

### 0.1. Данилов М.Н. Алгоритм фильтрации векторных и тензорных полей для применения в программно-аппаратных комплексах двухэкспозиционной спекл-фотограмметрии

Оптико-телевизионные методы измерения полей относительных деформаций на поверхности твердых деформируемых тел [1, 2] в настоящее время находят широкое применение при экспериментальном изучении процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных конструкций [3, 4]. Лучшие результаты дают системы машинного стереозрения, позволяющие на основе автоматизированного анализа цифровых стереоизображений производить измерение перемещений точек криволинейной поверхности в 3D пространстве. Примером такой системы является система «Correlated Solutions VIC-3D». В основе подобных систем лежат алгоритмы корреляционного анализа изображений, вычисления оптического потока, а также алгоритмы идентификации параметров [5] математических моделей, описывающих проекцию точек в 3D пространстве на плоскость, а также алгоритмы фильтрации скалярных и векторных полей [6]. При этом основная часть данных, подлежащих обработке, имеет тензорную природу, т.е. представляют собой комбинацию нескольких составляющих (компонент тензора), каждая из которых несет определенную информацию о свойствах исследуемого явления или объекта. К подобным данным относятся векторные поля перемещений и тензорные поля механических деформаций (тензор ранга 2).

Разработано прикладное программное и алгоритмическое обеспечение системы двухэкспозиционной фотограмметрии для измерения полей перемещений и относительных деформаций. Программное и алгоритмическое обеспечение протестировано на доступных экспериментальных данных. Верификация выполнена путем сопоставления результатов, полученных с применением разработанного программного обеспечения, с результатами, получаемыми и помощью верифицированного коммерческого программного обеспечения «Correlated Solutions VIC-3D». Кроме того, результаты сопоставлены с данными, полученными методом электротензометрии в ходе эксперимента. Получено качественное и количественное совпадение результатов в пределах допустимой погрешности. Известной проблемой интерпретации результатов измерений, полученных с применением оптических датчиков перемещений и деформаций, является наличие шумовой составляющей сигнала измерительной системы, проявляющейся в виде «ряби» в изополях компонент векторов и тензоров, а также в виде осцилляций вблизи участков изображений, содержащих образ структурной неоднородности исследуемой конструкции или трещины.

Целью работы является совершенствование методов экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения конструкций из хрупких структурно-неоднородных материалов. Основной решаемой задачей было создание эффективного алгоритма фильтрации векторных и тензорных полей для применения в программно-аппаратных комплексах двухэкспозиционной спекл-фотограмметрии.

Предложен алгоритм фильтрации полей вектора перемещений и тензора деформаций, имеющий строго определенный физический смысл, так как в его основе лежит нелокальная теория упругости, сформулированная в работах Эрингена [7], и широко применяющаяся в методе перидинамики [8, 9], являющимся связующим звеном между методом молекулярной динамики и сеточными методами компьютерного моделирования нелинейной динамики сплошной среды. Работа алгоритма продемонстрирована на доступных экспериментальных данных в виде цифровых стереоизображений поверхности структурно-неоднородных конструкций с трещинами. Подтверждена высокая эффективность алгоритма.

#### Список литературы

- [1] SUTTON M. A., ORTEU J. J., SCHREIER H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications / New York: Springer, 2009. 332 p.
- [2] HELM J. D., MCNEILL S. R., SUTTON M. A. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement // Optical Engineering. 1996. Vol. 7. N. 35. P. 1911–1920.
- [3] ЛЮБУТИН П. С., ПАНИН С. В., ТИТКОВ В. В., ЕРЕМИН А. В., СЗНДЕР Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 88–109.
- [4] АДИЩЕВ В. В., КАРПОВ Е. В., ДЕМЕШКИН А. Г., КАРПИЦКАЯ Ю. Р., МАЛЬЦЕВ В. В., ИВАНОВ А. И. Применение оптической системы Correlated Solutions Vic 3D для построения диаграмм деформирования бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 8. С. 68–81.
- [5] ВОСКОВОЙНИКОВ Ю. Е. Устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации / Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. 180 с.
- [6] ВОСКОВОЙНИКОВ Ю. Е., БЕЛЯВЦЕВ В. Г. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры // Автометрия. 1998. № 3. С. 45–52.
- [7] ERINGEN A. C. Nonlocal Continuum Field Theories / New York: Springer, 2002. 376 p.
- [8] SILLING S. A., ASKARI E. A Meshfree Method Based on the Peridynamic Model of Solid Mechanics // Computers and Structures. 2005. Vol. 83. P. 1526–1535.
- [9] GERSTLE W., SAU N., SILLING S. Peridynamic Modeling of Concrete Structures // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237. P. 1250–1258.

