЛИС). Получены следующие результаты по быстродействию для изображений размером 256×256 : 0,5 с для ПК и 0,09 с для ПЛИС (объекты с предсказуемой траекторией), 0,9 с для ПК и 0,1 с для ПЛИС (объекты с непредсказуемой траекторией). Средняя погрешность по углам $\sim 6,1...6,4^\circ$. В работах [8, 9] по сравнению с [3] дополнительно введена предобработка алгоритма, что ускорило работу алгоритма в 10–25 раз. Получены следующие результаты для изображений размером 640×480 и 720×576 на аппаратной платформе Intel Core2 Quad Q8200 2.3 ГГц: средняя абсолютная погрешность для метода опорных точек равна $1,5^\circ$ и для метода внешних контуров — $\sim 4^\circ$; время распознавания объекта составило менее 0,5 с для базы из восьми объектов при частоте кадров 25 Гц [8] и 40...280 мс [9] (в зависимости от вероятности распознавания). Отметим тенденцию к разработке нейросетевых алгоритмов на основе контурных признаков для определения пространственных координат воздушного судна.

В работе [10] предложена архитектура искусственной нейронной сети, состоящая из двух сверточных подсетей (CNN), одна из которых определяет 2D-ориентацию самолета на изображении, а другая выполняет детектирование скелета самолета, при этом подсети получают информацию от подсети DenseASPP, которая служит для определения внутренней взаимосвязи между задачами обнаружения скелета и оценки ориентации и точно настраивает каждую подсеть для соответствующей задачи. Для обучения использована среда обучения Caffe на аппаратной платформе NVIDIA RTX1080 8GB, Intel Core™ i7-4790K CPU (4.0 GHz) 16GB RAM, время работы алгоритма составило 36 мс, ориентация объекта определялась не в полном объеме, а в виде проекции вектора на 2D-плоскость. Алгоритм определения углов ориентации самолета на монокулярных изображениях предложен в [11]. Алгоритм состоит из двух этапов: на первом этапе выполняется семантическая сегментация объекта с помощью нейросетевых алгоритмов (*ResNet-18*, *Inception-ResNet-v2*, *MobileNet-v2*, *Xception*, *ResNet-50*), на втором этапе путем 2D-3D-сопоставления вычисляются угловые координаты. Наилучший результат получен с помощью сети *ResNet-50*. Средние абсолютные погрешности по углам крена, тангажа и курса составили 17,2, 1,16 и 17,1° соответственно.

Описание метода. *Одномерный дескриптор Фурье.* Разработанный алгоритм определения угловых координат реализует метод, в основу которого положено вычитание из дескриптора контура наблюдаемого объекта дескриптора эталонного контура, а также поиск минимального значения разности с помощью оптимизационных методов. Используемый в методе дескриптор контура объекта — это набор нормализованных коэффициентов, которые получаются в результате ДПФ набора полярных координат. В качестве начала полярной системы координат выбирается центроид контура, а нулевой луч направляется горизонтально влево. На рис. 1 показан контур вертолета МИ-8 в полярной системе координат с равномерной разбивкой по углу. Различные способы задания контуров рассмотрены в [12–14].

Приведем краткое описание дескриптора Фурье и его свойств. Рассмотрим ДПФ

$$C(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m)W^{km},$$

где $C(k)$ — комплексные коэффициенты; N — число узловых точек, взятых для выполнения ДПФ; $X(m)$ — последовательность действительных

чисел, которые являются радиусами от центроида контура до его узловых точек, полярные углы радиусов к узловым точкам задаются как $m2\pi/N$ ($m, k = 0, 1, \dots, N - 1$); $W = e^{-i2\pi/N}$.

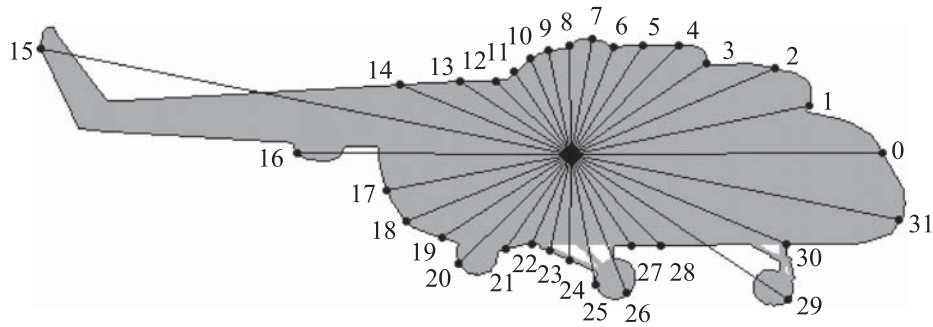


Рис. 1. Контур вертолета МИ-8 (положение узловых точек контура при выполнении ДПФ контура для $N = 32$; цифрами обозначены номера радиусов в последовательности $X(m)$; углы курса 124° , тангажа 0 и крена $6,2^\circ$)

Набор коэффициентов $C(k)$ ДПФ определяется как дескриптор Фурье, который инвариантен к перемещению и вращению. Если выполнить нормирование коэффициентов дескриптора относительно $C(0)$, то дескриптор становится инвариантным к масштабу:

$$DF = \left[C(0), \frac{C(1)}{C(0)}, \frac{C(2)}{C(0)}, \dots, \frac{C(N-1)}{C(0)} \right], \quad (1)$$

где DF — нормированные коэффициенты дескриптора Фурье. Отдельный нормализованный коэффициент дескриптора можно записать как $DF(k)$, где $k = 0, 1, \dots, N - 1$, N — число узловых точек, взятых для выполнения ДПФ.

Применение дескрипторов Фурье позволяет выполнять частотную фильтрацию наблюдаемого контура путем простого усечения высоких гармоник, а также выполнять интерполяцию эталонного контура для промежуточных положений. Дескриптор Фурье позволяет управлять точностью и быстродействием алгоритма, что было использовано при его реализации.

Дескриптор 3D. Одномерный дескриптор Фурье, приведенный ранее, описывает контур объекта лишь в одном положении и не в состоянии описать контур объекта со сложной 3D-поверхностью при его произвольной пространственной ориентации, поскольку контур существенно меняется при изменении углового положения. Поэтому традиционно для определе-

ния угловых координат объекта на базе одномерных дескрипторов ДПФ создают набор дескрипторов, соответствующих различным угловым положениям объекта. При поиске углового положения выполняется сравнение наблюдаемого дескриптора с эталонным. В некоторых случаях для определения промежуточного положения объекта выполняется усреднение соседних дескрипторов в целях получения приблизительного значения и повышения точности. Для метода, который реализуется в настоящей работе, используется 3D-дескриптор на основе трехмерного ДПФ, преимущество которого заключается в возможности выполнять интерполяцию промежуточных значений с высокой точностью и задавать гладкую целевую функцию для алгоритмов оптимизации. Такой дескриптор не требует дополнительных вычислений на реконструкцию и построение контура, что, например, потребовалось бы в случае 3D-дескриптора на основе двухмерного ДПФ [15]. Извлечение одномерного дескриптора из 3D-дескриптора на основе трехмерного ДПФ происходит напрямую с помощью тригонометрической 2D-интерполяции. Выражение для описания 3D-дескриптора на основе трехмерного ДПФ выглядит следующим образом:

$$DF_3(k_1, k_2, k_3) = \frac{1}{N_3} \frac{1}{N_2} \sum_{k_3=0}^{N_3-1} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} DF(k_1, m_2, m_3) W_2^{k_2 m_2} W_3^{k_3 m_3}, \quad (2)$$

где $DF_3(k_1, k_2, k_3)$ — коэффициенты 3D-дескриптора; $W_2 = e^{-i2\pi/N_2}$; $W_3 = e^{-i2\pi/N_3}$; $DF(k_1, m_2, m_3)$ — трехмерная таблица коэффициентов одномерных дескрипторов на основе ДПФ, при различных положениях объекта; $k_1 = 0, 1, \dots, N_1 - 1$; $k_2, m_2 = 0, 1, \dots, N_2 - 1$; $k_3, m_3 = 0, 1, \dots, N_3 - 1$; N_1 — число узловых точек контура при выполнении ДПФ; N_2 — число точек на орбите; N_3 — число орбит. В таблице $DF(k_1, m_2, m_3)$ k_1 в соответствии с выражением (1) — это номер коэффициента нормализованного дескриптора Фурье, значения m_2, m_3 определяют вращение камеры относительно объекта (наклон орбиты и вращение по орбите).

Создание эталонного 3D-дескриптора может выполняться с помощью объекта, заданного полигональной сеткой и графической библиотекой путем формирования сцены с объектом, из которой выделяется контур. При этом камеру направляют на объект и располагают на фиксированном расстоянии. Создание эталонного 3D-дескриптора включает в себя:

- вращение камеры вокруг объекта по орбитам N_3 , наклон которых меняется с шагом $360/N_3$ (движение по орбитам выполняется с шагом

$360/N_2)$, и вычисление полярных координат контура в каждом положении с формированием трехмерной таблицы контуров;

– вычисление одномерных дескрипторов контуров и формирование таблицы одномерных дескрипторов $DF(k_1, m_2, m_3)$;

– формирование трехмерного дескриптора в соответствии с выражением (2).

Детальное описание процедуры формирования эталона приведено в [16].

Метод определения угловых координат. Предлагаемый алгоритм реализует метод, который основан на сравнении ДПФ дескриптора контура наблюдаемого объекта с дескриптором эталонного контура и поиске минимального значения разности (максимальное сходство) с помощью оптимизационных методов. Особенность метода заключается в вычислении эталонного контура путем 2D-интерполяции из 3D-дескриптора Фурье. Такой подход позволяет при решении одной системы уравнений с помощью оптимизационных методов решать сразу несколько задач: сравнение, поиск и интерполяция.

Поиск углового положения осуществляется численными методами путем решения системы уравнений на основе вектор-функции векторного аргумента, определяющей разность ДПФ коэффициентов дескриптора наблюдаемого объекта и коэффициентов дескриптора эталонного контура:

$$f_{k_1}(m_1, m_2, m_3) = DF_z(k_1, m_1) - DF_3(k_1, m_2, m_3) = 0, \quad (3)$$

где k_1 — коэффициент одномерного дескриптора на основе ДПФ; m_1, m_2, m_3 — действительные числа, определяющие угловое положение камеры относительно вертолета; DF_z — коэффициенты дескриптора наблюдаемого контура; DF_3 — коэффициенты дескриптора эталонного контура, получаемые в результате 2D-интерполяции из дескриптора на основе трехмерного ДПФ. На практике выражение (3) не имеет точного решения, поскольку равенство нулю разности коэффициентов дескриптора Фурье в общем случае не выполняется. Решение по всей совокупности коэффициентов может быть получено путем минимизации функционала наименьших квадратов. Таким образом, если система задана в виде $f_{k_1}(\mathbf{x}) = 0$, где $\mathbf{x} = m_1, m_2, m_3$ — вектор, определяющий угловое положение камеры, то целевая функция по методу наименьших квадратов примет вид

$$f_{obj}(\mathbf{x}) = f_{k_{1\min}}^2(\mathbf{x}) + \dots + f_{k_{1\max}}^2(\mathbf{x}),$$

а задача минимизации запишется как

$$f_{obj}(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{X}} (f_{obj}(\mathbf{x})),$$

где \mathbf{x}^* — решение задачи минимизации; \mathbb{X} — множество положений камеры относительно объекта.

При реализации алгоритма задача минимизации решается с помощью модифицированного алгоритма Левенберга — Марквардта. Подробное описание метода определения пространственной ориентации приведено в [17].

Алгоритм определения угловых координат объекта. Вычислительная сложность поиска глобального минимума с помощью приведенного метода определяется как $O(K_1 K_2 K_3 N_i N_s)$, где K_1 — число гармоник одномерного дескриптора; K_2 — число гармоник для интерполяции из двухмерного ДПФ; K_3 — число гармоник для интерполяции из трехмерного ДПФ; N_i — число итераций на один поиск минимума варьируется от 3 до 7; N_s — число стартовых точек, которое должно обеспечивать надежное обнаружение глобальных минимумов (при моделировании опытным путем определено значение 216). Таким образом, на поиск решения при $K_1 = 9$, $K_2 = 87$, $K_3 = 87$ необходимо затратить порядка 10^8 элементарных операций (не тактов), практически это занимает $\sim 8,5$ мс при выполнении на аппаратной платформе Intel Core i7-6700 CPU 3.4 ГГц, ОЗУ 16 ГБ, ОС Windows 10 на четырех ядрах с применением расширенной системы команд AVX2. Несмотря на достаточно хороший результат, можно повысить быстродействие за счет свойств ДПФ. В частности, при оптимизации на начальном этапе можно сократить число гармоник, при этом снижаются точность и вероятность правильного обнаружения глобального минимума. Однако допускается ввести дополнительные этапы, на которых существенно уменьшается время решения без потери точности по сравнению с прямым решением, поэтапно сокращается число стартовых точек и увеличивается число гармоник для вычисления целевой функции. В целом при таком подходе можно получить значительное ускорение — до 0,35 мс. При этом можно повысить быстродействие, если снизить требования к точности и вероятности правильного обнаружения глобального минимума. В результате моделирования выявлено, что диапазон значений числа гармоник K_1 , K_2 , K_3 для такого объекта, как вертолет, в зависимости от требуемой точности и быстродействия составляет от 6, 41, 41 до 9, 87, 87 соответственно, в режиме слежения можно получить быстродействие $\sim 0,1$ мс.

Рассмотрим работу алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 2. Алгоритм условно можно разбить на три этапа.

Этап 1. Приблизительный поиск (первая итерация).

Этап 2. Итерационное повышение точности (промежуточные итерации).

Этап 3. Поиск точного решения (конечная итерация).

В блоке А1 алгоритма выделяется контур объекта. Качественное выделение контура на реальных изображениях — достаточно сложная задача, требующая значительные вычислительные ресурсы. В простейшем случае это может быть бинаризация изображения и выделение контура с помощью *two border following* алгоритмов, которые, в частности, реализованы в библиотеке OpenCV [18]. Большинство алгоритмов являются последовательными, что может сказаться на быстродействии. В случае необходимости время выполнения данной операции может быть существенно уменьшено. В [19] предложен параллельный *border tracking* алгоритм. Еще одним вариантом является сегментация объекта на изображении с помощью нейросетевых алгоритмов. После выделения контура выполняется вычисление дескриптора ДПФ наблюдаемого контура.

В блоке А2 для оптимизационного алгоритма задаются конфигурационные параметры, которые записываются в переменную $C(i)$, где i — номер итерации. В каждой итерации для вычисления целевой функции задается число гармоник (K_1, K_2, K_3), на одну оптимизацию задается максимальное число итераций. Для нулевой итерации вычисляются начальные точки поиска, которые помещаются в список.

В блоке А4 проверяется, является ли итерация ненулевой. Если итерация нулевая, то выполняется переход к блоку А8, где изменяется конфигурация поиска в соответствии с $C(0)$. Примерная конфигурация может быть следующей: число начальных точек 216; число гармоник $K_1 = 4$, $K_2 = 15$, $K_3 = 15$; на один поток оптимизации задается 6–7 итераций (максимальное число).

Для каждой стартовой точки списка начальных значений в блоках А9 определяются минимумы целевой функции с помощью численного метода. Поскольку это наиболее затратная часть алгоритма, целесообразно распараллелить процесс вычисления с помощью множества потоков выполнения, если процессор имеет несколько ядер. На некоторых процессорах вычисление целевой функции можно дополнительно ускорить в несколько раз с помощью расширенных систем команд SSE (Streaming SIMD Extension) и AVX (Advanced Vector Extensions.). После завершения поиска во всех потоках формируется список найденных минимумов.

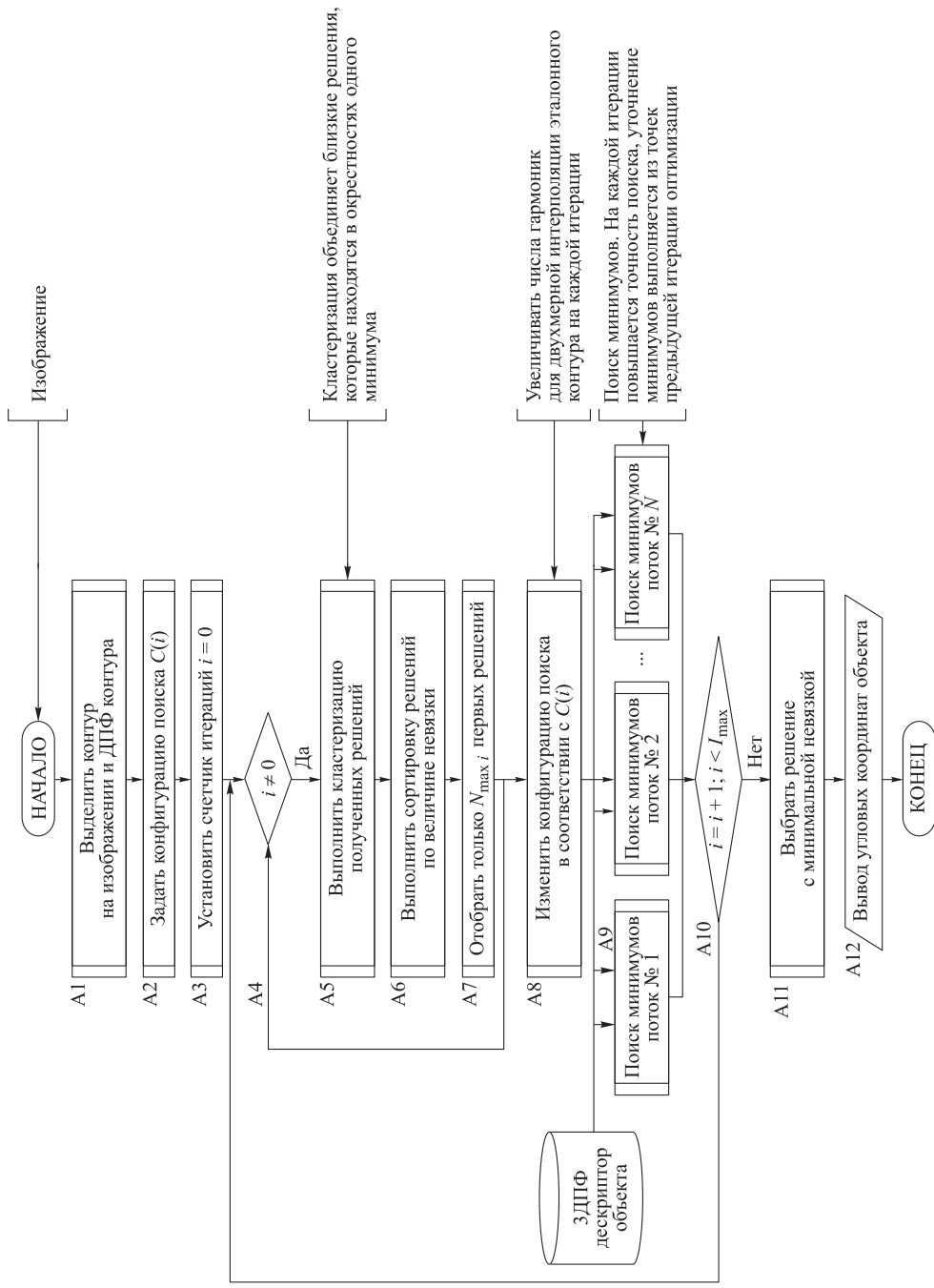


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения пространственной ориентации объекта

На следующем этапе в блоке А4 осуществляется переход к блоку А5, в котором выполняется кластеризация полученных решений. Необходимость данного блока обусловлена тем, что при выполнении блока А9 оптимизационные потоки из начальных точек продвигаются в сторону локальных и глобального минимумов, при этом оптимизационные потоки из разных начальных точек могут завершаться в окрестностях одного и того же минимума. В связи с этим нет смысла рассматривать в дальнейшем все решения в окрестностях одного минимума. По результатам кластеризации для каждого обнаруженного минимума отбирается центр кластеризации — решение с минимальной невязкой. Такой подход позволяет сократить объем вычислений на последующих итерациях.

После кластеризации в блоке А6 сортируется список обнаруженных минимумов, которые получены в блоке А5, по величине невязки, при этом решения с меньшей невязкой помещаются в начало списка. Затем в блоке А7 из списка решений убираются элементы с порядковыми номерами больше $N_{\max i}$, что еще более сокращает последующий объем вычислений.

Перед запуском потоков оптимизации в блоке А8 устанавливается конфигурация оптимизации $C(i)$, при увеличении номера итерации каждый раз возрастает число гармоник K_1, K_2, K_3 для вычисления целевой функции, также задается максимальное число итераций на один поток оптимизации. В качестве начальных точек поиска для алгоритма оптимизации устанавливается список, получаемый на этапе А7, после чего происходит переход к блоку А9, где запускаются потоки оптимизации с новой конфигурацией. После завершения поиска в А9 формируется обновленный список решений и процесс повторяется. На каждой итерации в силу увеличения числа гармоник для расчета целевой функции происходит повышение точности решения и сокращение числа элементов списка. На финальном этапе для такого объекта, как вертолет, отбирается порядка трех минимумов. Отметим, что число минимумов зависит от геометрических свойств объекта, например, если в качестве объекта взять куб, то число решений с примерно равными значениями невязки составит 24.

После завершения цикла происходит переход к блоку А11, где из полученного финального списка решений выбирается значение с минимальной невязкой, затем полученные угловые координаты выводятся в блоке А12 и работа алгоритма завершается.

Результаты. *Формирование эталона.* Для формирования базы эталонов реализовано программное обеспечение создания эталона из 3D-модели объекта. При формировании 3D-дескриптора высокие гармоники отсекали

и итоговый размер 3D-дескриптора составил $9 \times 87 \times 87$ комплексных элементов в формате действительных четырехбайтовых чисел, что соответствует размеру 0,59 МБ. В зависимости от требуемой точности размер эталона может быть уменьшен до $6 \times 41 \times 41$, что соответствует эталону размером 77 КБ, при этом растет и быстродействие.

Реализация алгоритма и моделирование. Моделирование выполнялось на аппаратной платформе Intel Core i7-6700 CPU 3.4 ГГц, ОЗУ 16 ГБ, ОС Windows 10. Для генерации эталонного изображения на этапе подготовки данных использовалась 3D-модель вертолета в формате OBJ. В процессе моделирования выполнялся сценарий посадки вертолета, данные пространственного положения взяты из записей бортовых навигационных систем реального вертолета и приняты как эталонные. При моделировании камера располагалась на расстоянии 115 м от места посадки вертолета, что соответствует эталонному расстоянию. Генерация изображения осуществлялась с помощью библиотеки стандарта OpenGL.

Программное обеспечение, реализующее алгоритм, написано на языке C++. В целях ускорения работы алгоритма оптимизации вычисления целевой функции было реализовано в восьми потоках на четырех ядрах по технологии *hyper-threading*, для дополнительного ускорения использовался расширенный набор команд процессора AVX2.

Результаты моделирования приведены на рис. 3 и более детально в [20]. Время выполнения алгоритма при обработке одного кадра составило 0,25...0,35 мс для блоков A9 (суммарно все итерации) в зависимости от конфигурации. Время выполнения блока A1, реализованного с помощью функций OpenCV, составило 0,5...1,0 мс. Время выполнения остальных блоков не учитывалось, поскольку оно при оптимальной реализации существенно меньше времени выполнения блоков A1 и A9. В режиме слежения первая и промежуточные итерации пропускались, а в качестве начальной точки поиска на последней итерации использовалось решение из предыдущего кадра, при этом быстродействие алгоритма составило менее 0,1 мс. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Погрешности определения углов пространственной ориентации вызваны погрешностями интерполяции, пространственной дискретизацией изображения, которая проявляется на больших расстояниях до объекта. На расстояниях, отличных от эталонного, происходит небольшое искажение контура по сравнению с эталонным, что также приводит к погрешностям. По результатам статистической обработки данных моделирования получены следующие СКО углов курса $0,23^\circ$, тангажа $0,18^\circ$ и крена $0,29^\circ$.

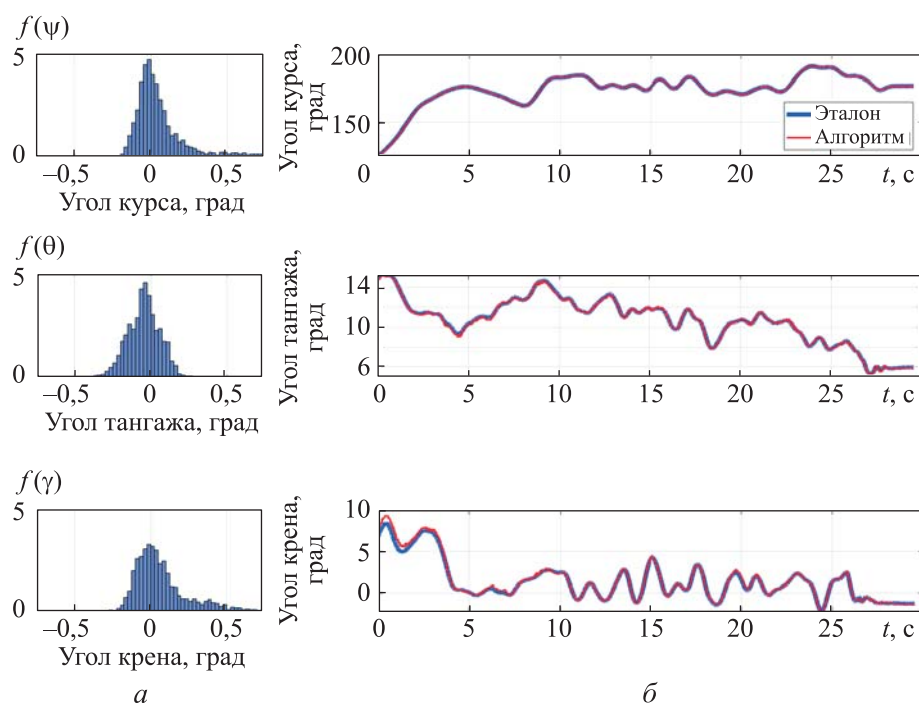


Рис. 3. Результаты работы алгоритма при моделировании:

a — гистограммы плотности вероятности; *б* — углы курса, тангажа и крена в зависимости от времени

Исходя из графиков функций плотности вероятности отметим, что законы распределения вероятностей не являются нормальными. Поэтому для оценки абсолютной доверительной погрешности углов курса, тангажа и крена можно применить неравенство Высочанского — Петунина, которое справедливо для одномодальных несимметричных распределений. Итоговые абсолютные погрешности для доверительной вероятности 95,06 % по углам курса, тангажа и крена составляют $\pm 0,69^\circ$, $\pm 0,54^\circ$ и $\pm 0,9^\circ$ соответственно.

Обсуждение полученных результатов. Сравнение разработанного алгоритма с другими ранее опубликованными алгоритмами приведено на рис. 4. Предложенный алгоритм как отдельно по параметрам, так и интегрально с учетом точности и быстродействия превосходит все опубликованные ранее. Хотя несколько алгоритмов имеют сопоставимую точность [5, 6, 21, 22], их быстродействие ниже на несколько порядков. В то же время более быстрые алгоритмы имеют точность ниже на порядок. Это связано с тем, что быстрые и менее точные методы используют набор эталонных контуров без интерполяции промежуточных значений либо с грубой интерполяцией. Более точные алгоритмы используют 2D-2D-3D-сопостав-

ление посредством различных вариаций метода *distance map* или же используют непосредственное 2D-3D-сопоставление (*hybrid local feature*) контура и 3D-модели. Данные методы имеют малые погрешности, поскольку с помощью графических библиотек положение 3D-модели может задаваться с высокой точностью. Однако недостатком такого метода является необходимость вращать сложную 3D-модель (которая может содержать десятки и сотни тысяч, а то и миллионы вершин) на каждом шаге поиска посредством графической библиотеки, при этом сами методы требуют от 20 до 100 итераций. Все это приводит к тому, что основное время тратится на теневую отрисовку 3D-эталона. Это требует больших вычислительных затрат, при этом само сравнение эталонного и наблюдаемого контуров может занимать микросекунды.

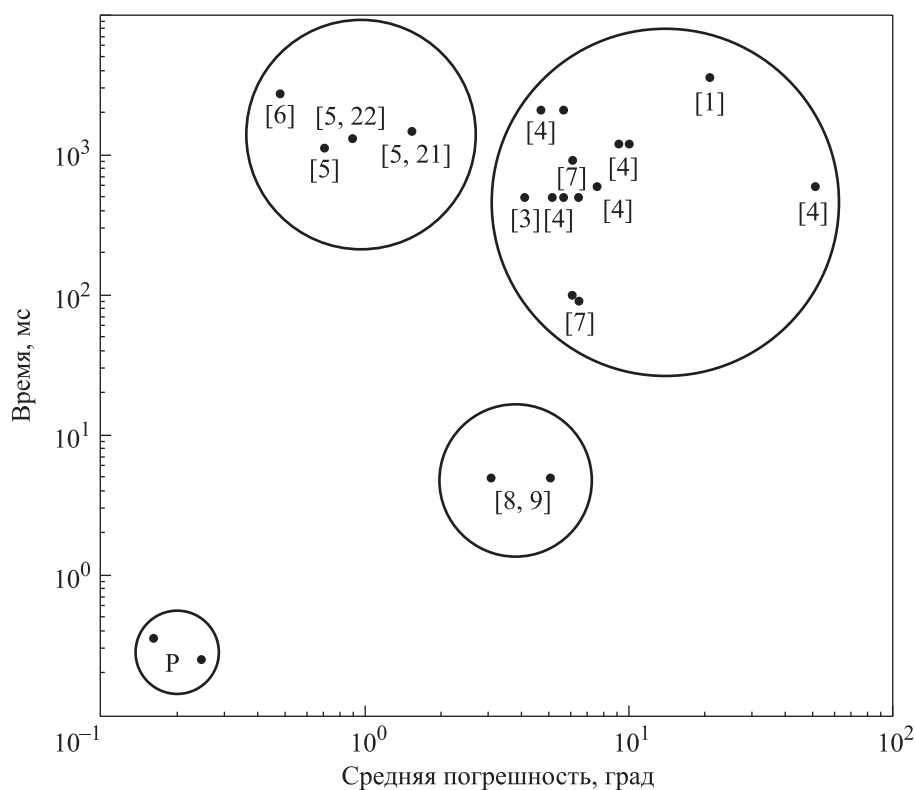


Рис. 4. Сравнение точности и быстродействия разработанного алгоритма с ранее опубликованными; номера в квадратных скобках — соответствующая публикация; P — предложенный алгоритм

В предложенном алгоритме основное время также тратится на вычисление эталонного контура, которое по конечному результату можно считать неким эквивалентом вращения и проецирования полигональной

3D-модели. Однако, в отличие от прямого вычисления координат всех точек с помощью графической библиотеки, время вычисления одного эталонного контура составляет $\sim 0,05 \dots 50$ мкс (в зависимости от требуемой точности), причем применение графического процессора может дополнительно сократить это время в несколько раз. Полученное высокое быстродействие алгоритма позволяет увеличить число стартовых точек для поиска и диапазон углов. Например, в [22] для поиска используется порядка 90 возможных начальных позиций в диапазоне углов $\psi \times \vartheta \times \gamma = [-45^\circ, 45^\circ] \times [-45^\circ, 45^\circ] \times [-45^\circ, 45^\circ]$, при этом быстродействие составляет 1,67 с, против 0,25 мс с 216 стартовыми точками в диапазоне углов $\alpha \times \beta \times \gamma = [0, 360^\circ] \times [0, 360^\circ] \times [-90^\circ, 90^\circ]$, где α — вращение камеры относительно оптической оси камеры; углы $\beta \times \gamma$ задают вращение камеры относительно объекта по орбитам. Такой диапазон и число начальных точек позволяют определять ориентацию объекта без ограничений по углам ориентации и различать очень сходные силуэты, но с разными положениями объекта. Как правило, на глаз их отличить практически невозможно.

Заключение. Приведено описание быстродействующего и высокоточного алгоритма определения трех угловых координат бестекстурного объекта по его контуру на монокулярном изображении. Алгоритм основан на решении задачи минимизации разности дескриптора ДПФ наблюдаемого контура и дескриптора ДПФ эталонного контура, который получается путем 2D-интерполяции на основе эталонного 3D-дескриптора Фурье. Для достижения высокого быстродействия и высоких показателей точности в алгоритме реализован принцип итерационного повышения числа используемых гармоник при интерполяции эталонного контура. Моделирование на синтезированных изображениях показало высокое быстродействие алгоритма: $\sim 0,25 \dots 0,35$ мс в режиме идентификации объекта и менее 0,1 мс в режиме слежения. Проведена оценка абсолютных погрешностей определения угловых координат с помощью реализованного алгоритма, которые для углов курса, тангажа и крена с доверительной вероятностью 95,06 % составили $\pm 0,7$, $\pm 0,5$ и $\pm 0,9^\circ$ соответственно. Выполнено сравнение известных алгоритмов с приведенным алгоритмом. По результатам сравнения можно сделать заключение, что разработанный алгоритм существенно превосходит по точности и быстродействию аналогичные, ранее опубликованные алгоритмы.

Предложенный алгоритм может быть применен в условиях медленно меняющегося фона, например, для систем посадки воздушных судов и бес-

пилотных воздушных судов, для контроля пространственного положения относительно наблюдаемого объекта, например, при стыковке космических аппаратов на орбите. В сложных фоновых условиях алгоритм может использоваться совместно с нейросетевыми алгоритмами для идентификации и определения пространственного положения угрожающих объектов, например, при рулении по аэродрому.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wallace T.P., Wintz P.A. An efficient three-dimensional aircraft recognition algorithm using normalized Fourier descriptors. *Comput. Graph. Image Process.*, 1980, vol. 13, no. 2, pp. 99–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(80\)80035-9](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(80)80035-9)
- [2] Breuers M., de Reus N. Image-based aircraft pose estimation: a comparison of simulations and real-world data. *Proc SPIE.*, 2001, vol. 4379, pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.445395>
- [3] Малышев О.В. Определение пространственного положения и распознавание типов летательных аппаратов на основе контурного анализа. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, РГАТУ, 2011.
- [4] Alpatov B., Babayan P. Contour-based object orientation estimation. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9897, art. 98970H. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2224249>
- [5] Zhang X., Jiang Z., Zhang H., et al. Vision-based pose estimation for textureless space objects by contour points matching. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 2342–2355. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2815879>
- [6] Fu T., Sun X. The relative pose estimation of aircraft based on contour model. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10250, art. 102502T. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2267118>
- [7] Alpatov B., Babayan P., Ershov M., et al. The implementation of contour-based object orientation estimation algorithm in FPGA-based on-board vision system. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10007, art. 100070A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2241091>
- [8] Мирзоян А.С. Разработка систем распознавания и позиционирования летательных аппаратов и наземных объектов на основе методов вычислительной геометрии. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, РГАТУ, 2017.
- [9] Мирзоян А.С., Малышев О.В., Хмаров И.М. и др. Распознавание летательных аппаратов оптической системой в реальном масштабе времени. *Вестник МАИ*, 2014, т. 21, № 5, с. 145–156. EDN: TGWHHX
- [10] Fu D., Li W., Han S., et al. The pose estimation of the aircraft on the airport surface based on the contour features. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 817–826. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3192220>
- [11] On S., Kim S., Yang K., et al. Monocular 3D pose estimation of very small airplane in the air. *MMAsia'23*, 2023, art. 82. DOI: <https://doi.org/10.1145/3595916.3626456>
- [12] Li B., Raja S., Li J., et al. A Fourier descriptor and PSCS-RBF fusion method for pumping machine fault diagnosis. Durham, Research Square, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2878163/v1>

- [13] Andrews M., Kakarala R. Shape simplification through polygonal approximation in the Fourier domain. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9406, art. 94060D.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2078148>
- [14] Liao N., Guo B., Li Z., et al. An advanced Fourier descriptor based on centroid contour distances. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1735, art. 012002.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1735/1/012002>
- [15] Park K.S., Lee N.S. A three-dimensional Fourier descriptor for human body representation/reconstruction from serial cross sections. *Comput. Biomed. Res.*, 1987, vol. 20, no. 2, pp. 125–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4809\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0010-4809(87)90040-1)
- [16] Artemyev A. Formation of a 3D descriptor for reconstruction of an object contour for contour analysis algorithms. Durham, Research Square, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30881.79208>
- [17] Artemyev A. Estimating 6D position of a three-dimensional object from 2D contour on image in real time. Durham, Research Square, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29204.07048>
- [18] Open Source Computer Vision Library: *opencv.org: веб-сайт*.
URL: <https://opencv.org> (дата обращения: 16.01.2024).
- [19] Garcia-Molla V., Alonso P. Parallel border tracking in binary images for multicore computers. *J. Supercomput.*, 2023, vol. 79, no. 7, pp. 9915–9931.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05052-2>
- [20] Artemyev A. High-speed and high-precision algorithm for determining the spatial position of a helicopter based on its image for automatic landing systems. *TsAGI Int. Aeronautics Congress*, 2023.
- [21] Leng D., Sun W. Contour-based iterative pose estimation of 3D rigid object. *IET Comput. Vis.*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 291–300.
DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2010.0098>
- [22] Zhang X., Zhang H., Wei Q., et al. Pose estimation of space objects based on hybrid feature matching of contour points. *IGTA*. Springer, 2016, pp. 184–191.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2260-9_21

Артемьев Анатолий Евгеньевич — начальник лаборатории подразделения 2300 ГосНИИАС (Российская Федерация, 125319, Москва, ул. Викторенко, д. 7); аспирант кафедры «Электронная инженерия» УУНиТ (Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Артемьев А.Е. Быстродействующий и высокоточный алгоритм определения угловых координат трехмерного бестекстурного объекта на основе контурного анализа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 3 (148), с. 115–135. EDN: XLRKVJ

HIGH-SPEED AND HIGH-PRECISION ALGORITHM TO DETERMINE ANGULAR COORDINATES OF A THREE-DIMENSIONAL TEXTURELESS OBJECT BASED ON THE CONTOUR ANALYSIS

A.E. Artemyev

arsoft@mail.ru

State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russian Federation
UUST, Ufa, Russian Federation

Abstract

The paper presents a high-speed algorithm to determine three angular coordinates of a textureless 3D object based on contour analysis of the monocular images. The algorithm could be applied to identify the aircraft, spacecraft, and other objects angular position. Angular coordinates' computation is based on comparing the observed contour descriptor with the reference contour descriptor. At the stage of preparing the object reference descriptor, its 3D surface is defined by a polygonal mesh and is transformed into a three-dimensional descriptor based on the three-dimensional discrete Fourier transform. Angular coordinates are determined by solving the problem of minimizing difference between the Fourier descriptor of the observed contour and the reference contour descriptor obtained by two-dimensional interpolation from the reference three-dimensional descriptor. To achieve high performance and high accuracy, the algorithm implements the principle of iteratively increasing accuracy in the reference descriptor interpolation. In order to raise the algorithm speed, optimization minima search process is parallelized. The paper gives description of the algorithm and demonstrates results of simulating the implemented algorithm operation with synthesized images of an aircraft at the landing stage. According to the simulation results, the algorithm speed without using a graphics processor was 0.25 ms per one object in the detection mode and less than 0.1 ms in the tracking mode. The standard error deviation in determining the angular coordinates was about 0.23–0.3°

Keywords

Contour analysis, angular coordinates, orientation, navigation, aircraft, spacecraft, textureless object, computer vision

Received 20.12.2023

Accepted 03.05.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Wallace T.P., Wintz P.A. An efficient three-dimensional aircraft recognition algorithm using normalized Fourier descriptors. *Comput. Graph. Image Process.*, 1980, vol. 13, no. 2, pp. 99–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(80\)80035-9](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(80)80035-9)
- [2] Breuers M., de Reus N. Image-based aircraft pose estimation: a comparison of simulations and real-world data. *Proc SPIE.*, 2001, vol. 4379, pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.445395>
- [3] Malyshev O.V. Opredelenie prostranstvennogo polozheniya i raspoznavanie tipov letatelnykh apparatov na osnove konturnogo analiza. Dis. kand. tekhn. nauk [Determination of spatial position and recognition of aircraft types based on contour analysis. Cand. Sc. (Eng.). Diss.] Rybinsk, RGATU, 2011 (in Russ.).
- [4] Alpatov B., Babayan P. Contour-based object orientation estimation. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9897, art. 98970H. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2224249>
- [5] Zhang X., Jiang Z., Zhang H., et al. Vision-based pose estimation for textureless space objects by contour points matching. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 2342–2355. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2815879>
- [6] Fu T., Sun X. The relative pose estimation of aircraft based on contour model. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10250, art. 102502T. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2267118>
- [7] Alpatov B., Babayan P., Ershov M., et al. The implementation of contour-based object orientation estimation algorithm in FPGA-based on-board vision system. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10007, art. 100070A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2241091>
- [8] Mirzoyan A.S. Razrabotka sistem raspoznavaniya i pozitsionirovaniya letatelnykh apparatov i nazemnykh obektov na osnove metodov vychislitelnoy geometrii. Dis. kand. tekhn. nauk [Development of recognition and positioning systems for aircraft and ground objects based on computational geometry methods. Cand. Sc. (Eng.). Diss.] Rybinsk, RGATU, 2017 (in Russ.).
- [9] Mirzoyan A.S., Malyshev O.V., Khmarov I.M., et al. Recognition of aircrafts by optical system in real time. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 145–156 (in Russ.). EDN: TGWHHX
- [10] Fu D., Li W., Han S., et al. The pose estimation of the aircraft on the airport surface based on the contour features. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 817–826. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3192220>
- [11] On S., Kim S., Yang K., et al. Monocular 3D pose estimation of very small airplane in the air. *MMAsia' 23*, 2023, art. 82. DOI: <https://doi.org/10.1145/3595916.3626456>
- [12] Li B., Raja S., Li J., et al. A Fourier descriptor and PSCS-RBF fusion method for pumping machine fault diagnosis. Durham, Research Square, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2878163/v1>
- [13] Andrews M., Kakarala R. Shape simplification through polygonal approximation in the Fourier domain. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9406, art. 94060D. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2078148>

- [14] Liao N., Guo B., Li Z., et al. An advanced Fourier descriptor based on centroid contour distances. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1735, art. 012002.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1735/1/012002>
- [15] Park K.S., Lee N.S. A three-dimensional Fourier descriptor for human body representation/reconstruction from serial cross sections. *Comput. Biomed. Res.*, 1987, vol. 20, no. 2, pp. 125–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4809\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0010-4809(87)90040-1)
- [16] Artemyev A. Formation of a 3D descriptor for reconstruction of an object contour for contour analysis algorithms. Durham, Research Square, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30881.79208>
- [17] Artemyev A. Estimating 6D position of a three-dimensional object from 2D contour on image in real time. Durham, Research Square, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29204.07048>
- [18] Open Source Computer Vision Library: *opencv.org: website*.
Available at: <https://opencv.org> (accessed: 16.01.2024).
- [19] Garcia-Molla V., Alonso P. Parallel border tracking in binary images for multicore computers. *J. Supercomput.*, 2023, vol. 79, no. 7, pp. 9915–9931.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05052-2>
- [20] Artemyev A. High-speed and high-precision algorithm for determining the spatial position of a helicopter based on its image for automatic landing systems. *TsAGI Int. Aeronautics Congress*, 2023.
- [21] Leng D., Sun W. Contour-based iterative pose estimation of 3D rigid object. *IET Comput. Vis.*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 291–300.
DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2010.0098>
- [22] Zhang X., Zhang H., Wei Q., et al. Pose estimation of space objects based on hybrid feature matching of contour points. *IGTA*. Springer, 2016, pp. 184–191.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2260-9_21

Artemyev A.E. — Chief of Laboratory, Department 2300, State Research Institute of Aviation Systems (Viktorenko ul. 7, Moscow, 125319 Russian Federation); Post-Graduate Student, Department of Electronic Engineering, UUST (Karla Marksa ul. 12, Ufa, 450008 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Artemyev A.E. Introduction of the high-speed and high-precision algorithm to determine angular coordinates of a three-dimensional texturless object based on the contour analysis. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 115–135 (in Russ.). EDN: XLRKVJ