

Detection of phase and disorder of human movement based on signals of wearable devices

A. D. Kurdyukova, G. V. Kormakov, D. M. Tihonov, V. V. Strijov

kurdiukova.ad@phystech.edu; egor2898@mail.ru; tihonov.dm@phystech.edu;
strijov@ccas.ru

The paper deals with detection of phase and disorder of human movement based on signals of wearable devices. Several types of classes of periodic movement are investigated in this paper. Find the beginning and the end of the movement is needed, as well as determine the moment of changing the type of movement. For this purpose, the task of segmenting time series is solved. The phase trajectory of the motion is constructed and the actual dimension of the phase space is found. A model for estimating the phase of motion and determining the beginning of the segment is proposed. By repeating the phase trajectory, the periodic actions of a person are segmented, and by its disorder, a change in the type of movement is determined. The quality of the proposed model is analyzed on the time series collected from the three-axis accelerometer.

Ключевые слова: *time series, phase trajectory, trajectory space, segmentation, disorder, principal component analysis*

DOI:

Определение фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств

А. Д. Курдюкова, Г. В. Кормаков, Д. М. Тихонов, В. В. Стрижов

kurdiukova.ad@phystech.edu; egor2898@mail.ru; tihonov.dm@phystech.edu;
strijov@ccas.ru

Данная работа посвящена определению фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств. Исследуются классы периодического движения человека или животного нескольких типов. Требуется найти начало и конец движения, а также определить момент смены типа движения. С этой целью решается задача сегментирования временных рядов. Строится фазовая траектория движения и отыскивается фактическая размерность фазового пространства. Предлагается модель оценки фазы движения и определения начала сегмента. По повторению фазовой траектории сегментируются периодические действия человека, а по ее разладке определяется смена типа движения. Качество предлагаемой модели анализируется на временных рядах, считанных с трехосевого акселерометра.

Ключевые слова: *временные ряды, фазовая траектория, траекторное пространство, сегментация, разладка, метод главных компонент*

DOI:

1 Введение

Решается задача анализа данных, считываемых с носимых устройств. Результаты анализ этих данных используются в различных медицинских приложениях [1,2], в частности, при мониторинге состояния пациентов [3], для автоматизированного обнаружения падений пожилых людей [4].

Временной ряд $\{s_t\}_{t=1}^m$ движения человека или животного назовем *квазипериодическим* с периодом T , если

$$\exists \delta : s_t \approx s_{t+nT+\delta}, \quad |\delta| \ll T, \quad n \in \mathbb{N}, \quad t \in [0, +\infty) \quad (1)$$

Решается задача разбиения временных рядов на квазипериодические временные интервалы. Целью этой работы является построение модели

$$g(v) : t \rightarrow \varphi. \quad (2)$$

Предлагается *модель построения фазовой траектории*. Рассматривается способ получения оценки размерности *собственного пространства* фазовой траектории – траекторного

пространства минимальной размерности, при котором аппроксимирующая модель строит адекватное приближение ряда (1). *Критерий отсутствия самопересечений.* По повторению фазовой траектории сегментируются периодические действия человека. Предлагается способ извлечения устойчивой начальной фазы фиксированного типа движения в собственном пространстве его фазовой траектории.

В работе(ах) [5] [...] решается задача сегментация квазипериодических временных рядов. Совершается переход в собственное пространство фиксированной размерности, равной двум. Целью данной работы является переход в фазовое пространство минимальной размерности. *Фазовая траектория не имеет самопересечений с точностью до стандартного отклонения восстановленной траектории.*

2 Постановка задачи

Данные, считанные с трехосевого акселерометра, представляют собой временной ряд

$$\{x(i)\}_{i=1}^N. \quad (3)$$

Предполагается, что он соответствует фиксированному классу периодического движения $y \in \mathbb{Y}$: ходьба, бег, шаги вверх или вниз по лестнице.

2.1 Построение и анализ траекторного пространства

Временной ряд (3) представлен в виде разложения, каждое слагаемое которого с высокой точностью аппроксимируется комбинацией главных компонент траекторной матрицы

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} x(1) & \dots & x(n) \\ x(2) & \dots & x(k+1) \\ \dots & \dots & \dots \\ x(N-n+1) & \dots & x(N) \end{pmatrix}.$$

Для нахождения аппроксимации выполняется сингулярное разложение ковариационной матрицы \mathbf{H}

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad \mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_l).$$

после чего определяются главные компоненты $\mathbf{y}_k = \mathbf{H} \mathbf{v}_k$ для соответствующих собственных значений $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$.

Требуется, во-первых, построить модель f , аппроксимирующую фазовую траекторию с помощью минимального числа главных компонент. Каждая модель аппроксимирует временной ряд заданного класса y . Критерием оптимальной размерности является отсутствие самопересечений фазовой траектории с точностью до стандартного отклонения восстановленной траектории. Требуется, во-вторых, разбить фазовую траекторию на столько сегментов, сколько периодов содержится во временном ряде (3).

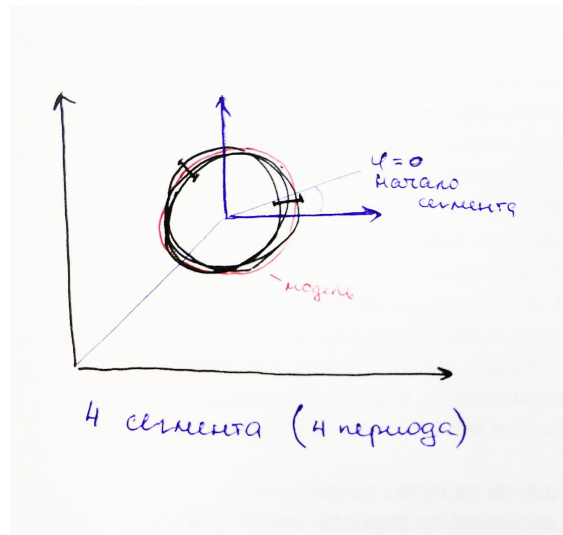


Рис. 1

2.2 Переход в собственное пространство фазовой траектории

Критерий качества модели. Пусть $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_p$ – выбранные главные компоненты, аппроксимирующие фазовую траекторию. Восстановленная часть траекторной матрицы $\hat{\mathbf{H}}$

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_1 + \dots + \mathbf{H}_p, \quad \mathbf{H}_j = \sqrt{\lambda_j} \mathbf{v}_j \mathbf{y}_j^T.$$

С помощью антидиагонального усреднения матрицы $\hat{\mathbf{H}}$ восстанавливается временной ряд (3). Критерием качества аппроксимации является MAPE, средняя абсолютная процентная ошибка

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 100 \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{|x_i|}.$$

Сложностью модели является размерность фазового пространства.

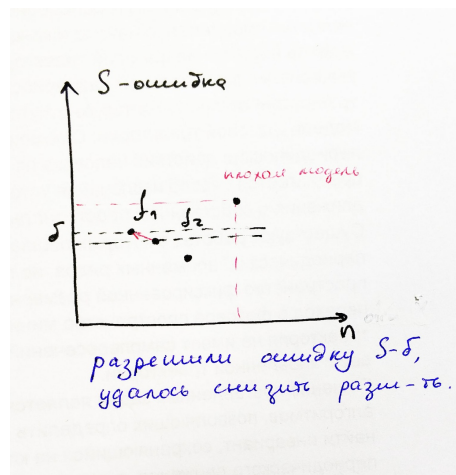


Рис. 2

2.3 Определение фазы с алгоритмом сегментации

Рассмотрим пример квазипериодического ряда, представленного на рис.1. Красными кружочками и звездочками обозначены концы полупериодов: i_t^+ и i_t^- . Величина периода изменяется со временем, а фазовая траектория плавно отклоняется от своей аппроксимации. Точки временного ряда, соответствующие концам полупериодов временного ряда, образуют кластер в собственном пространстве. Множества $I^+ = \{i_t^+\}_{t=1}^T$ и $I^- = \{i_t^-\}_{t=1}^T$ – кандидаты на искомое множество I точек сегментации временного ряда. Точки $x(i_t)$, $i_t \in I$ соответствуют разным значениям фазы, поэтому будем выбирать то множество, которое будет минимизировать эту разницу

$$I = \arg \min_{* \in \{+, -\}} \sum_{i_t^*, i_q^* \in I^*} \|(y_1(i_t^*), \dots, y_p(i_t^*)) - (y_1(i_q^*), \dots, y_p(i_q^*))\|.$$

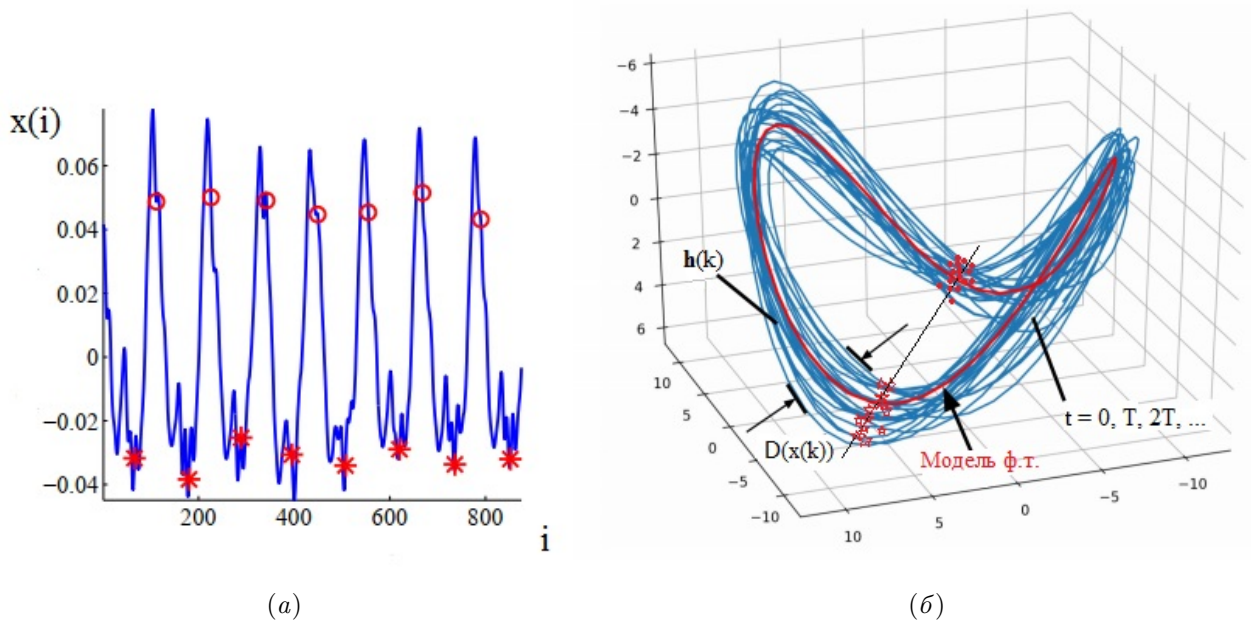


Рис. 3 Квазипериодический временной ряд и его фазовая траектория.

Выбранны главные компоненты y_1, \dots, y_p , аппроксимирующие фазовую траекторию. Будем полагать, что они нормированны. В собственном пространстве размерности p фазовая траектория не имеет самопересечений с точностью до среднеквадратичного отклонения. Будем рассекать фазовую траекторию гиперплоскостью, наиболее приближенной к плоскости симметрии фазовой траектории. Для нахождения плоскости симметрии воспользуемся методом, описанным в [6, 7]. Пусть $y_1 = 0$ совпадает с плоскостью симметрии. Для множества точек (y_1, \dots, y_p) вводит вспомогательный вектор $Y = [y_1^T, \dots, y_p^T]^T$. Тогда вектор Y_s , соответствующий симметричному множеству точек, минимизирующий

88 отклонение $\|Y_s - Y\|_2$, получается из Y посредством линейного преобразования

$$89 \quad Y_s = QY.$$

90 Тогда в качестве рассекающей гиперплоскости будем выбирать ту, которая минимизирует
91 отклонение

$$92 \quad \|\tilde{Y}_s - \tilde{Y}\|_2.$$

93 Вектор \tilde{Y} состоит из компонент вектора Y в системе координат, повернутой вокруг начала
94 отсчета таким образом, чтобы ось y_1 была совмещена с нормалью, задающей гиперплос-
95 кость.

96 **3 Сечение фазовой траектории в пространстве оптимальной размерности**

97 Требуется провести секущую гиперплоскость в собственном пространстве, разбиваю-
98 щую фазовую траекторию на сегменты, соответствующие полупериодам временного ряда
99 (3). Предлагаемый алгоритм является обобщением метода, предложенного в работе [5].
100 Сечение фазовой траектории происходит в пространстве размерности больше, чем два.

101 Выбирается произвольная точка $x(k_0)$ временного ряда (3). Ее фаза полагается равной
102 нулю. Пусть \mathbf{h}_0 – направляющий вектор из начала координат в выбранную точку на фазо-
103 вой траектории. Сроится касательная к фазовой траектории в выбранной точке. Пусть \mathbf{a} –
104 направляющий вектор касательной. Проводится гиперплоскость через выбранную точку
105 и начало координат (главные компоненты полагаем нормированными). По касательной
106 выбирается вектор нормали к гиперплоскости

$$107 \quad \mathbf{n} = \mathbf{a} - \pi_{\mathbf{h}_0}(\mathbf{a}).$$

108 Уравнение секущей гиперплоскости

$$109 \quad (\mathbf{y} - \mathbf{h}_0, \mathbf{n}) = 0.$$

110 Уравнение прямой с направляющим вектором \mathbf{h}_0 в параметрической форме

$$111 \quad \mathbf{y} = t\mathbf{h}_0, \quad t \in \mathbb{R}.$$

112 Точки пересечения фазовой траектории с гиперплоскостью наносятся на исходный вре-
113 менной ряд. Ожидается, что если пересечение произошло ближе, чем половина от макси-
114 мального размаха траектории, то точка имеет фазу, равную нулю. Если же пересечение
115 произошло дальше, чем половина от максимального размаха траектории, то ожидается
116 точка с фазой, равной π .

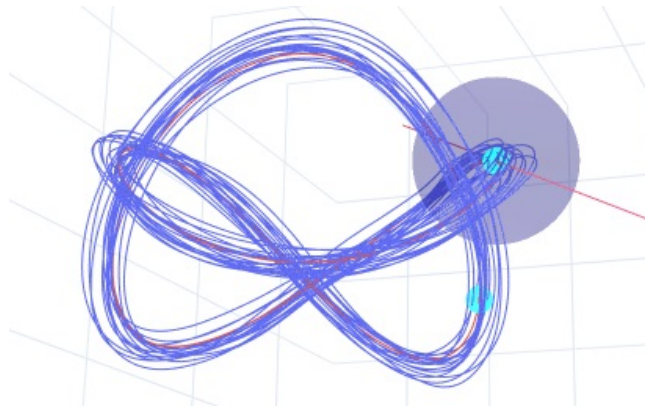


Рис. 4 Сечение фазовой траектории.

4 Вычислительный эксперимент

В этом разделе исследуется зависимость средней абсолютной ошибки МАРЕ от размерности фазового пространства, из которого происходит во восстановление временного ряда. В пространстве *оптимальной размерности* фазовая траектория разбивается на сегменты, соответствующие периодам рассматриваемого движения. Эксперименты проводятся на реальных данных, полученных с акселерометра мобильного устройства во время ходьбы. Соответствующий временной ряд изображен на рис. 1.

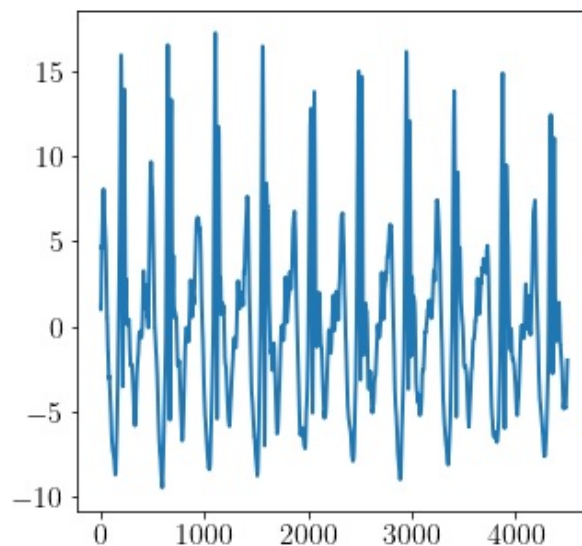


Рис. 5 Исследуемый временной ряд.

Разложение временного ряда с помощью метода главных компонент и его восстановление описано в работе [5]. Количество выбранных главных компонент определяет размерность фазового пространства. По соответствующим собственным векторам восстанавливается временной ряд. Анализ ошибки МАРЕ в зависимости от размерности фазового

пространства позволяет определить оптимальную размерность пространства, в котором фазовая траектория не имеет ярко выраженных самопересечений.

В качестве анализа качества сегментации предлагается рассмотреть стандартное отклонение сегментированных точек от точек исходного временного ряда, имеющих максимум автокорреляции при длине окна, равной длине периода движения. Также требуется, чтобы количество сегментированных точек совпадало с количеством периодов исходного временного ряда.

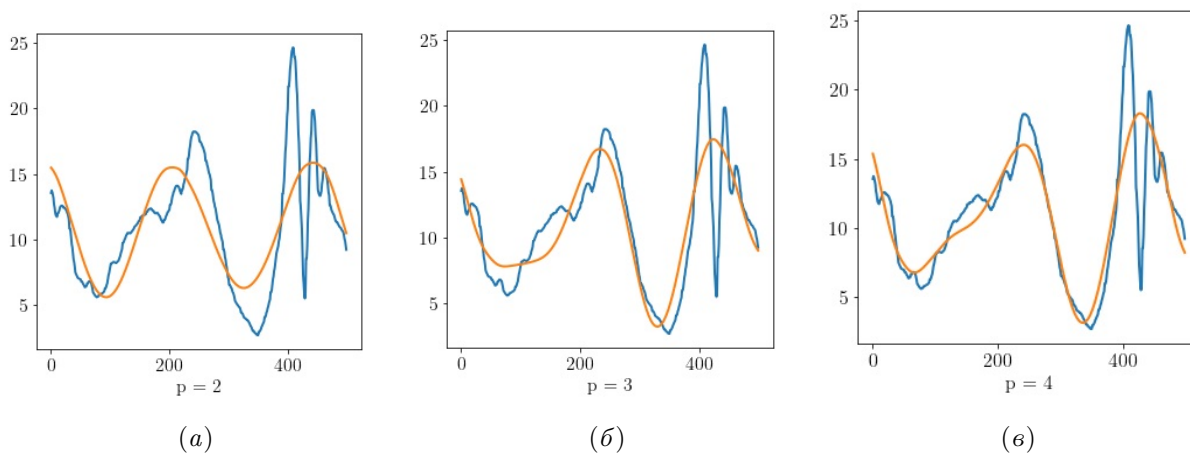


Рис. 6 Исходный временной ряд и его разложение для различных размерностей фазового пространства.

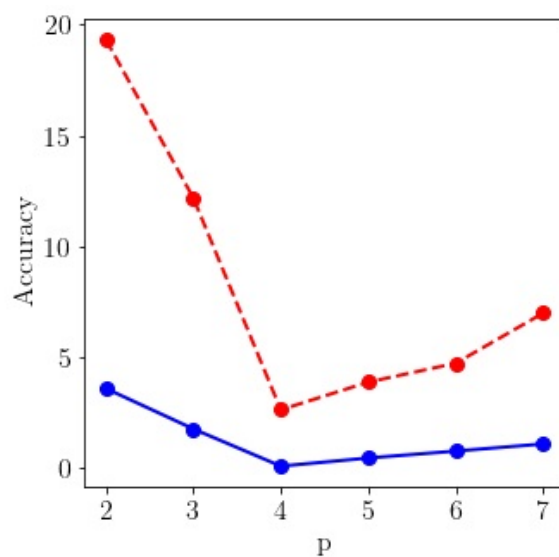


Рис. 7 График зависимости точности аппроксимации и количества самопересечений фазовой траектории от размерности фазового пространства.

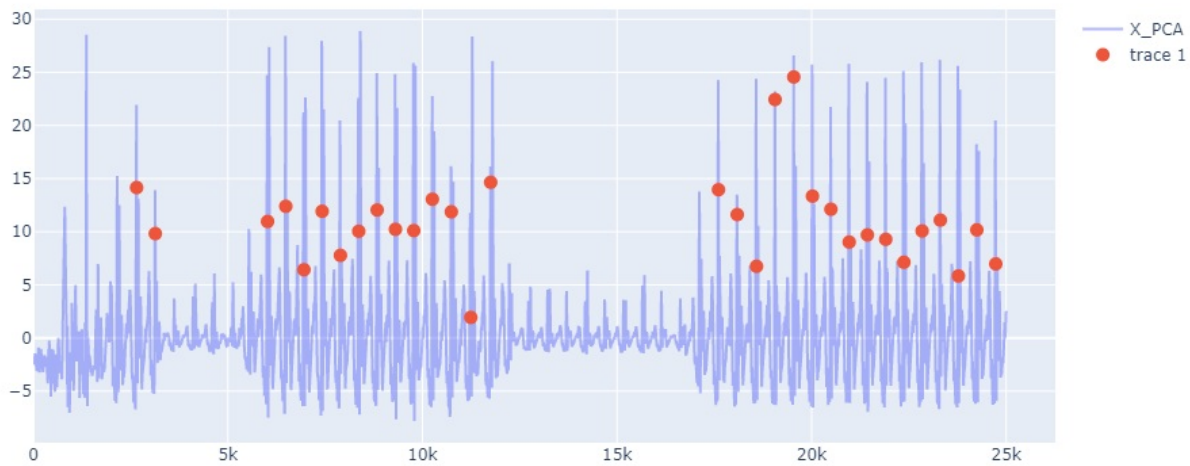


Рис. 8 Результат алгоритма сегментации.

5 Заключение

В данной работе был проведен вычислительный эксперимент по определению оптимальной размерности фазового пространства. Был предложен алгоритм поиска точек временного ряда одинаковой фазы, обобщающий идею, описанную в работе [5], на случай размерности большей, чем два. Проведено исследование качества сегментации в зависимости от размерности фазового пространства.

Решение поставленных задач является важным шагом на пути к разработке алгоритмов, позволяющих определить разладку движения по фазовой траектории, найти инвариант, сохраняющийся на классах эквивалентности конкретного типа периодического движения, а также распознать суперпозицию нескольких движений. Эти результаты крайне важны с точки зрения понимания и моделирования человека, биомедицинского применения и внесли бы значительный вклад в область анализа биосигналов.

Литература

- [1] JBJ Bussmann, YM Van de Laar, MP Neeleman, and HJ Stam. Ambulatory accelerometry to quantify motor behaviour in patients after failed back surgery: a validation study. *Pain*, 74(2-3):153–161, 1998.
- [2] Bijan Najafi, Kamiar Aminian, Anisoara Paraschiv-Ionescu, François Loew, Christophe J Bula, and Philippe Robert. Ambulatory system for human motion analysis using a kinematic sensor:

monitoring of daily physical activity in the elderly. *IEEE Transactions on biomedical Engineering*, 50(6):711–723, 2003.

[3] Agnes Grünerbl, Amir Muaremi, Venet Osmani, Gernot Bahle, Stefan Oehler, Gerhard Tröster, Oscar Mayora, Christian Haring, and Paul Lukowicz. Smartphone-based recognition of states and state changes in bipolar disorder patients. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(1):140–148, 2014.

[4] Xin Ma, Haibo Wang, Bingxia Xue, Mingang Zhou, Bing Ji, and Yibin Li. Depth-based human fall detection via shape features and improved extreme learning machine. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 18(6):1915–1922, 2014.

[5] Anastasia Motrenko and Vadim Strijov. Extracting fundamental periods to segment biomedical signals. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 20(6):1466–1476, 2015.

[6] AN Karkishchenko and VB Mnukhin. Recovery of points symmetry in images of objects with reflectional symmetry. *Machine Learning and Data Analysis*, 1(5):621–631, 2013.

[7] AN Karkishchenko and VB Mnukhin. Reflective symmetrization of feature points in images. In *11th Conference (International) on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013) Proceedings. Samara*, pages 209–212, 2013.

Поступила в редакцию