

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.931;004.932

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-56-66

Оригинальная статья /Original Paper

**Инварианты в задачах распознавания образов и контроля состояний
сложных объектов**

В.Б. Мелехин¹, В.М. Хачумов²⁻⁴, М.В. Хачумов²⁻⁴

¹Дагестанский государственный технический университет,
¹367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

²Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН,

²152021, Ярославская обл., Переславский р-н, с. Веськово, ул. Петра Первого, д.4а, Россия,

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управления» РАН,

³119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2, Россия,

⁴Российский университет дружбы народов (РУДН),

⁴117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение эмуляторов основных датчиков малого космического аппарата (КА). **Метод.** Качество восстановления определяется среднеквадратичным отклонением (СКО) данных от эталонов. Исследование основано на применении метода динамического программирования. **Результат.** Проведен обзор работ в области применения устойчивых характеристик – инвариантов, в прикладных областях распознавания образов и контроля состояний сложных технических систем. Предложен и протестирован метод, направленный на выявление отказов и построение эмуляторов датчиков малого КА на основе анализа устойчивых показателей: коэффициентов корреляции и ковариации. Предложенный подход позволяет повысить в целом надежность информационно-измерительной системы малого космического аппарата. В дальнейшем для эмуляции вышедшего из строя датчика планируется применять множественную корреляцию временных последовательностей. **Вывод.** В общем случае, распознавание сводится к сравнению графовых структур объектов к корректному сопоставлению иерархических моделей изображений на основе различных инвариантов. Контроль состояний сложных систем основывается на применении устойчивых характеристик, выступающих в качестве инвариантных или субинвариантных дескрипторов. Инварианты в различных приложениях помогают распознавать текущую ситуацию с достаточной степенью точности, снижая, как правило, размерность задачи.

Ключевые слова: иерархия, изображение, граф, изоморфизм, инвариант, кортеж, критерий, сложный объект, измерение расстояний, пирамида видимости, контроль, состояние

Для цитирования: В.Б. Мелехин В.М. Хачумов, М.В. Хачумов. Инварианты в задачах распознавания образов и контроля состояний сложных объектов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):56-66. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-56-66

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00022-а «Разработка и исследование методов распознавания образов на основе инвариантов к яркостным и геометрическим преобразованиям в системах технического зрения беспилотных летательных аппаратов»).

Invariants in problems of pattern recognition and control of states of complex objects

V.B. Melekhin¹, V.M. Khachumov²⁻⁴, M.V. Khachumov²⁻⁴

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

² A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems RAN,

²4a Peter the Great Str., Yaroslavl region, Pereslavl district, Veskovo 152021, Russia,

³Federal Research Center «Informatics and Management» of the Russian Academy of Sciences,

³44 Vavilova Str., build.2, Moscow 119333, Russia,

⁴Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),

⁴6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to build emulators of the main sensors of a small spacecraft (SC). **Method.** The quality of recovery is determined by the standard deviation (RMS) of the data from the standards. The study is based on the application of the dynamic programming method. **Result.** A review of works in the field of application of stable characteristics - invariants, in the applied areas of pattern recognition and state control of complex technical systems is carried out. A method aimed at identifying failures and building small spacecraft sensor emulators based on the analysis of stable indicators: correlation and covariance coefficients is proposed and tested. The proposed approach makes it possible to increase the overall reliability of the information-measuring system of a small spacecraft (SC). In the future, to emulate a failed sensor, it is planned to use multiple correlation of time sequences. **Conclusion.** In the general case, recognition is reduced to comparing the graph structures of objects to the correct matching of hierarchical image models based on various invariants. Control of the states of complex systems is based on the use of stable characteristics that act as invariant or subinvariant descriptors. Invariants in various applications help to recognize the current situation with a sufficient degree of accuracy, usually reducing the dimension of the problem.

Keywords: hierarchy, image, graph, isomorphism, invariant, tuple, criterion, complex object, distance measurement, pyramid of visibility, control, state

For citation: V.B. Melekhin, V.M. Khachumov, M.V. Khachumov. Invariants in problems of pattern recognition and control of states of complex objects. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 56-66. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-56-66

Acknowledgment. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-07-00022-a “Development and study of pattern recognition methods based on invariants to brightness and geometric transformations in vision systems for unmanned aerial vehicles”).

Введение. Свойство оставаться неизменными при определенных внешних воздействиях позволяет называть некоторые характеристики сложных объектов инвариантами или полуинвариантами в зависимости от степени устойчивости. Инварианты способны выступать в роли информативных признаков, сохраняющих и передающих характерные особенности объектов, подвергнутых преобразованиям, что увеличивает вероятность получения правильного решения. Применение инвариантов становится ключевым фактором при создании эффективных методов и алгоритмов распознавания и контроля ситуаций.

В задачах распознавания объекты могут быть представлены в виде графов и иерархий. Такие представления позволяют решать задачу распознавания как задачу поиска изоморфизма графов. В этом случае в качестве инвариантов могут выступать различные устойчивые числоатрибуты, определяющие степень вершин, число ребер и их длину, вес и др. Определение изоморфизма графов на основе инвариантов – один из эффективных подходов к распознаванию объектов различной природы.

В работах [1,2] в качестве инвариантов предлагается использовать объединения локальных характеристик графа, например: плотность, хроматическое число, число Хадвигера и др. Важно отметить, что определение изоморфизма за полиномиальное время является одной из нерешенных проблем современной теории сложности вычислений. Сочетание точных алгоритмов и эвристических, основанных на итерационном уточнении решений, рассмотрено, например, в

работе [3]. В статье [4] представлено решение проблемы изоморфизма графов методами вероятностного линейного программирования.

В настоящей работе представлены результаты поиска устойчивых эвристических характеристик, способствующих выявлению изоморфизма. Проблема нахождения полного инварианта графа находится центре внимания до настоящего времени [2, 5].

В работах [6,7] предлагаются подходы к сравнению эталонных моделей, представленных иерархиями в виде пирамид видимости с набором плоскостей из точки наблюдения. Первая иерархия (нижняя часть пирамиды) является наиболее полным описанием, далее изображение последовательно «сжимается» от слоя к слою по определенному правилу, что соответствует моделям изображения, наблюдаемого с разных расстояний. В случае распознавания объектов, наблюдаемых с разных сторон и расстояний, используют инвариантные моменты, что приводит к одинаковой размерности сравниваемых изображений; существенному сокращению размерности описаний сравниваемых объектов, устранению влияния поворотов и смещений изображений [8].

Вопросы корректного сравнения иерархий рассмотрены в работе [9], в которой предложена специальная мера, основанная на схеме динамического программирования. В настоящей работе проблема корректного сравнения эталонных моделей с реальными изображениями объектов, представленных иерархиями, решается на основе инвариантных моментов.

Представляют интерес вопросы применения инвариантов в задачах контроля и диагностики технических систем. Здесь в качестве субинвариантов выступают коэффициенты корреляции данных его датчиков. Корреляционный анализ и прогнозирование сбоя датчиков ориентации с помощью искусственных нейронных сетей выполнялись, например, в работе [10]. Места сбоев обнаруживаются в результате сравнения реального и прогнозного значений корреляции. В работе [11] описана нейросетевая технология решения задачи контроля датчиков положения космического аппарата. Контроль на основе анализа парных корреляций дает возможность выявить конкретный датчик, показания которого неверны. В работе [12] проверялась модель отказа датчика ориентации малого космического аппарата (КА), при которой его показания составляли некоторую постоянную величину.

Постановка задачи. В настоящей работе рассматривается задача построения эмуляторов основных датчиков малого КА. Качество восстановления определяется среднеквадратичным отклонением (СКО) данных от эталонов.

Методы исследования. 1. Сравнение графовых моделей объектов на основе инвариантов. Для решения задачи изоморфизма рассматриваются простые связные графы $G = (V, E)$, где V – множество вершин; E – множество ребер, содержащего n – вершин и m – ребер. В качестве метода инвариантных свойств выступает кортеж графа, характеризуемый минимумом суммарной длины всех связей в кортеже, а в качестве атрибута для определения изоморфизма, – собственно, упорядоченный вектор длин, приписываемых вершинам кортежа. Для оценки качества кортежа вводится понятие длины ребра как неотрицательной разности порядковых номеров вершин в кортеже инцидентных данному ребру.

Дадим некоторые определения. Функцию f , относящую каждому графу G некоторый элемент $f(G)$ из множества M , будем называть инвариантом, если на изоморфных графах ее значения совпадают, т.е. для любых G и G' : $G \cong G' \Rightarrow f(G) = f(G')$.

Инвариант графа, удовлетворяющий необходимому и достаточному условию изоморфизма: т.е. $G \cong G' \Leftrightarrow f(G) = f(G')$, будем называть полным. Если на сравниваемых графах значения функции f отличаются на допустимые величины Δ , т.е. для любых L и L' $G \cong G' \Rightarrow \left| f(G) - f(G') \right| \leq \Delta$, то будем называть ее субинвариантом. Такой подход обеспечи-

ваает возможность приближенного сравнения графовых моделей с допустимой погрешностью. Рассмотрим эвристический метод построения кортежа графа, суть которого состоит в формировании кортежа вершин графа G , в котором вершины с большим числом связей между собой размещаются в кортеже по соседству, а слабо связанные вершины – в отдаленных друг от друга позициях. Алгоритм, приведенный в работе [13], позволяет в цикле строить кортеж графа G с минимальной суммарной длиной ребер. Количество глобальных циклов n определяется числом вершин в графе. Алгоритм в каждом цикле (шаге) с номером r оперирует двумя подграфами D_1^r и D_2^r графа $G = (V, E)$ с выбранными и еще не выбранными вершинами графа, соответственно. На каждом r цикле выбирается и отмечается индексом r одна из неотмеченных вершин $a_i \in V$ подграфа D_2^r , связанная непосредственно с одной или несколькими вершинами подграфа D_1^r . Эта вершина переносится из подграфа D_2^r в граф D_1^r и служит очередной вершиной формируемого кортежа. При выборе r -ой компоненты картежа на r -ом цикле алгоритма отыскивается такая вершина a_i^r , для которой $\xi_{1i}^r - \xi_{2i}^r = \delta_{i\max}^r$, где ξ_{1i}^r - число дуг, связывающих вершину a_i с D_1^{r-1} а ξ_{2i}^r - число дуг, связывающих a_i с D_2^r . Каждый цикл связан с анализом и оценкой $n - r$ еще невыбранных вершин-кандидатов. Таким образом, в итоге получаем искомый кортеж с минимизированной суммарной длиной связей и соответствующую ему матрицу смежности. Вычислительную сложность алгоритма построения кортежа можно оценить как $n(n-1)$.

Пусть заданы два графа $G_1 = (V_1, E_1)$ и $G_2 = (V_2, E_2)$ причем второй получен путем переименования вершин (рис.1 и рис.2).

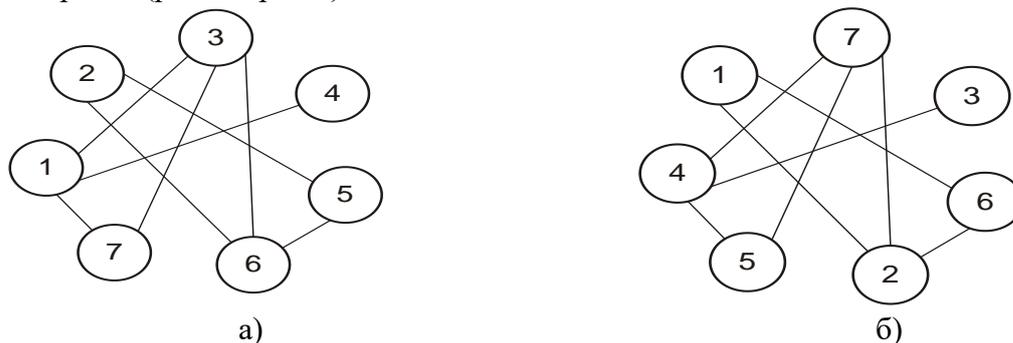


Рис. 1. Графы G_1 (а) и G_2 (б)
 Fig. 1. Columns G_1 (a) and G_2 (b)

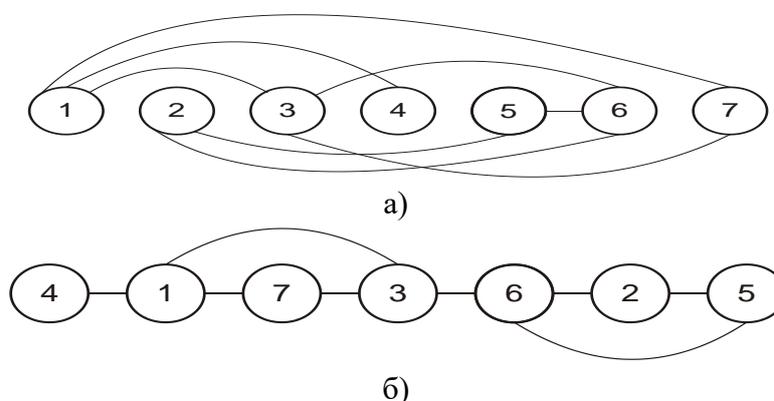


Рис. 2. Кортеж графа G_1 без оптимизации (а) и с минимальной суммарной длиной ребер (б)
 Fig. 2. Graph G_1 tuple without optimization (a) and with the minimum total edge length (b)

Вариант кортежа для графа G_1 имеет вид, представленный на рис. 2а. Применяя алгоритм построения кортежа с минимальной суммарной длиной ребер, получим результат, приве-

денный на рис. 2б. Суммарная длина ребер в кортеже графа G_1 на рис.2а составляет $L_1 = 26$. Суммарная длина ребер в оптимизированном кортеже (рис.2б) $L_1^o = 10$.

Аналогично поступим и для графа G_2 . Результаты отображения графа G_2 в виде произвольного и упорядоченного кортежей в соответствии с алгоритмом представлены на рис.3а и рис.3б.

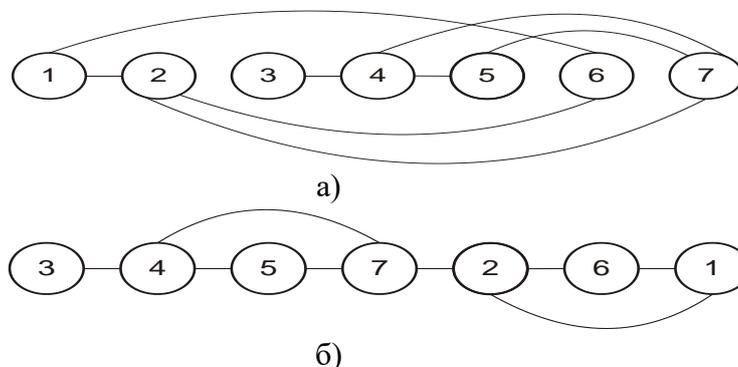


Рис. 3. Кортеж графа G_2 без оптимизации (а) и с оптимизацией (б)
Fig. 3. Graph G_2 tuple without optimization (a) and with optimization (b)

Общая длина ребер в графе рис.3а $L_2 = 22$. на рис. 3б. Общая длина ребер в оптимизированном кортеже на рис.3б составляет $L_2^o = 10$. Таким образом, в рассмотренном примере графы G_1 и G_2 в оптимизированных кортежах имеют равные показатели $L_1^o = L_2^o = 10$, что в интеграции с другими инвариантами и позволяет считать их изоморфными.

Отметим отдельно, что применяемый алгоритм построения кортежа [13] допускает в общем случае наличие нескольких альтернативных вариантов. Поэтому в сочетании с эвристикой может потребоваться ограниченный перебор порядка вершин с целью достижения равенства характеристик оптимизированных кортежей для G_1 и G_2 .

2. Измерение расстояний между пирамидами видимости на основе инвариантов. Пусть, известны изображения (слои) наблюдаемых объектов с разных расстояний, образующих пирамиду видимости. Представим изображение слоя иерархического описания в виде графа – упорядоченного облака точек (пикселей), характеризующихся только одним значением (глубины, яркости).

Первым шагом в процедуре сравнения объектов является нахождение матрицы локальных расстояний $d(i, j)$ между иерархиями эталона и текущего объекта, процедура описана в работе [9]. Пусть, например, уровень i первой иерархии сравнивается с уровнем j второй иерархии. Последовательно сравниваем каждую вершину первой иерархии с вершинами второй иерархии и находим похожую по весу вершину на выбранных уровнях. Затем находим расстояние между вершинами (как модуль разности весов). Разности между похожими вершинами заносим в счетчик и суммируем. Если для вершины нет пары, то вводим дополнительные вершины с нулевым весом. Полученное значение счетчика с минимальной суммой заносится в соответствующую ячейку таблицы. После заполнения таблицы, в ней содержатся величины локальных расстояний между всеми парами уровней иерархий.

Расстояние между двумя объектами находят путем перевода уровней иерархии первого объекта в соответствующие уровни иерархии второго объекта. Для этого используем метод динамического программирования. Движение от верхней левой клетки к нижней правой клетке таблицы осуществляется по диагонали, горизонтали и вертикали. В проложенном пути производим суммирование чисел, находящихся в клетках, входящих в оптимальный путь. При этом учитываются дополнительно весовые коэффициенты перехода по горизонтали, вертикали и диагонали соответственно.

Для определенности будем пользоваться схемой, когда по диагонали движение осуществляется с коэффициентом 1, а по вертикали и горизонтали с коэффициентом 2 (по схеме 2-1-2). В случае неоднозначности движения по клеткам для измерения расстояния следует рассмотреть все альтернативные пути. Альтернативный метод сравнения, использующий вместо пиксельного представления значения инвариантных моментов предложен в работе [6]. Получение инвариантных моментов для каждой иерархии объекта приводит к одинаковой размерности сравниваемых изображений; существенному сокращению размерности описаний сравниваемых объектов; нивелированию возможных искажений, связанных с поворотами и смещениями изображений [8].

Рассмотрим в общем случае пространство признаков R^7 из семи инвариантных моментов. Ограничимся без потери общности тремя объектами O_1, O_2, O_3 .

В принятой модели каждый объект представлен набором из n ($i=1, \dots, n$) изображений (ракурсов, слоев) иерархий. Расстояние между двумя точками i, j объектов O_1, O_2 пространства R^7 есть неотрицательное число, которое определим, как $R_{i,j}(X_i, Y_j) = |X_i - Y_j| = \sqrt{(x_1^i - y_1^j)^2 + \dots + (x_7^i - y_7^j)^2}$ и назовем локальным. Для сравнения иерархий объектов O_1, O_2 вычислим все локальные расстояния и построим матрицу локальных расстояний. Пространство R^7 является метрическим, что легко можно показать.

$$R_{i,j}(X_i, Y_j) = |X_i - Y_j| = |X_i - Y_j + Z_k - Z_k| \leq |X_i - Z_k| + |Z_k - Y_j|,$$

$$R_{i,j}(X_i, Y_j) \leq R_{i,k}(X_i, Z_k) + R_{k,j}(Z_k, Y_j)$$

2. Расстояние между двумя объектами O_1, O_2 определяется как путь минимального веса по схеме динамического программирования (2:1:2).

Расстояние $R(O_1, O_2)$ вычислим следующим алгоритмом

Начало:

$$i, j, l, m = 1$$

$$R(O_1, O_2) := R(X_1^1, Y_1^1),$$

$$R(O_1, O_2) := R(O_1, O_2) + \min(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m))$$

Цикл:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \min(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)) = R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), \\ \text{то } i := i+1, j := j, l := l, m := m+1; \\ \text{Если } \min(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)) = R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), \\ \text{то } i := i+1, j := j, l := l, m := m+1; \\ \text{Если } \min(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)) = R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m), \\ \text{то } i := i+1, j := j, l := l, m := m+1. \end{array} \right.$$

Конец: $i = j = n, l, m = 3$

Для рассмотренного случая

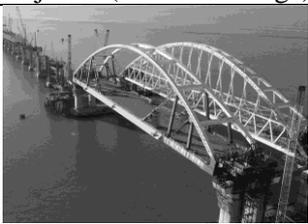
$$R(O_1, O_2) \geq 0, R(O_1, O_2) = R(O_2, O_1).$$

Последнее равенство справедливо, т.к. транспонирование матрицы локальных расстояний, необходимое для сравнения иерархий O_2, O_1 , не меняет веса проложенного пути. Правило треугольника: $R(O_1, O_2) \leq R(O_1, O_3) + R(O_3, O_2)$ лежит за пределами рассмотрения настоящей работы. Пусть даны три полутоновых объекта, изображения размерности которых (639 x 472),

образуют первый уровень иерархии. Методом последовательного «сжатия» получены изображения других уровней пирамиды видимости. Уровни пирамиды видимости для каждого объекта представлены в табл.1, (всего по три уровня), они приведены в одном масштабе.

Таблица 1. Исходные графические объекты

Table 1. Source graphic objects

Объект 1 (Эйфелева башня) Object 1 (Eiffel Tower)	Объект 2 (Кремль) Object 2 (Kremlin)	Объект 3 (Крымский мост) Object 3 (Crimean bridge)
		
639 x 472		
		
320 x 236		
		
160 x 118		

Инвариантные моменты для полученных слоев (уровней иерархии) изображения внесены в табл.2., в которой приведены шесть основных моментов из установленных семи [8], т.к. первый момент исключен из рассмотрения как наименее информативный.

Таблица 2. Расчет инвариантных моментов

Table 2. Calculation of invariant moments

Уровни Levels	Инвариантные моменты для изображений/Invariant moments for images		
	Первый объект First object	Второй объект Second object	Третий объект Third object
1 (639 x 472)	9.3976e-02	8.2227e-02	9.0056e-02
	7.8943e-04	2.4902e-03	2.3284e-03
	5.6717e-04	1.1548e-03	2.5347e-03
	2.0075e-07	-1.2724e-06	6.0836e-06
	-7.7095e-05	-6.7270e-05	-6.3594e-04
	3.2207e-07	1.4885e-06	-9.5224e-07
2 (320 x 236)	9.4928e-02	8.3059e-02	9.1032e-02
	7.7041e-04	2.4785e-03	2.3003e-03
	5.6738e-04	1.1515e-03	2.5202e-03
	2.1076e-07	-1.2659e-06	5.9983e-06
	-7.3733e-05	-6.7994e-05	-6.3611e-04
	3.1032e-07	1.4770e-06	-9.1791e-07
3 (160 x 118)	9.5162e-02	8.3033e-02	9.1373e-02
	6.9756e-04	2.4769e-03	2.2292e-03
	5.5662e-04	1.1373e-03	2.5307e-03
	2.2471e-07	-1.1892e-06	5.9351e-06
	-6.3840e-05	-7.5499e-05	-6.3782e-04
	2.6420e-07	1.4933e-06	-9.5030e-07

В табл. 3–5 приведены расстояния между всеми парами изображений трех объектов по метрике Евклида на основе вычисленных инвариантных моментов.

Таблица 3. Расстояния между уровнями первого и второго объектов

Table 3. Distances between the levels of the first and second objects

Уровни объекта 1 Object levels 1	Уровни объекта 2 Object levels 2		
	1	2	3
1	<u>1.1886e-02</u>	1.1062e-02	1.1087e-02
2	1.2830e-02	<u>1.2006e-02</u>	1.2031e-02
3	1.3072e-02	1.2248e-02	<u>1.2006e-02</u>

Расстояние между иерархиями объектов 1 и 2 по схеме 2-1-2 динамического программирования составит:

$$R_{12}=1.1886e-02+1.2006e-02+1.2006e-02=3.5898e-02$$

Таблица 4. Расстояния между уровнями первого и третьего объектов

Table 4. Distances between the levels of the first and third objects

Уровни объекта 1 Object levels 1	Уровни объекта 3 Object levels 3		
	1	2	3
1	<u>4.6818e-03</u>	3.8830e-03	3.6078e-03
2	5.5093e-03	<u>4.6530e-03</u>	4.3516e-03
3	5.7423e-03	4.8796e-03	<u>4.5746e-03</u>

$$R_{13}=4.6818e-03+4.6530e-03+4.5746e-03=1.3909e-02.$$

Таблица 5. Расстояния между уровнями второго и третьего объектов

Table 5. Distances between the levels of the second and third objects

Уровни объекта 2 Object levels 2	Уровни объекта 3 Object levels 3		
	1	2	3
1	<u>7.9711e-03</u>	8.9300e-03	9.2702e-03
2	7.1563e-03	<u>8.1114e-03</u>	8.4508e-03
3	7.1841e-03	8.1390e-03	<u>8.4784e-03</u>

$$R_{23}=7.9711e-03+8.1114e-03+8.4784e-03=2.4561e-02$$

Таким образом, определяется близость объектов и решается задача распознавания. Не трудно проверить, что расстояние между иерархиями самого одного и того же объекта будет нулевым.

4. Диагностика и эмуляция датчиков на основе устойчивой корреляции данных.

Как показывают проведенные исследования, между показаниями некоторых датчиков КА существует устойчивая связь, выявляемая коэффициентом корреляции. Этот факт может служить основанием для выявления неисправности датчика, которая приводит к потере устойчивости этого значения. Кроме того, наличие такого субинварианта позволяет моделировать значения утраченного датчика, продлевая жизненный цикл всей системы в целом.

Пусть каждому датчику соответствует своя последовательность временных отсчетов в таблице.

Рассмотрим две строки B_1 и B_2 , определенные на выделенном интервале времени. Каждое значение в строке привязано ко времени отсчета, которое опускаем без потери общности, опираясь на имеющееся соответствие элементов в столбце.

Коэффициент корреляции векторов B_1 и B_2 вычисляются по формуле $\gamma(B_1, B_2) = \frac{(B_1, B_2)}{\|B_1\| \cdot \|B_2\|}$

, где $\|B_j\|$ – норма вектора B_j .

Коэффициент корреляции позволяет установить соответствие между временными последовательностями: чем ближе по модулю к 1 коэффициент, тем сильнее связаны последовательности.

Наличие устойчивой во времени и сильной корреляции означает, что есть возможность достаточно точно воспроизводить одну последовательность через другую. Воспользуемся формулой линейной корреляции:

$$r_{xy} = \frac{\text{COV}_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где COV_{xy} – коэффициент ковариации, σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения случайных величин x и y .

Из формулы (1) следует уравнение регрессии:

$$y(x) = r_{xy} \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \sigma_y + \bar{y} = bx + a, \quad (2)$$

где \bar{y} и \bar{x} – математические ожидания случайных величин x и y ,

$$b = \frac{r_{xy} \sigma_y}{\sigma_x}, \quad a = \frac{r_{xy} \bar{x} \sigma_y}{\sigma_x} + \bar{y}.$$

Оценим качество уравнения регрессии с помощью среднеквадратического отклонения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y(x) - y_i)^2}, \quad (3)$$

где y_i – фактические показания датчика, $y(x)$ – вычисленные показания.

В рамках исследования проведены эксперименты по эмуляции показаний датчиков на примере телеметрии, полученной от малого КА «Юбилейный». Эмуляция проводилась на основе показаний устойчиво коррелирующих датчиков с применением уравнения регрессии. Рассмотрим несколько графиков результатов эмуляции.

На рис. 4 представлен результат эмуляции вышедшего из строя датчика температуры 1-ой панели солнечной батареи (Plat1,C) по показаниям датчика напряжения тока на магнитометре (Uz,V).

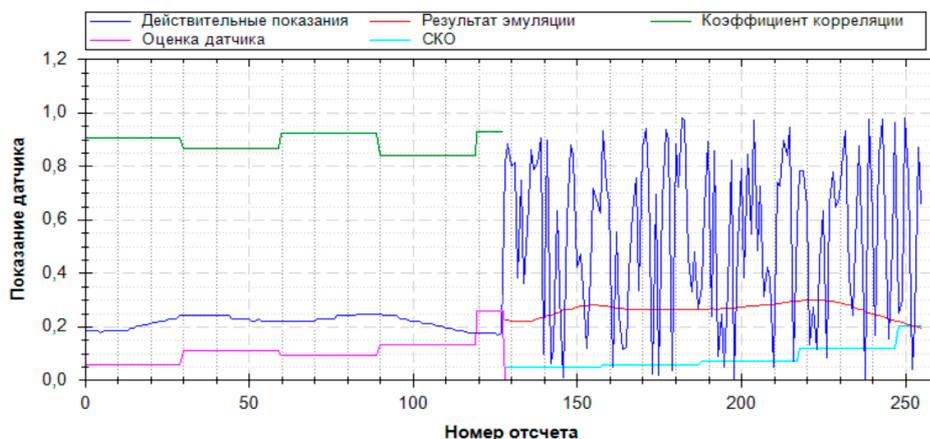


Рис. 4. Эмуляция показаний датчика температуры 1-ой панели солнечной батареи по показаниям датчика напряжения тока на магнитометре

Fig. 4. Emulation of the readings of the temperature sensor of the 1st solar panel according to the readings of the voltage sensor on the magnetometer

Видно, что часть показаний датчика Plat1,C сильно зашумлена (синий цвет). Зеленым цветом обозначен коэффициент корреляции показаний датчиков Plat1,C и Uz,V, вычисляемый на интервале из 30 отсчетов.

На графике (рис.4) видно, что коэффициент корреляции был высоким до появления шума. На зашумленном участке наблюдается отсутствие корреляции или изменение ее знака на обратный. Розовым цветом обозначена доля датчиков, показания которых коррелируют с датчиком Plat1, C с коэффициентом корреляции выше 0.7. Резкое снижение парного коэффициента корреляции между показаниями датчиков Plat1,C и Uz,V и уменьшение доли коррелирующих

датчиков с датчиком Plat1,C (формула (1)) являются показателями сбоя или выхода из строя датчика Plat1,C.

По формуле (2) выполнена эмуляция вышедшего из строя датчика (красный цвет). Голубым цветом обозначена оценка СКО (формула 3) на интервалах по $n = 30$ отсчетов. Среднее СКО рассмотренной эмуляции составило 0.0988. Как показывают исследования, при слабой корреляционной связи СКО при эмуляции больше, чем при высокой.

Вывод. В настоящей статье для определения изоморфизма графов применяется к известным инвариантам дополнительно минимум суммарной длины ребер по установленной метрике. На примере показано, что переименование вершин в графе не приводит к изменению величин суммарных длин и векторов длин ребер при вершинах оптимизированных кортежей графов. Эвристический алгоритм с необходимым критерием позволяет достаточно быстро строить такие кортежи, а полученные на его основе числовые характеристики целесообразно использовать в составе векторов инвариантов для определения изоморфизма.

Совмещение и сравнение пирамид видимости объектов представляет практический интерес для решения задач распознавания графических образов трехмерных объектов. Для сравнения плоскостей пирамиды применяют инвариантные моменты.

Применение инвариантов приводит к существенному сжатию признакового пространства и упрощает задачу распознавания объектов на трехмерных сценах. Рассмотренные подходы предоставляют возможность выбора различных постановок задач сравнения иерархий и методов их решения.

Предложен и протестирован метод, направленный на выявление отказов и построение эмуляторов датчиков малого КА на основе анализа таких устойчивых показателей как коэффициенты корреляции и ковариации. Предложенный подход позволяет повысить в целом надежность информационно-измерительной системы КА. В дальнейшем для эмуляции вышедшего из строя датчика планируется применять множественную корреляцию временных последовательностей.

Библиографический список:

1. Dehmer M., Grabner M., Mowshowitz A., Emmert-Streib F. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants. *Advances in Computational Mathematics*. 2013. Vol. 39. No. 2. Pp. 311–325. DOI: 10.1007/s10444-012-9281-0
2. Погребной А.В. Полный инвариант графа и алгоритм его вычисления // *Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии*. 2014. Т. 325. № 5. С.110–122.
3. Stoichev S.D. New exact and heuristic algorithms for graph automorphism group and graph isomorphism. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*. 2019. vol. 24. Pp. 1–27. DOI: 10.1145/3333250
4. Takaroui R., Boyd S. Linear Programming Heuristics for the Graph Isomorphism Problem // *ArXiv*.2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1611.00711.pdf> (дата обращения: 18.01.22)
5. Хачумов М.В., Талалаев А.А., Хачумов В.М. Об одном эвристическом критерии в задаче определения изоморфизма графов на основе инвариантов // *Современные наукоемкие технологии*, 2022, №2. С.159–163. DOI: 10.17513/snt.39051
6. Фраленко В.П., Хачумов В.М., Хачумов М.В. Измерение расстояний между пирамидами видимости на основе инвариантов // *Современные наукоемкие технологии*, 2021, №5. С. 94–101. DOI: 10.17513/snt.38664
7. Watson A.B., Ahumada A. The pyramid of visibility // *Journal of Vision*, 16(12):567, 2016. DOI: 10.1167/16.12.567
8. Žunić D., Žunić J. Shape ellipticity from Hu moment invariants // *Applied Mathematics and Computation*, vol.226, 2014. Pp.406–414. DOI: 10.1016/j.amc.2013.10.062
9. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 1999. 270 с.
10. Талалаев А.А., Фраленко В.П. Контроль и диагностика датчиков положения космического аппарата // *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2009? №3. С.49–52
11. Емельянова Ю.Г., Константинов К.А., Погодин С.В., Талалаев А.А., Тищенко И.П., Фраленко В.П., Хачумов В.М. Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата // *Программные системы: теория и приложения*, 2010, №1. С. 45–59
12. Емельянова Ю.Г. Алгоритмическое и программное обеспечение человеко-машинных интерфейсов с когнитивно-графическим отображением информации для систем космического назначения: дис. канд. техн. наук. Москва. 2019. 168 с.

13. Топольский Н.Г., Святенко И.Ю., Трефилов Г.Б., Сатин А.П. Интерактивный оптимизационный метод декомпозиции графов причинно-следственных связей в системах поддержки принятия решений // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности", 2009, № 5(27); URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/11-05-09.ttb.pdf> (дата обращения: 18.01.2022).

References:

1. Dehmer M., Grabner M., Mowshowitz A., Emmert-Streib F. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants, *Advances in Computational Mathematics*, 2013; 39(2): 311–325. DOI: 10.1007/s10444-012-9281-0
2. Pogrebnoj A.V. A complete graph invariant and an algorithm for its calculation. [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Informacionnye tekhnologii] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Information Technology*. 2014; 325(5): 110–122. (In Russ)
3. Stoichev S.D. New exact and heuristic algorithms for graph automorphism group and graph isomorphism, *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 2019; 24:1–27. DOI: 10.1145/3333250
4. Takaroui R., Boyd S. Linear Programming Heuristics for the Graph Isomorphism Problem, *ArXiv*, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1611.00711.pdf> (дата обращения: 18.01.22)
5. Hachumov M.V., Talalaev A.A., Hachumov . On one heuristic criterion in the problem of determining the isomorphism of graphs based on invariants. [Sovremennye naukoemkie tekhnologii] *Modern science-intensive technologies*. 2022; 2:159–163. DOI: 10.17513/snt.390516. (In Russ)
6. Fralenko V.P., Hachumov V.M., Hachumov M.V. Measurement of distances between pyramids of visibility based on invariants. [Sovremennye naukoemkie tekhnologii] *Modern science-intensive technologies*. 2021; 5: 94–101. DOI: 10.17513/snt.38664. (In Russ)
7. Watson A.B., Ahumada A. The pyramid of visibility, *Journal of Vision*, 16(12):567, 2016. DOI: 10.1167/16.12.567
8. Žunić D., Žunić J. Shape ellipticity from Hu moment invariants. *Applied Mathematics and Computation*, 2014; 226: 406–414. DOI: 10.1016/j.amc.2013.10.062
9. Zagorujko N.G, Applied methods of data and knowledge analysis. [Izd-vo Instituta matematiki] *Publishing House of the Institute of Mathematics Novosibirsk*. 1999; 270. (In Russ)
10. Talalaev A.A., Fralenko V.P. Control and diagnostics of spacecraft position sensors. [Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij] *Artificial intelligence and decision making*. 2009; 3:49–52. (In Russ)
11. Emel'yanova YU.G., Konstantinov K.A., Pogodin S.V., Talalaev A.A., Tishchenko I.P., Fralenko V.P., Hachumov V.M. Neural network control system for spacecraft orientation and range sensors. [Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya] *Program systems: theory and applications*. 2010;1: 45–59. (In Russ)
12. Emel'yanova YU.G.: Algorithmic and software for human-machine interfaces with cognitive-graphic display of information for space systems dis. kand. tekhn. nauk. Moskov, 2019; 168. (In Russ)
13. Topol'skij N.G., Svyatenko I.YU., Trefilov G.B., Satin A.P. Interactive optimization method for decomposition of graphs of cause-and-effect relationships in decision support systems [Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti] . *Internet journal "Technologies of technosphere safety"*. 2009; 5(27); URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/11-05-09.ttb.pdf> (data obrashcheniya: 18.01.2022). (In Russ)

Сведения об авторах:

Мелехин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; pashka1602@rambler.ru

Хачумов Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ГНУ «Институт программных систем» им. А.К. Айламазяна РАН, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, профессор, ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов»; vmh@isa.ru

Хачумов Михаил Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ГНУ «Институт программных систем» им. А.К. Айламазяна РАН, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, доцент ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов»; khmike@inbox.ru

Information about the authors:

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems named RAS, Federal Research Center "Computer Science and Control" RAS; Prof., Federal State Budgetary Institution of Higher Education "Peoples' Friendship University of Russia"; vmh@isa.ru

Mikhail V. Khachumov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher, A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems named RAS, Federal Research Center "Computer Science and Management" RAS, Assoc. Prof., Peoples' Friendship University of Russia; khmike@inbox.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 01.06.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 15.06.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 15.06.2022.