

УДК 621.391.266

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМИ ОТСЧЕТАМИ*

А. А. Роженцов, А. А. Баев, А. С. Наумов

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Марийский государственный технический университет»,
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: krtmbs@marstu.net*

Рассмотрен подход к обработке изображений пространственных объектов, не требующий знания нумерации отсчетов, задающих координаты точек на их поверхности. Предложенное решение базируется на получении вторичного аналитического описания объекта в виде полиномиальной функции гиперкомплексного переменного, проецирующей отсчеты поверхности объекта на сферу. Показана возможность оценки параметров масштабирования и вращения, а также распознавания пространственных объектов по коэффициентам полинома. Выполнена экспериментальная оценка эффективности предложенных алгоритмов на изображениях реальных объектов и математических моделях.

Ключевые слова: кватернионы, распознавание, контуры трехмерных изображений, функции гиперкомплексного переменного, инвариантность к нумерации.

Введение. Задачи, решаемые современными системами технического зрения, требуют перехода от анализа плоских сцен к анализу пространственных изображений. Ряд сложившихся в настоящее время подходов к их обработке основывается на воксельных моделях и связан с трудоемкими процедурами вычисления трехмерного градиента для выделения плоских фрагментов [1]. Методы, базирующиеся на сферическом гармоническом анализе, нашли применение при решении задач биометрической идентификации, астроориентации и других [2, 3]. В последнее время получили развитие методы, основанные на представлении изображений пространственных объектов и точечных полей в виде кватернионных сигналов [3, 4], предполагающие переход к формированию описания объекта в виде контура многогранника.

Контурные методы обработки обладают высокой эффективностью в условиях, когда известна нумерация векторов, образующих контур данного изображения [3–5]. В этом случае возможно формирование меры схожести плоских или пространственных изображений на основе согласованной фильтрации их контуров, а при обработке плоских изображений — и получение оценки параметров линейных преобразований. Данный подход применим как для сплошных изображений, так и для групповых точечных объектов, однако его применение в этом случае требует знания нумерации векторов контура или отметок в составе группового точечного объекта, в противном случае формирование импульсной характеристики фильтра, согласованного с контурным описанием данного объекта, невозможно.

Для контуров плоских сплошных изображений нумерация векторов обеспечивается естественным образом при прослеживании контура объекта. Однако для пространственных изображений и изображений групповых точечных объектов приходится вводить определенные правила нумерации. При этом возможно возникновение ошибок в аналитическом

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-01-00854-а, № 07-01-00058-а, № 08-01-12000-офи) и программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.2/2204).

описании в условиях воздействия координатных шумов, появления ложных отметок или пропуска сигнальных, что затрудняет использование контурной согласованной фильтрации.

Целью данной работы является создание подхода к формированию вторичных описаний пространственных изображений и изображений групповых точечных объектов, не зависящих от порядка нумерации отсчетов и обеспечивающих формирование мер схожести, инвариантных к преобразованиям вращения и масштабирования. Этот подход основывается на теории функции гиперкомплексного переменного и сводится к получению отображений поверхностей обрабатываемых объектов на простые геометрические фигуры.

Формирование аналитических описаний пространственных изображений, инвариантных к нумерации отсчетов. В настоящее время для сканирования трехмерных изображений применяют лазерные сканеры, ручные и автоматические дигитайзеры, системы обработки по стереопарным снимкам, системы, использующие структурированное освещение, и другие [6]. При формировании трехмерных изображений групповых точечных объектов датчиками могут выступать различные локационные системы. Первичным результатом работы таких систем, как правило, является «облако» точек, описывающих сканируемый объект, для которых заданы координаты в декартовой или полярной системе координат, информация о цвете, яркости и т. д. При этом в зависимости от ориентации объекта и расстояния до него, выбора правила обхода его поверхности и т. п. может изменяться порядок следования точек в полученном описании. Во многих случаях может изменяться и количество получаемых точек, и их положение на поверхности объекта. Результаты сканирования разных ракурсов пространственного объекта с использованием трехмерного дигитайзера Microscribe G2 приведены на рис. 1.

В подобных условиях необходимы подходы к обработке изображений, инвариантные к количеству и нумерации отметок в составе объекта, к параметрам масштабирования и вращения. Среди известных методов обработки аналогичными свойствами обладают корреляционные методы, но для трехмерных изображений в условиях априорной неопределенности относительно параметров масштабирования и вращения они обладают высокой трудоемкостью [7–9].

Методы, основанные на построении пространственных контуров, требуют проведения предварительной нумерации отметок или представления пространственной фигуры в виде набора многогранников, в которых имеется возможность однозначного задания порядка следования их вершин [10]. При появлении ложных отметок или пропуске сигнальных эти процедуры также могут приводить к неоднозначности формируемого аналитического описания и возникновению ошибок на последующих этапах обработки. Предлагаемый в

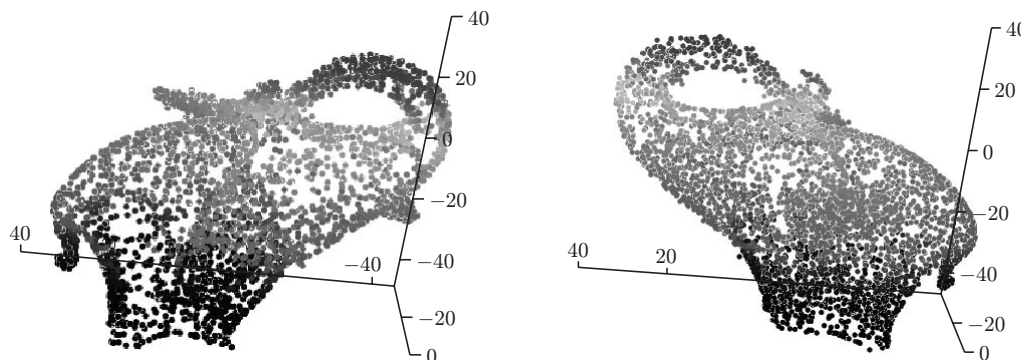


Рис. 1. Результаты сканирования тестовых объектов ручным трехмерным дигитайзером

данной работе подход базируется на формировании «интегрального» описания изображения трехмерного объекта в виде функции, которая отражает свойства формы объекта «в целом».

Аналитические модели пространственных изображений основываются на представлении их отсчетов, заданных в трехмерном пространстве, векторными кватернионами [4], компоненты которых при мнимых единицах i, j, k соответствуют координатам x, y, z точки на поверхности объекта (рис. 2, *a*).

Тогда первичное аналитическое описание пространственного объекта представляет собой кватернионный сигнал, имеющий следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \{q(n)\}_{0, N-1} = iq_1(n) + jq_2(n) + kq_3(n) = ix(n) + jy(n) + kz(n), \quad n = 0, 1, \dots, N - 1,$$

где N — количество отсчетов, задающих объект. В общем случае минимальное количество требуемых для описания объекта отсчетов и частота их следования определяются исходя из спектральных характеристик объекта. Плотность отсчетов должна возрастать для фрагментов сцены с резкими переходами. На практике величина N определяется условиями сканирования, требованиями к точности представления объекта и может изменяться в широких пределах. Порядок следования отсчетов в сигнале \mathbf{Q} и их положение на поверхности объекта, как правило, не совпадают с порядком следования и положением отсчетов в эталоне, поскольку это зависит от способа обзора пространства сканирующей системой, ориентации и масштаба наблюдаемого объекта. В то же время поверхность объекта может рассматриваться как функция кватернионного переменного, для которой порядок следования отсчетов не важен. Поэтому получение вторичного описания, инвариантного к порядку следования отсчетов трехмерного объекта, основано на вычислении параметров некоторой функции, вид которой связан с формой этого объекта.

Кроме функций, задающих поверхность объекта, могут формироваться функции, однозначно связанные с преобразованием точек поверхности, например с проецированием их на единичную сферу. Удобство такого проецирования обусловлено тем, что при вращении объекта в пространстве будет происходить одновременный поворот векторов, проведенных из центра сферы к точкам, на которые выполняется проецирование, что, как будет показано далее, обеспечивает возможность определения параметров вращений. В качестве

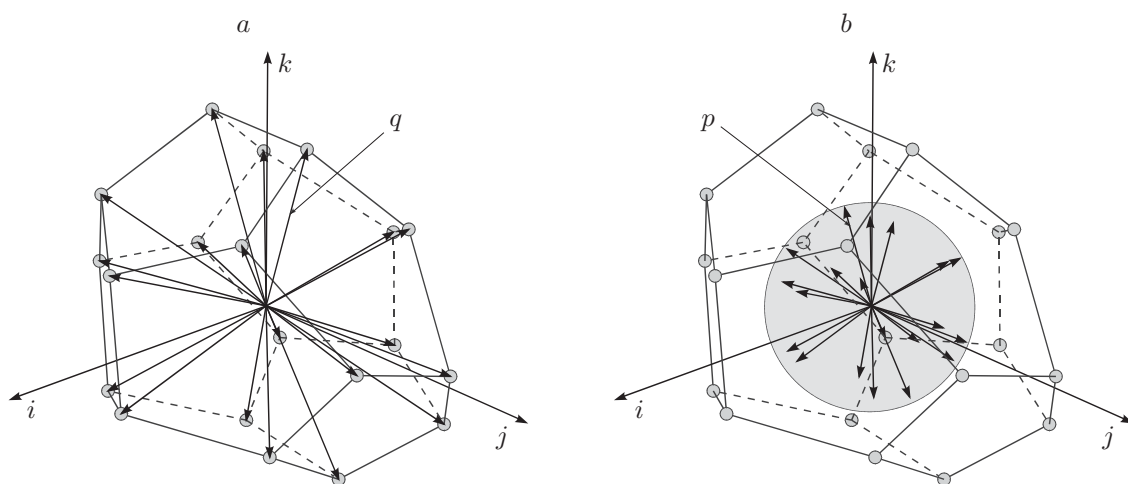


Рис. 2. Представление пространственного объекта набором векторных кватернионов: *a* — пространственный контур, описываемый кватернионным сигналом \mathbf{Q} ; *b* — пространственный контур и проекция на сферу \mathbf{P}

проецирующих функций были выбраны полиномиальные отображающие функции гиперкомплексного переменного вида

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m = p_n, \quad (1)$$

где $M - 1$ — степень полинома; a_m — коэффициенты полинома (также являющиеся кватернионами), задающие отображение пространственной фигуры на сферу; p_n — кватернионы, соединяющие точки поверхности объекта с началом координат; q_n — кватернионы с единичными модулями, проведенные к поверхности сферы из начала координат в направлении точек поверхности объекта (рис. 2, *b*). Если положение центра сферы относительно объекта не может быть зафиксировано заранее, то центр сферы совмещается с какой-либо характерной точкой объекта, например с его центром тяжести или с началом координат.

Коэффициенты полинома a_m могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов. В этом случае погрешность аппроксимации значения функции в каждой точке вычисляется по формуле

$$\varepsilon_n = \overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right), \quad n = 0, 1, \dots, N - 1.$$

Общая погрешность аппроксимации определяется из соотношения

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon_n = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right). \quad (2)$$

Можно показать, что после нахождения частных производных по коэффициентам a их вычисление сводится к решению системы линейных уравнений

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} \overline{q_n^r} q_n^m \right) a_m = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{q_n^r} p_n, \quad r = 0, 1, \dots, M - 1.$$

В матричном виде система линейных кватернионных уравнений запишется в виде

$$\mathbf{q}\mathbf{a} = \mathbf{p},$$

где

$$\mathbf{q}_{r,m} = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{q_n^r} q_n^m, \quad \mathbf{p}_r = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{q_n^r} p_n, \quad r = 0, 1, \dots, M - 1,$$

причем

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 + i\mathbf{q}_1 + j\mathbf{q}_2 + k\mathbf{q}_3,$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + i\mathbf{a}_1 + j\mathbf{a}_2 + k\mathbf{a}_3,$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 + i\mathbf{p}_1 + j\mathbf{p}_2 + k\mathbf{p}_3.$$

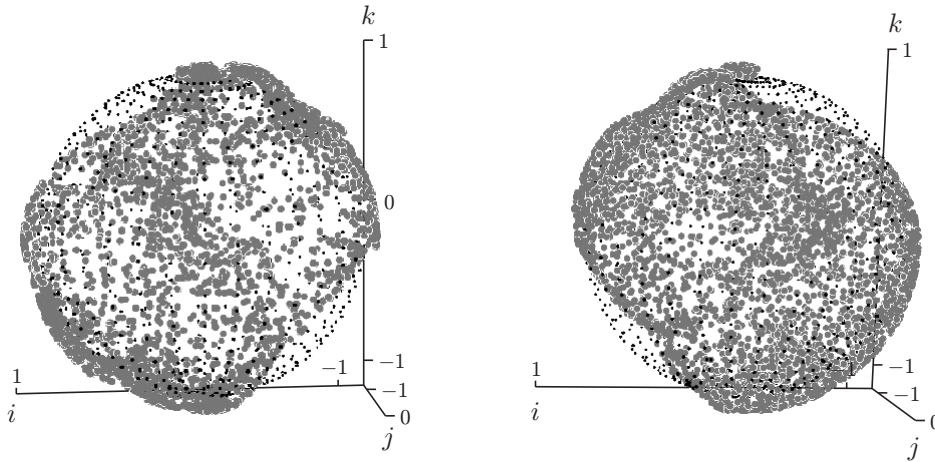


Рис. 3. Результаты проецирования изображений пространственных объектов на сферу ($M = 5$)

Система решается непосредственно методом Гаусса или сводится к решению системы уравнений с действительными коэффициентами. С учетом правил перемножения кватернионов такая система линейных уравнений может быть представлена в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_0 & -\mathbf{q}_1 & -\mathbf{q}_2 & -\mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_1 & \mathbf{q}_0 & -\mathbf{q}_3 & \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_2 & \mathbf{q}_3 & \mathbf{q}_0 & -\mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_3 & -\mathbf{q}_2 & \mathbf{q}_1 & \mathbf{q}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{a}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix}.$$

В результате решения системы уравнений будут определены значения коэффициентов a_m , $m = 0, 1, \dots, M - 1$, полиномиальной функции, выполняющей отображение пространственной фигуры на сферу. Пример отображения отсчетов объекта (см. рис. 1) на сферу приведен на рис. 3.

Обработка изображений пространственных объектов с неизвестным масштабом. При обработке изображений пространственных объектов параметры преобразований масштабирования и вращения могут быть неизвестны. В этом случае возникают задачи обеспечения работоспособности алгоритмов обработки и возможности оценки этих параметров. Рассмотрим влияние масштабирования на вид коэффициентов отображающей функции.

При изменении масштаба изображения каждый отсчет q_n умножается на некоторый масштабный множитель μ :

$$q_n^{(\mu)} = \mu q_n. \tag{3}$$

В этом случае выражение (1) примет следующий вид:

$$\sum_{m=0}^{M-1} (\mu q_n)^m a_m^{(\mu)} = p_n.$$

Так как коэффициент μ является действительным числом, умножение кватернионов на этот коэффициент будет коммутативным и левая часть данного выражения может быть

преобразована к виду

$$\sum_{m=0}^{M-1} (\mu q_n)^m a_m = \sum_{m=0}^{M-1} q_n^m \mu^m a_m^{(\mu)}.$$

Поскольку

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m \mu^m a_m^{(\mu)} = \sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m,$$

то

$$\mu^m a_m^{(\mu)} = a_m, \quad a_m^{(\mu)} = a_m / \mu^m.$$

Оценка масштаба может быть получена из выражения

$$\mu = \sqrt[m]{a_m / a_m^{(\mu)}}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициенты отображающей функции однозначно связаны с масштабом пространственного объекта, и его оценка может быть получена на основе их анализа.

Обработка изображений пространственных объектов с неизвестными параметрами вращений. При вращении объекта каждый его вектор поворачивается на некоторый угол вокруг общей для всех векторов оси вращения. Аналитически вращения векторов с использованием алгебры кватернионов описываются в виде [11]

$$q_n^{(b)} = b q_n b^{-1}, \quad (5)$$

где b — вращающий кватернион. При возведении повернутого кватерниона в некоторую степень m получим следующий результат:

$$(b q_n b^{-1})^m = \underbrace{b q_n b^{-1} b q_n b^{-1} \dots b q_n b^{-1}}_m = b q_n^m b^{-1}. \quad (6)$$

Следовательно, вращение кватерниона приводит к умножению кватерниона, полученного возведением в m -ю степень, на те же вращающие кватернионы.

Рассмотрим влияние вращений на значения коэффициентов отображающей функции. Поскольку отображение поверхности пространственного объекта производится на сферу, то при вращении объекта будет происходить такой же поворот векторов, проведенных к поверхности сферы. Поэтому выражение (1) для повернутого изображения объекта с учетом выражений (5) и (6) запишется как

$$\sum_{m=0}^{M-1} b q_n^m b^{-1} a_m^{(b)} = b p_n b^{-1}.$$

Умножим левую часть данного выражения на b^{-1} и правую часть на b :

$$b^{-1} \left(\sum_{m=0}^{M-1} b q_n^m b^{-1} a_m^{(b)} \right) b = b^{-1} (b p_n b^{-1}) b.$$

В результате имеем

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m b^{-1} a_m^{(b)} b = p_n. \quad (7)$$

Используя выражения (1) и (7), запишем

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m (b^{-1} a_m^{(b)} b) = \sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m.$$

Тогда

$$b^{-1} a_m^{(b)} b = a_m.$$

Таким образом, вращение кватернионов, задающих пространственный объект, приводит к умножению коэффициентов отображающей функции на соответствующие вращающие кватернионы. Это позволяет выполнять оценку параметров вращений пространственных объектов, заданных неупорядоченными отметками.

Определение параметров вращающего кватерниона по полиномиальным коэффициентам. Как было показано выше, между коэффициентами проецирующей функции исходного и повернутого пространственных объектов существует однозначная взаимосвязь вида $b^{-1} a^{(b)} b = a$. Задача состоит в нахождении компонент вращающего кватерниона b по значениям коэффициентов $a^{(b)}$ и a . Преобразуем последнее соотношение путем умножения его левой и правой частей на b к виду

$$a^{(b)} b = ba.$$

Распишем покомпонентно произведения в левой и правой частях:

$$\begin{aligned} a^{(b)} b &= (a_0^{(b)} + ia_1^{(b)} + ja_2^{(b)} + ka_3^{(b)})(b_0 + ib_1 + jb_2 + kb_3) = \\ &= a_0^{(b)} b_0 + ia_0^{(b)} b_1 + ja_0^{(b)} b_2 + ka_0^{(b)} b_3 + ia_1^{(b)} b_0 - a_1^{(b)} b_1 + ka_1^{(b)} b_2 - ja_1^{(b)} b_3 + \\ &+ ja_2^{(b)} b_0 - ka_2^{(b)} b_1 - a_2^{(b)} b_2 + ia_2^{(b)} b_3 + ka_3^{(b)} b_0 + ja_3^{(b)} b_1 - ia_3^{(b)} b_2 - a_3^{(b)} b_3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ba &= (b_0 + ib_1 + jb_2 + kb_3)(a_0 + ia_1 + ja_2 + ka_3) = \\ &= b_0 a_0 + ib_0 a_1 + jb_0 a_2 + kb_0 a_3 + ib_1 a_0 - b_1 a_1 + kb_1 a_2 - jb_1 a_3 + \\ &+ jb_2 a_0 - kb_2 a_1 - jb_2 a_2 + ib_2 a_3 + kb_3 a_0 + jb_3 a_1 - ib_3 a_2 - b_3 a_3. \end{aligned}$$

Приравнивая полученные результаты, можно записать

$$\begin{aligned} &a_0^{(b)} b_0 + ia_0^{(b)} b_1 + ja_0^{(b)} b_2 + ka_0^{(b)} b_3 + ia_1^{(b)} b_0 - a_1^{(b)} b_1 + ka_1^{(b)} b_2 - ja_1^{(b)} b_3 + \\ &+ ja_2^{(b)} b_0 - ka_2^{(b)} b_1 - ja_2^{(b)} b_2 + ia_2^{(b)} b_3 + ka_3^{(b)} b_0 + ja_3^{(b)} b_1 - ia_3^{(b)} b_2 - a_3^{(b)} b_3 = \\ &= b_0 a_0 + ib_0 a_1 + jb_0 a_2 + kb_0 a_3 + ib_1 a_0 - b_1 a_1 + kb_1 a_2 - jb_1 a_3 + \\ &+ jb_2 a_0 - kb_2 a_1 - jb_2 a_2 + ib_2 a_3 + kb_3 a_0 + jb_3 a_1 - ib_3 a_2 - b_3 a_3. \end{aligned}$$

После перегруппировки слагаемых получим следующее соотношение:

$$\begin{aligned} & (a_0^{(b)} - a_0)b_0 + i(a_1^{(b)} - a_1)b_0 + j(a_2^{(b)} - a_2)b_0 + k(a_3^{(b)} - a_3)b_0 - \\ & - (a_1^{(b)} - a_1)b_1 + i(a_0^{(b)} - a_0)b_1 + j(a_3^{(b)} + a_3)b_1 - k(a_2^{(b)} + a_2)b_1 - \\ & - (a_2^{(b)} - a_2)b_2 - i(a_3^{(b)} + a_3)b_2 + j(a_0^{(b)} - a_0)b_2 + k(a_1^{(b)} + a_1)b_2 - \\ & - (a_3^{(b)} - a_3)b_3 + i(a_2^{(b)} + a_2)b_3 - j(a_1^{(b)} + a_1)b_3 + k(a_0^{(b)} - a_0)b_3 = 0. \end{aligned}$$

Выделяя коэффициенты при отдельных компонентах кватерниона b , можно записать систему уравнений:

$$\begin{aligned} & (a_0^{(b)} - a_0)b_0 - (a_1^{(b)} - a_1)b_1 - (a_2^{(b)} - a_2)b_2 - (a_3^{(b)} - a_3)b_3 = 0, \\ & (a_1^{(b)} - a_1)b_0 + (a_0^{(b)} - a_0)b_1 - (a_3^{(b)} + a_3)b_2 + (a_2^{(b)} + a_2)b_3 = 0, \\ & (a_2^{(b)} - a_2)b_0 + (a_3^{(b)} + a_3)b_1 + (a_0^{(b)} - a_0)b_2 - (a_1^{(b)} + a_1)b_3 = 0, \\ & (a_3^{(b)} - a_3)b_0 - (a_2^{(b)} + a_2)b_1 + (a_1^{(b)} + a_1)b_2 + (a_0^{(b)} - a_0)b_3 = 0, \end{aligned}$$

или в матричном виде

$$\mathbf{ab} = \mathbf{0}.$$

Такая система имеет одно тривиальное решение: $b_0 = b_1 = b_2 = b_3 = 0$. Условием существования нетривиальных решений этой системы является наличие линейно зависимых строк в матрице \mathbf{a} коэффициентов данного уравнения. Как показали исследования, при построении системы на базе одного коэффициента a матрица коэффициентов имеет ранг, равный двум, т. е. содержит только два линейно независимых вектора. При формировании системы линейных уравнений на основе ряда коэффициентов (не менее трех) система уравнений запишется в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_1 \\ \dots \\ \mathbf{a}_{M-1} \end{bmatrix} \mathbf{b} = \mathbf{0},$$

или

$$\mathbf{Ab} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_1 \\ \dots \\ \mathbf{a}_{M-1} \end{bmatrix}.$$

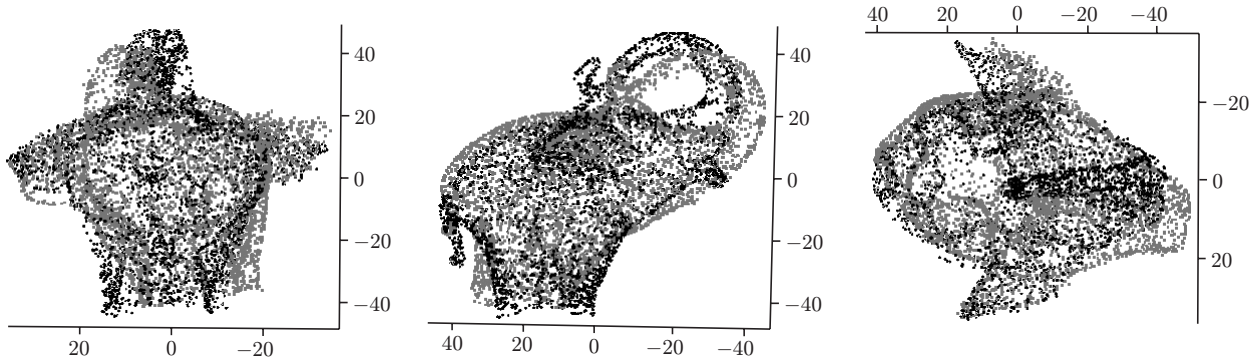


Рис. 4. Ракурсы совмещения изображений трехмерных объектов, представленных на рис. 1

Ранг матрицы \mathbf{A} равен трем. Количество уравнений в системе (8) больше количества неизвестных, поэтому ее решение может базироваться на методе наименьших квадратов [12, 13]. В этом случае переходят к эквивалентной системе линейных уравнений вида

$$\alpha \mathbf{b} = \mathbf{0},$$

где $\alpha = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$. Ранг матрицы α также равен трем, и для решения системы уравнений необходимо найти единственный линейно независимый по отношению к строкам матрицы α вектор. Предлагаемый подход основывается на получении этого вектора с использованием процедуры ортогонализации векторов Грама — Шмидта. Для этого последняя строка матрицы α заполняется псевдослучайными векторами и выполняется ее ортогонализация по отношению к остальным строкам матрицы. После нормировки найденный вектор будет задавать компоненты вращающего кватерниона.

Пример совмещения изображений (см. рис. 1) приведен на рис. 4. Для них получены следующие оценки параметров вращения: угол поворота $\hat{\varphi} = 187,2^\circ$, ось вращения $r = -0,088i + 0,071j + 0,994k$. Как видно из рисунка, эти оценки обеспечивают достаточно точное совмещение изображений.

Распознавание изображений пространственных объектов. При распознавании пространственных объектов на вход распознающего устройства поступают отсчеты, задающие координаты точек поверхности объекта в пространстве. Устройство должно принять обоснованное решение о принадлежности распознаваемого объекта к одному из эталонных классов. В качестве величины, характеризующей меру схожести объектов, может выступать результат скалярного произведения коэффициентов проецирующего полинома эталонного и обрабатываемого объектов:

$$\eta = \sum_{m=0}^{M-1} a_m a_m^{*(\Theta)}. \tag{9}$$

Если параметры линейных преобразований неизвестны, то необходимо предварительно выполнить их оценку, произвести обратную коррекцию аналитического описания распознаваемого объекта и вычислить меру схожести в соответствии с (9).

Для оценки эффективности предлагаемых алгоритмов были построены характеристики распознавания изображений трехмерных объектов. Для этого задавалась величина отношения сигнал/шум

$$q = \|Q\|^2 / \sigma^2 N \tag{10}$$

и определялась величина среднеквадратического отклонения координатного шума

$$\sigma = \|Q\|/\sqrt{qN}. \quad (11)$$

Далее выполнялось зашумление отсчетов объекта заданного класса аддитивным шумом

$$\nu(n) = q(n) + \zeta(n), \quad n = 0, 1, \dots, N - 1,$$

где $\zeta(n) = i\zeta_1(n) + j\zeta_2(n) + k\zeta_3(n)$ — отсчеты шума, компоненты которого $\zeta_1(n)$, $\zeta_2(n)$, $\zeta_3(n)$ имеют нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением (11); $\nu(n)$ — компоненты зашумленного распознаваемого объекта.

После определения коэффициентов проецирующей функции для эталонов и зашумленного объекта вычислялись меры схожести и решение выносилось в пользу класса с наибольшим значением меры схожести.

Результаты экспериментов по распознаванию изображений автомобилей приведены на рис. 5. Алфавит эталонов содержал описания девяти автомобилей: Toyota Avensis, BMW 325i, Chevrolet Camaro, Ferrari F40, Fiat Mini, GMS Foot, Toyota HR80, Mercedes S600, Mercedes A1. В качестве тестовых объектов были выбраны изображения Chevrolet Camaro и Toyota Avensis.

Из-за искажения формы объектов под действием шума при низких отношениях сигнал/шум вероятность правильного распознавания значительно ниже единицы. Из рисунков видно, что вероятность правильного распознавания $p_{\text{пр}} = 0,9$ достигается при отношении сигнал/шум $q = 25$ –30.

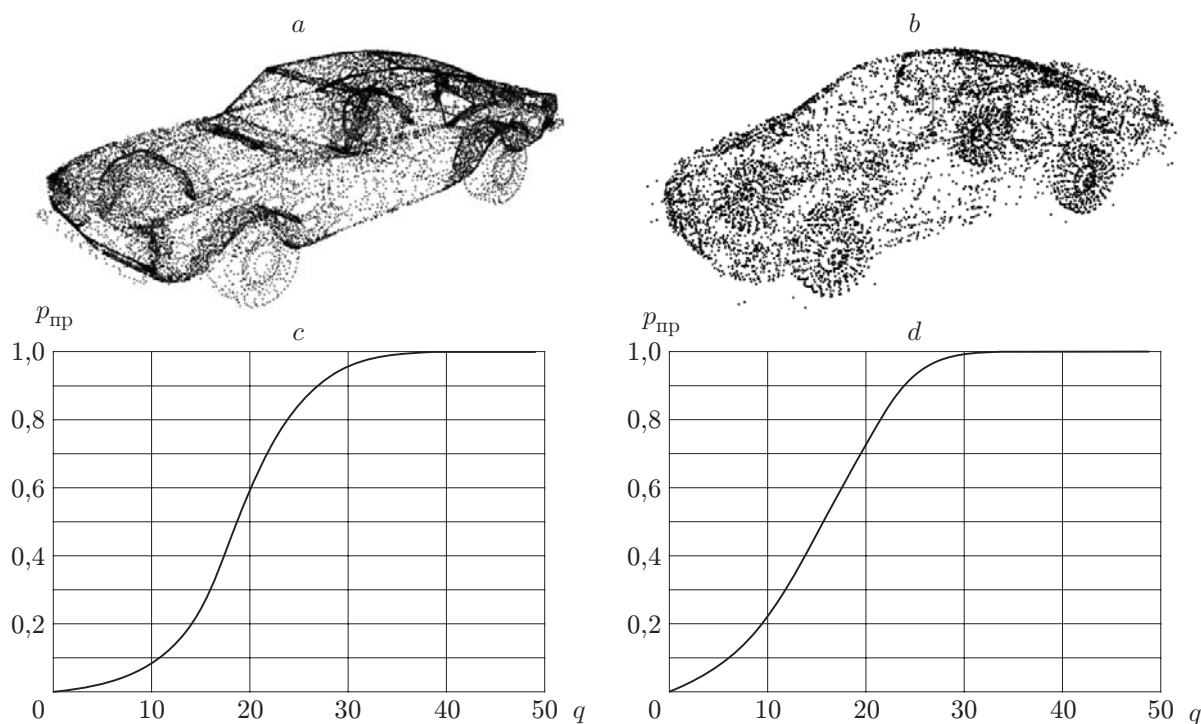


Рис. 5. Эксперименты по распознаванию изображений: тестовые объекты Chevrolet Camaro (a) и Toyota Avensis (b) и характеристики их правильного распознавания (c, d) соответственно

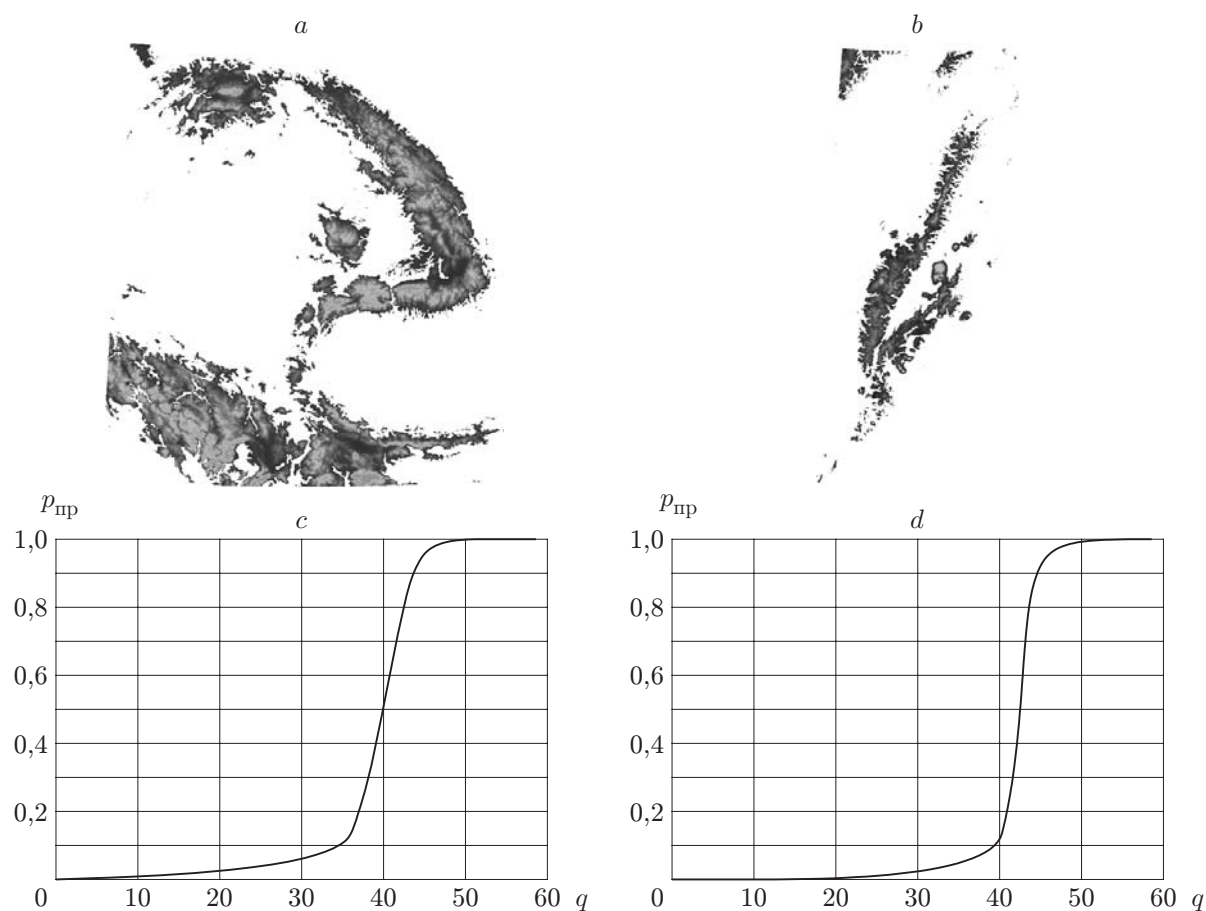


Рис. 6. Пример распознавания изображений: тестовые географические объекты Карпаты (а) и Камчатский полуостров (b) и характеристика их распознавания (c, d) соответственно

Аналогичный эксперимент проводился для набора горных массивов, расположенных на территориях девяти географических объектов: Альпы, Карпаты, Камчатский полуостров, Мадагаскар, Скандинавия, Кавказ, Новая Зеландия, Урал, Япония — со срезом по уровню 500 м над уровнем моря (источник данных "Satellite geodesy", ftp://topex.ucsd.edu/pub/srtm30_plus/topo30). В качестве тестовых изображений (рис. 6) были выбраны Карпаты и Камчатский полуостров.

Как и в предыдущем случае, из-за значительного искажения формы объектов при малых отношениях сигнал/шум наблюдаются низкие вероятности правильного распознавания. Из рисунков видно, что вероятность правильного распознавания $p_{пр} = 0,9$ достигается при отношении сигнал/шум $q = 45-50$.

Таким образом, по требуемым значениям отношения сигнал/шум предлагаемые подходы имеют преимущества перед методом угловых расстояний [14] в 10–20 раз и сопоставимы по помехоустойчивости с пространственно-корреляционными методами, существенно выигрывая по трудоемкости, особенно в условиях априорной неопределенности относительно параметров масштабирования, вращений и переносов. Проигрыш потенциальным характеристикам распознавания изображений [15, 16] по величине отношения сигнал/шум составляет от 10 до 20 раз, что является «платой» за обработку неоптимальных сигналов, отсутствие информации о нумерации отметок в сцене, неопределенность относительно параметров преобразований вращения, масштабирования и переноса.

Заключение. Одной из особенностей контуров пространственных изображений по сравнению с плоскими является неупорядоченность их отсчетов. Если при прослеживании контура плоского изображения, например, с помощью алгоритма Розенфельда [5] упорядочение происходит естественным образом, то универсальных правил обхода поверхностей пространственных объектов, однозначно определяющих траекторию сканирования, в настоящее время не существует, хотя имеется ряд подходов к упорядочению вершин многогранников и формированию их проволочных моделей [3, 10, 17].

В связи с этим в предлагаемой работе рассмотрен метод обработки пространственных изображений, не требующий упорядочения их отсчетов. Подход основан на формировании вторичного описания объекта в виде параметров функции гиперкомплексного переменного, проецирующей отсчеты с его поверхности на единичную сферу. Область применения предложенного метода ограничена классом объектов, у которых каждая точка поверхности может быть однозначно связана с вектором, задающим ее положение относительно начала координат. Примерами таких объектов являются выпуклые многогранники, лица, ландшафтные сцены и т. п. Если указанное условие не выполняется (см. рис. 1), то для различных по форме объектов в отдельных случаях могут быть получены идентичные описания, однако при небольшом объеме алфавита или для объектов со сложной формой это маловероятно.

Благодаря возможности оценки параметров вращений и масштабирования (кроме случаев независимого масштабирования по координатам) предложенный метод обеспечивает инвариантность результатов обработки трехмерных изображений к этим преобразованиям.

Результаты экспериментальных исследований с использованием реальных данных сканирования трехмерных объектов показали достаточно высокую эффективность предлагаемых подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zucker S. W., Hummel R. A.** Three-dimensional edge operator // IEEE Trans. PAMI. 1981. **3**, N 3. P. 324–331.
2. **Yue Z., Zhao W., Chellappa R.** Pose-encoded spherical harmonics for face recognition and synthesis using a single image // EURASIP Journ. Adv. Signal Processing. 2008. **2008**. 18 p.
3. **Фурман Я. А., Кривецкий А. В., Роженов А. А. и др.** Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов /Под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 456 с.
4. **Фурман Я. А.** Сегментация и описание трехмерных структур на базе кватернионных моделей // Научные технологии. 2007. **8**, № 9. С. 37–49.
5. **Фурман Я. А., Кривецкий А. В., Передреев А. К. и др.** Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов/Под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 592 с.
6. **Фурса М. В.** Реконструкция сложных трехмерных объектов методом структурированного освещения // Автометрия. 2008. **44**, № 1. С. 118–126.
7. **Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К.** Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высш. шк., 1983. 295 с.
8. **Хафизов Д. Г.** Упорядочение точек пространственного изображения группового точечного объекта на базе амплитудно-фазового представления // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 10–23.
9. **Прэрт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 310 с.
10. **Фурман Я. А., Рябинин К. Б., Красильников М. И.** Проволочная модель пространственного группового точечного объекта // Автометрия. 2008. **44**, № 3. С. 3–16.

11. **Кантор И. А., Солодовников А. С.** Гиперкомплексные числа. М.: Наука, 1973. 145 с.
12. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
13. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
14. **Бурый А. С., Михайлов С. Н.** Методы идентификации астроориентиров в задачах ориентации и навигации космического аппарата по изображениям звездного неба // Зарубеж. радиоэлектрон. 1994. № 7–8. С. 44–52.
15. **Фурман Я. А., Роженцов А. А.** О предельно достижимых вероятностях правильного распознавания многомерных векторных сигналов // Автометрия. 2004. **40**, № 3. С. 31–45.
16. **Роженцов А. А.** Синтез помехоустойчивых сигналов при объеме алфавита, не совпадающем с размерностью сигнала // Автометрия. 2006. **42**, № 4. С. 36–47.
17. **Препарата Ф., Шеймос М.** Вычислительная геометрия: Введение. М.: Мир, 1979. 478 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2009 г.
