

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АРАМИДНЫХ ТОРСИОНОВ

А. Д. ПЕРЕЧЕСОВА¹, И. И. КАЛАПЫШИНА², Г. А. СОЛОВЬЕВА²

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения волн им. Н. В. Пушкова
Российской академии наук, 199034, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ymatem@rambler.ru

Представлен алгоритм распознавания изображений на основе метода сегментации с использованием преобразования Хафа. Данный алгоритм предназначен для разработки оптико-расчетного метода оценки физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропного торсиона на основе эксперимента по растяжению образцов. Арамидный торсион рассматривается как спирально-анизотропный стержень. Для исследований применяется высокоскоростная видеокамера CamRecord CR450×3 Opttronis. Компьютерная обработка изображений основана на алгоритмах компьютерного зрения, использование которых позволяет определить оси упругоэквивалентных элементов торсиона и их отклонения от главной оси. В результате работы алгоритма определяется угол наклона элементов и его изменение в процессе деформирования под действием продольной силы. Полученные значения используются при описании процесса деформирования спирально-анизотропных тел, в частности при оценке изменения модуля сдвига.

Ключевые слова: методы сегментации, преобразование Хафа, распознавание образов, микрофиламентные арамидные нити, спирально-анизотропный стержень, торсион, испытание на растяжение, высокоскоростная видеокамера

Прогресс в различных отраслях техники обуславливает повышение требований к измерительным приборам и датчикам. Основную функцию в таких приборах выполняют упругие элементы, используемые в различных целях: для обеспечения требуемого натяжения между деталями, для аккумуляции механической энергии, как элементы передачи движения, упругие опоры, амортизаторы и т.д. Особенно значима роль упругих элементов в измерительных приборах, когда непосредственно от них зависит способность чувствительного элемента реагировать на изменения измеряемой величины. В этих случаях точность и надежность работы прибора во многом определяется качеством упругого элемента. И хотя упругие элементы — это простые механические детали, и многие виды элементов известны и широко применяются в течение десятков лет, их рабочие характеристики часто не удовлетворяют современным требованиям, что тормозит создание приборов высоких классов точности. Указанные факторы обуславливают необходимость повышения качества упругих элементов, что, в свою очередь, требует постановки и решения ряда новых задач [1].

В настоящее время в Санкт-Петербургском филиале Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) упругий торсионный подвес магниточувствительного элемента (МЧЭ) магнитостатического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1 [2], изготавливается из трех микрофиламентов арамидных нитей диаметром 0,016 мм. Особенностью магнитостатического вариометра с таким МЧЭ является регистрация магнитных полей и их вариаций в диапазоне частот 0...15 Гц со среднеквадратическим уровнем

шумов, не превышающим $1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$. Данные торсионные подвесы обладают свойствами упругой анизотропии, и их использование при изготовлении МЧЭ приборов позволяет снизить модуль кручения (повысить чувствительность), повысить временную стабильность (уменьшить температурный дрейф нуля), повысить устойчивость к динамическим нагрузкам и к изменению климатических факторов [3—6].

Для усовершенствования торсионных приборов необходимым является знание таких физико-механических характеристик торсиона, как модуль упругости при растяжении, модуль кручения и модуль сдвига. Чувствительность измерительной системы в основном зависит от модулей кручения и сдвига. В классических случаях, когда материал образцов однороден и их размеры стандартизованы для современной испытательной техники, определение модулей кручения и сдвига представляется несложным. Однако при исследовании характеристик арамидных нитей стандартные решения не подходят.

Многослойные пружины, канаты, тросы, нити представляют собой объекты механики деформируемого твердого тела, которые моделируются как спирально-анизотропные стержни (САС). Для оценки физико-механических характеристик винтовых линий спирально-анизотропного стержня на основе эксперимента на растяжение образцов микрофиламентных арамидных нитей предлагается воспользоваться оптико-расчетным методом [7—9]. Используя оптический метод, можно получить необходимые данные для расчетов модулей кручения и сдвига торсиона при растяжении образца: а именно — зафиксировать зависимость изменения угла наклона винтовых линий относительно оси цилиндра, который применяется в качестве модели САС. Данные для таких исследований получают с помощью высокоскоростной видеокамеры. Так как объект имеет микронные размеры, видеосъемка ведется с использованием объектива микроскопа взамен традиционного микрообъектива. Позиционирование видеокамеры относительно объекта исследования осуществляется с помощью трехкоординатной управляемой платформы, разработанной для данного проекта [1].

Цель исследования — разработка алгоритма распознавания изображения на основе метода сегментации с использованием преобразования Хафа.

Объект исследования — упругий торсионный подвес, представляющий собой САС в виде косы. Плотность плетения — 7 узлов/мм. Огибающая поперечного сечения упругого торсионного подвеса представляет собой эллипс, большая ось которого равна 0,046 мм, а малая — 0,033 мм; рабочая длина подвеса — 100 мм. На рис. 1 приведены фотоизображения, полученные с помощью микроскопа Meiji Techno IM7200: *а* — один микрофиламент арамидных нитей; *б* — торсион в двух проекциях; *в* — нить с линейной плотностью 6,3 Текс ($6,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}$).

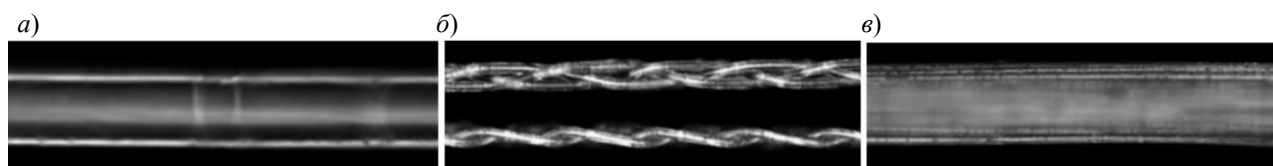


Рис. 1

Оптическое исследование структуры образцов торсионов производилось в лаборатории электронной микроскопии и физико-технологических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [4].

Экспериментальное определение физико-механических характеристик арамидных нитей проведено на кафедре мехатороники Университета ИТМО с помощью испытательной машины AGS500NX SHIMADZU (“Shimadzu Corporation”, Япония) — универсальной разрывной машины настольного типа для физико-механических испытаний различных материалов. Обработка данных произведена с помощью программного обеспечения для испытаний

материалов “TRAPEZIUM LITE X” (“Shimadzu Corporation”). Для проведения испытаний, с учетом малых размеров образцов, были спроектированы и изготовлены специальные захваты с диаметром кнехта менее 20 мм.

Для определения модуля сдвига используется экспериментально-аналитический метод, основу которого составляет видеофиксация с применением высокоскоростной видеокамеры CamRecord CR450×3 Optronis (“Optronis GmbH”, Германия), позволяющей производить съемку со скоростью до 10 000 кадров/с.

Отметим, что оборудование подобного класса используется во многих научных лабораториях для фиксации быстро протекающих процессов: при измерении модальных параметров кабеля в условиях свободной вибрации [10]; при высокоскоростных измерениях развития трещин [11]; при изучении влияния скорости деформации на динамические свойства материала, связанной с определением модуля Юнга и предела прочности [12]; при исследовании механизма и распространения повреждений в композиционных материалах [13, 14] и др.

Для обработки изображений и распознавания образов в ходе данных исследований написана программа на основе метода сегментации, который успешно используется в технологиях машинного зрения для решения различных задач [15, 16].

Учитывая геометрические параметры объекта исследования, было решено использовать специфические методы фото-видеосъемки, для чего были рассмотрены несколько вариантов организации видеорегистрации:

а) использование стандартного микрообъектива с байонетом Nikon F: AF-S DX Micro NIKKOR 40 мм f/2,8G, AF-S Micro NIKKOR 60 мм f/2.8G ED, AF Micro-Nikkor 60 мм f/2.8D или др.;

б) использование стандартного микрообъектива с объективом микроскопа, присоединенным через переходник;

в) использование схемы, содержащей объектив микроскопа и переходные устройства для соединения с байонетом Nikon F.

Вариант „а“ изначально не пригоден для запланированного исследования, так как вышперечисленные микрообъективы позволяют получить масштаб съемки 1:1, что, учитывая размеры торсиона (33×46 мкм), является недостаточным.

Схема „б“ достаточно хороша и практична в использовании, ее неоспоримое преимущество заключается в возможности автофокусировки, но данное преимущество нивелируется, так как камера CamRecord CR450×3 Optronis не имеет автофокуса. Существенный недостаток данного варианта заключается в увеличении аберраций из-за двойной оптической схемы.

Вариант „в“, по мнению авторов, наиболее предпочтителен — он позволяет проводить точную фокусировку за счет двухкоординатной платформы и избежать увеличения оптических искажений. Незначительные недостатки этого варианта — отсутствие регулирования диафрагмы, что возможно исправить посредством дополнительного освещения, и громоздкость схемы, что в лабораторных условиях не является актуальной проблемой.

На рис. 2 представлена выбранная (вариант „в“) оптико-механическая схема для видеосъемки торсионов [1, 17], где 1 — скоростная видеокамера, подключенная к компьютеру; 2 — управляемая платформа позиционирования для фокусировки при микросъемке; 3 — меха для микросъемки, предназначенные для увеличения рабочего отрезка камеры до 200 мм; 4 — переходное кольцо с байонета Nikon F на резьбу M42; 5 — механический адаптер с резьбой RMS и стандартной резьбой M42; 6 — объектив.

Алгоритм компьютерного зрения на основе преобразования Хафа предназначен для определения изменения угла наклона витков при растяжении нити. Исходными данными для этой задачи служат изображения, полученные высокоскоростной видеокамерой в процессе растяжения нити.

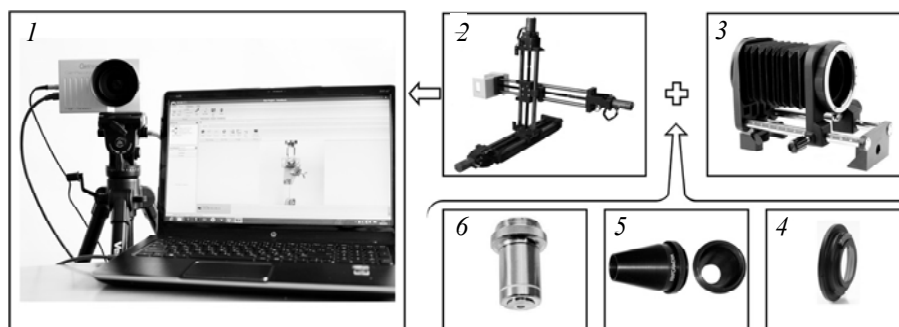


Рис. 2

Реализация алгоритма осуществляется следующим образом.

На первом этапе происходит загрузка изображения в память компьютера и его преобразование в формат “double”. Во время первичной обработки производится выделение на изображении области с лучшей освещенностью, бинаризация изображения по пороговому значению, определенному по гистограмме яркости, и изменение размера изображения. Цель этих операций заключается в изменении представления изображения, чтобы его было легче анализировать.

На втором этапе производится определение оси нити, которая в дальнейшем будет принята в качестве одного из векторов для нахождения угла наклона витка. Для определения оси нити применяется преобразование Хафа, которое является отображением пространства изображения в пространство параметров кривой и используется для выделения различных элементов изображения [18]. В данном случае преобразование Хафа применяется для детектирования прямой.

Следующим этапом является выделение на изображении витков нити для дальнейшего определения векторов этих витков. Для этой цели используется метод сегментации*. После проведения сегментации на изображении остаются только отдельные витки нити, для которых на основе преобразования Хафа детектируются прямые, представляющие собой собственные векторы витков нити.

На последнем этапе производится вычисление угла наклона витков. Угол наклона витков определяется как значение арккосинуса скалярного произведения нормализованных векторов витка и базы.

Результатом работы алгоритма является таблица, содержащая информацию по углу наклона каждого находящегося в кадре витка по каждому изображению в серии. На каждом отдельном изображении можно отобразить детектированные витки и рассчитанные углы.

Представленный алгоритм распознавания изображения на основе метода сегментации с использованием преобразования Хафа используется при разработке оптико-расчетного метода оценки физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропного торсиона на основе эксперимента на растяжение образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перечесова А. Д., Калапышина И. И., Куприянов Д. В., Ларионенко Г. С., Махмудова К. Д. Управляемая платформа позиционирования высокоскоростной видеокамеры для бесконтактного получения данных, используемых в расчетах параметров арамидных торсионов: Справочник // Инженерный журнал с приложением. 2016. № 3 (228). С. 49—54. DOI: 10.14489/hb.2016.03. 049—054.

* Алгоритмы компьютерного зрения, реализующие методы сегментации, были рассмотрены в предыдущих работах. Так, в статье [19] описана возможность применения метода поточечной сегментации изображения на основе текстурных признаков, полученных с помощью энергетических карт Лавса, для обнаружения дефектов на поверхности металлов. Другой метод, применяемый при работе с цифровыми изображениями, — метод сегментации изображения на основе порогового значения яркости [20, 21].

2. *Kopytenko Y. A., Sergushin P. A., Petrishchev M. S., Levanenko V. A., Zaytsev D. B.* Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 437 P. 621—624. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.437.621.
3. Пат. 2519888 РФ, МПК D07B3/00. Устройство для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов / *Ю. А. Копытенко, М. С. Петрищев, П. А. Сергушин, В. А. Леваненко, А. Д. Перечесова*. 20.06.2014. Бюл. № 17.
4. *Перечесова А. Д.* Анализ и синтез механизма для плетения торсионных подвесов приборов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2012.
5. *Kopytenko Y. A., Sergushin P. A., Petrishchev M. S., Levanenko V. A., Perechesova A. D.* Device for manufacturing torsion bars with helical anisotropy UISAT-1 // *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 437. P. 625—628. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.437.625.
6. *Perechosova A. D., Kalapyshina I. I., Nuzhdin K. A.* Kinematics and dynamics analysis of different mechanisms using the simmechanics/SIMULINK/MATLAB // *Proc. of the 26th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2014*. 2014. P. 128—135.
7. *Мусалимов В. М., Заморуев Г. Б., Перечесова А. Д.* Расчет физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропных стержней // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2012. Т. 55, № 6. С. 24—30.
8. *Perechesova A.* Calculation of elastic constants of the torsion bars with helical anisotropy using the methods of optimization theory // *Proc. of the 23rd Intern. Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Beijing, China, 2012. SM04—050.
9. Свид. о рег. № 2 2013616761. Программа „Парабола“ для расчета физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропного стержня / *Г. Б. Заморуев, В. М. Мусалимов, А. Д. Перечесова*. 18.07.2013.
10. *Sun W., He X.-Y., Huang Y.-P., Xu Z.-B., Liu W.-W.* Experimental study on identification of modal parameters of cable // *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*. 2008. Vol. 25, is. 6. P. 88—93.
11. *Jajam K., Tippur H.* A study of dynamic crack-inclusion interactions using digital image correlation and high-speed photography // *SEM Annual Conf. and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Albuquerque, NM, USA, 1—4 June 2009. 2009. Vol. 1. P. 390—396.
12. *Zhu D., Mobasher B., Rajan S. D.* Experimental study of dynamic behavior of kevlar 49 single yarn // *Conf. Proc. of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2011. Vol. 1. P. 147—152.
13. *Hlebová S., Ambriško L., Pešek L.* Strain measurement in local volume by non-contact videoextensometric technique on ultra high strength steels // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 586 P. 129—132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.586.129.
14. *Xu Z., Hao H., Li H. N.* Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres // *Materials and Design*. 2012. Vol. 42. P. 72—88. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.047.
15. *Duffner S., Odobez J.-M.* Leveraging colour segmentation for upper-body detection // *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47, is. 6. P. 2222—2230. DOI: 10.1016/j.patcog.2013.12.014.
16. *Dittmann M., Franke M., Temizer T., Hesch C.* Isogeometric analysis and thermomechanical mortar contact problems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014. Vol. 274. P. 192—212. DOI: 10.1016/j.cma.2014.02.012
17. *Перечесова А. Д., Калапышина И. И.* Выбор метода испытания на растяжение арамидных нитей // *Приборы: науч.-техн. журн. МНТО ПМ*. 2014. № 10, вып. 172. С. 28—33.
18. *Princen J. P., Illingworth J., Kittler J. V.* A formal definition of the hough transform: properties and relationships // *J. of Mathematical Imaging and Vision*. 1992. Vol. 1, N 1. P.153—168.
19. *Соловьева Г. А.* Применение метода текстурных карт Лавса для обнаружения поверхностных макродефектов // *Приволжский науч. вестник*. 2014. № 9 (37).
20. *Gonzalez R. C., Woods R. E.* Digital Image Processing. Prentice-Hall, 2002.
21. *Perechesova A. D., Soloveva G. A., Kalapyshina I. I.* Hough transform for the calculation of twist angle of aramid torsion // *WSCG 2015 — Poster Papers Proc*. 2015. P. 91—94.

Сведения об авторах

- Анна Дмитриевна Перечесова** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН; научный сотрудник; E-mail: perechesova@gmail.com
- Ирина Ивановна Калапышина** — Университет ИТМО; кафедра мехатроники; ст. преподаватель; E-mail: weir521@yandex.ru
- Галина Александровна Соловьева** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: ymatem@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники Университета ИТМО

Поступила в редакцию
05.04.16 г.

Ссылка для цитирования: Перечесова А. Д., Калапышина И. И., Соловьева Г. А. Метод определения физико-механических параметров арамидных торсионов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 645—650.

**METHOD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL PARAMETERS
OF ARAMID TORSIONS**

A. D. Perechesova¹, I. I. Kalapyshina², G. A. Solovieva²

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, 199034, St. Petersburg, Russia

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: ymatem@rambler.ru

An algorithm of image recognition based on segmentation method with the use of Hough transform is proposed. The algorithm is created for development of optical-design method of evaluation of physical-mechanical characteristics of helical elements of helically-anisotropic torsion bar on the basis of tensile test experiments. Aramid fiber torsion is considered as a spirally anisotropic rod. A high-speed video camera CamRecord CR450×3 Optronis is used in the study. Computer processing of images based on computer vision algorithms allows to determine the axes of elastically equivalent elements of the torsion and their deviation from the main axis. As a result of the algorithm angle of the elements inclination and variation of the angle in the process of deformation under the action of longitudinal force is determined. The obtained values are used for description of deformation process of spirally-anisotropic bodies, in particular when evaluating the changes of the shear modulus.

Keywords: segmentation method, Hough transform, image recognition, microfilament aramid fiber, spirally-anisotropic rod, torsion, tensile test experiment, high-speed camera

Data on authors

- Anna D. Perechesova** — PhD; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Scientist; E-mail: perechesova@gmail.com
- Irina I. Kalapyshina** — ITMO University; Department of Mechatronics; Senior Lecturer; E-mail: weir521@yandex.ru
- Galina A. Solovieva** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Mechatronics; E-mail: ymatem@rambler.ru

For citation: Perechesova A. D., Kalapyshina I. I., Solovieva G. A. Method for determination of physical-mechanical parameters of aramid torsions // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 8. P. 645—650 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-645-650