

МОНИТОРИНГ НА СТРУКТУРНОТО ЗДРАВЕ НА ИНЖЕНЕРНИ СЪОРЪЖЕНИЯ ЧРЕЗ ДИСТАНЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Васил Кавърджиков¹, Десислава Пашкулева¹, Георги Стоилов¹, Иван Николов²

¹Институт по механика – Българска академия на науките

²Физически факултет – Софийски университет „Св. Кл. Охридски”

e-mail: kavraj@imbm.bas.bg; dessip@imbm.bas.bg; gstoilov@imbm.bas.bg; ivandr2@phys.uni-sofia.bg

Ключови думи: Дистанционни изследвания, мониторинг на структурното здраве, цифров корелационен анализ на изображения

Резюме: В настоящата работа се разглеждат проблеми, свързани с мониторинга на структурния интегритет на големи инженерни конструкции. Интересът към тази научно-приложна тематика нараства с впечатляващо ускорение през последното десетилетие. Разработват се нови технологии за мониторинг чрез дистанционно и безконтактно регистриране с висока разделителна способност на цифрови изображения на големи строителни съоръжения и машини. Методът, основан на цифров корелационен анализ на изображения показва голям потенциал за приложения към обекти с различни размери, които могат да бъдат инспектирани от разстояния няколко метра, няколко десетки или стотици метри, до разстоянията, характерни за орбиталните апарати. В доклада са представени състоянието на съвременните технологии за дистанционно обследване и мониторинг на структурната цялост на инженерни съоръжения, опитът на авторите в създаването на софтуер за реализиране на цифров корелационен анализ с относително лесно достъпна екипировка, и са илюстрирани възможностите на метода чрез избрани резултати от проведени от тях експерименти.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES THROUGH REMOTE SENSING

Vasil Kavardzhikov¹, Dessislava Pashkouleva¹, Georgi Stoilov¹, Ivan Nikolov²

¹Institute of Mechanics – Bulgarian Academy of Sciences

²Sofia University, Faculty of Physics

e-mail: kavraj@imbm.bas.bg; dessip@imbm.bas.bg; gstoilov@imbm.bas.bg; ivandr2@phys.uni-sofia.bg

Keywords: Remote sensing, structural health monitoring, digital image correlation

Abstract: This paper addresses the problems associated with monitoring the structural integrity of large engineering structures. Interest in this topic of applied science has been growing with impressive acceleration over the last decade. There are developed new monitoring technologies implementing remote and noncontact capturing with high-resolution of digital images of large construction equipment and machines. The Digital Image Correlation method shows great potential for applications to objects of various sizes that can be inspected from distances of several meters, several tens or hundreds of meters, to distances typical of orbital apparatus. The report presents the state-of-the-art technologies for remote sensing and monitoring of the structural integrity of engineering facilities, the authors' experience in developing software to implement Digital Image Correlation with relatively readily available equipment, and illustrates the method's capabilities through selected results from their experiments.

Въведение

Мониторингът на структурното здраве на инженерни съоръжения (т. нар. Structural Health Monitoring - SHM) е мултидисциплинарна задача. През последните две десетилетия в областта SHM са разработени иновативни сензори и системи, основани на технологията за регистриране и цифрова обработка на изображения. Тази технология има присъщи

отличителни предимства. Тя е дистанционна, безконтактна, безразрушителна, осигурява висока точност на измерванията, устойчива е на електромагнитни смущения и може да бъде прилагана за мониторинг на инженерни съоръжения. Тя вече има множество приложения за наблюдение и измерване на двумерни и тримерни полета на преместване, деформации, усукване, вибрации, локализиране и следене развитието на пукнатини, и процеси на разрушаване на конструкции с различни размери [1–7]. Впечатляващият напредък в областта на оптиката, компютрите и методите за цифрова обработка на изображения, превърна SHM в авангардна научноизследователска област с голям потенциал за приложения в инженерната практика, свързани с периодична диагностика на актуалното състояние на инженерни обекти или на отговорни техни части. Това води до по-евтина поддръжка на сградите и съоръженията (писки текущи разходи) и подобрене на безопасността (навременни предупреждения за промени в конструкциите).

При периодично обследване на експлоатационното състояние на инженерни съоръжения, съществуват голям брой задачи за измерване на полета на премествания и деформации. Те не могат да бъдат решени с традиционните контактни методи и средства използващи тензодатчици, сензори с оптични влакна, ултразвукови сензори и др., независимо от това, че и те претърпяха развитие и напредък през новия век. Едно съществено неудобство на тези техники е свързано с трудности по тяхното монтиране върху обекта за мониторинг. Рутинно прилаганите средства за дистанционно измерване на премествания на инженерни съоръжения са геодезични уреди, като нивелири и теодолити [2]. Те имат своето безспорно място в строителното инженерство, но като правило тези уреди работят чрез проследяване движението на отделни маркери, нанесени върху повърхността на обследваната конструкция. Този подход прави трудно регистрирането на цялото поле на деформация на изследваната повърхност и автоматизирането на процеса на мониторинг.

Цифровият корелационен анализ на изображения (т. нар Digital image correlation - DIC) е оптична цифрова техника, която намира все повече приложения за SHM. DIC позволява на инженерите по експлоатация и поддръжка на строителните съоръжения и машини да наблюдават конструкциите дистанционно и с висока точност да бъдат открити, измервани и следени промени в полетата на преместване и деформация на техните повърхности. Една много успешна илюстрация на приложението на DIC метода за изследване на носимоспособността на големи архитектурни елементи, каквито са стоманобетонни рамки със зидария, подложени на статично и на динамично натоварване е представена в [3]. Тези експерименти са дали основание на авторите да мислят за бъдещо приложение на този метод при SHM на такива архитектурни елементи. Преглед на възможни приложения на DIC към решения на огромно разнообразие от проблеми, зададени от инженерната практика е направен в [4]. Подчертано е, че този метод е станал много подходящ и ефективен за наблюдение на големи строителни конструкции, включително измервания на отваряне на пукнатини в стоманобетонни елементи. Това е една от първите публикации, в които се лансира идеята за използване на безпилотни летателни апарати (дронове) за SHM в комбинация с DIC. Авторите на [5] са приложили модификация на цифровия корелационен анализ на изображения за количествена оценка и диагностика на вибрациите на портален кран в процеса на неговата работа. В [6] е осъществено дистанционно наблюдение на витлото на работещ вятърен генератор на електроенергия и чрез DIC е визуализирано и измерено тримерното поле на деформации в критична зона на този елемент.

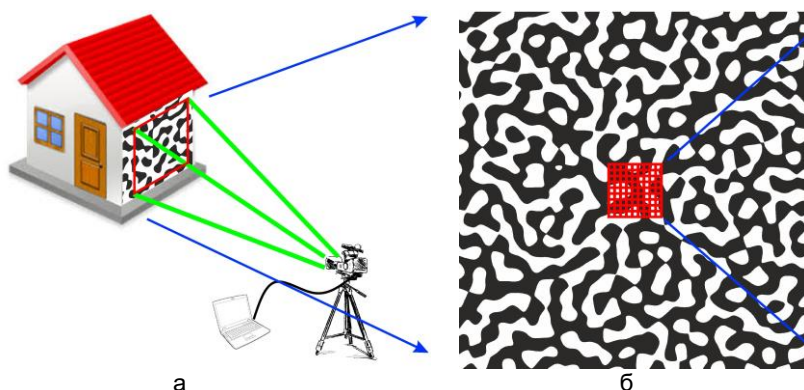
Обща концепция за комплексна, автоматизирана система за мониторинг на инженерни съоръжения е развита в [7]. Такъв мониторинг изисква измерване на полета на премествания и деформации на повърхности на обекти с различни размери и с различни нива на чувствителност и точност. Това предполага в общия случай да бъдат разглеждани три нива в зависимост от размерите на полетата на наблюдение: 1. Глобален сензор, чрез който се наблюдава цялата структура или поне една голяма част от такава конструкция; 2. Локален сензор, който се използва за определяне на полета на преместване в решаващи /критични/ зони на обекта поставен под наблюдение; 3. Прецизен сензор за измерване на поле на преместване в едно малко поле на наблюдение, но с микро- или нано-метрична точност. Прототип на такава система, работещ като глобален и локален сензор, е използван за изследване поведението на метален железопътен мост в процеса на неговата експлоатация.

Цитираните публикации убедително показват, основното предимство на технологията за регистриране и обработка на последователни във времето изображения на инспектираните повърхности на инженерни обекти – тя е дистанционна, безконтактна, безразрушителна и е доказано, че може да работи ефективно при полеви условия. Затова тази технология може в редица случаи да бъде една по-добра алтернатива на традиционните методи и средства за

измерване на премествания и деформации на инженерни съоръжения. Засега не ни е известно, тя да е била прилагана при мониторинг на наземни обекти от околоземната орбита.

Принцип на метода основан на цифровия корелационен анализ на изображения

Цифровият корелационен анализ на изображения [8] се основава на сравняването на двойки последователни изображения: първото (референтното) изображение е направено преди деформацията, а другото след деформацията на наблюдаваната повърхност. В някои публикации по темата, тази повърхност се нарича „зона на интерес“ (фиг. 1а). Референтното изображение се разделя на еднакви по размери „подгрупи“ – квадратни матрици от пиксели (фиг. 1б). Чрез числено решаване на корелационна задача за намиране на максимално съвпадение на интензитета на пикселите от всяка подгрупа от първото изображение с някоя от подгрупите на второто изображение, се намира тяхното съответствие. Количествена информация за преместването на точките, аташирани към геометричните центрове на съответните подгрупи се получава, като се определи броя пиксели между тях, калибрирани в единици за измерване на разстояние.



Фиг. 1. Регистриране на зона на интерес а) и разделянето на подгрупи б)

Императивна необходимост при реализирането на DIC метода е изображението на зоната от интерес да притежава такова разпределение на интензитета на всеки пиксел, че всяка от корелационните подобласти да се различава максимално от всички останали – т.е. да е уникална. При възникването на този метод през 70-те години на миналия век, това условие се изпълняваше, чрез равномерно осветяване на повърхностите, подложени на мониторинг с лазерна светлина. Върху изображението на изследваната повърхност, заснемано върху фотографски филм, се генерира т. нар. „лазерна петниста структура“. В периода на неговия генезис, този метод не беше пригоден за масови приложения поне по две причини: на практика беше трудно постижимо големи повърхности да бъдат осветявани равномерно с лазерна светлина и корелационният анализ на заснетите изображения беше трудоемък. Паралелно с това беше показано, че повърхностите на множество обектите, които биха представлявали интерес за мониторинг, имат структура, която задоволително удовлетворява условието за уникалност на нейните подобласти, когато са осветени например със слънчева светлина и са фотографирани с подходящо увеличение. През първите десетилетия на новия век се утвърди и влезе в масова употреба цифровия корелационен анализ на изображения. Това стана благодарение на качествения скок в развитието на цифровите детектори на изображения, работещи на практика в реално време при разделителна способност съпоставима с резолюцията на фотографските филми, както и в мощността и бързодействието на съвременните компютри. Въоръжени с тази съвременна екипировка, изследователите видяха възможност за числено генериране на структури с уникални свойства, които нанесени върху изследваните повърхности осигуряват висока точност и повтаряемост на измерванията чрез DIC. Класификация на спекъл структурите, оценка на качеството им от метрологична гледна точка и техниките за тяхното нанасяне върху повърхности, са представени в [8–11].

Експериментални изследвания и резултати

На този етап от нашата работа, свързана с приложения на DIC за мониторинг на инженерни обекти с относително големи размери, ние направихме изследвания на една метална и една дървена конструкция.

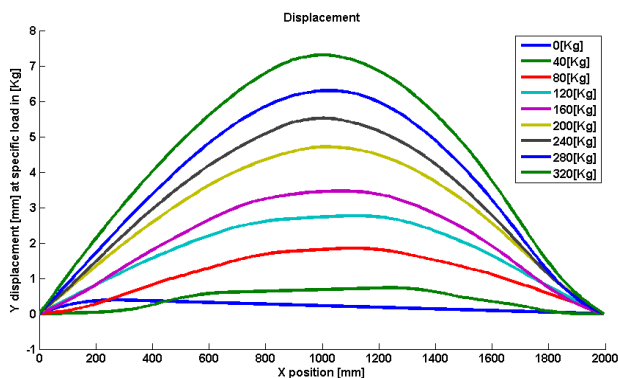
Експерименталната апаратура за реализация на DIC метода включва цифров фотоапарат с подходящ вариообектив и компютърен блок за корелационен анализ на изображението. Ние използваме цифров фотоапарат Sony Alpha a6000 с 24,3 мегапикселова CMOS матрица. Разработеният от нас софтуер за запис и обработка на данни е в среда Microsoft Visual C++". Също така, този софтуер управлява и работата на фотоапарата.

Методът, чрез който сме генерирали използваните от нас спекъл структури (фиг. 1) е подробно обяснен в предишни наши публикации [8, 11]. Тя е нанесена върху изследваната повърхност посредством офсетов печат.

При решаването на приложна задача, свързана с работата на група за оценяване на съответствие на строителни продукти „Мехатрол“ към Института по механика, изследвахме напрегнатото състояние на пътна ограничителна система на мостове, изработена от стомана (парапет за пешеходци) при статично натоварване (фиг. 2а). То се прилага хоризонтално към парапета, чрез винтов натоварващ механизъм, снабден с датчик за измерване на усилието, както е показано на фиг. 2а. Нарастването на товара става на осем стъпки до достигане максимум от 3,2 kN. След всяка стъпка се прави снимка на повърхността. Цифровата камера е фиксирана на разстояние 3 м от горната хоризонтална повърхност на парапета. Оптичната ос на камерата е перпендикулярна на наблюдаваната повърхност. На фиг. 2б са представени крайните резултати за преместванията на парапета по неговата дължина, в резултат на приложените хоризонтални натоварвания.



а



б

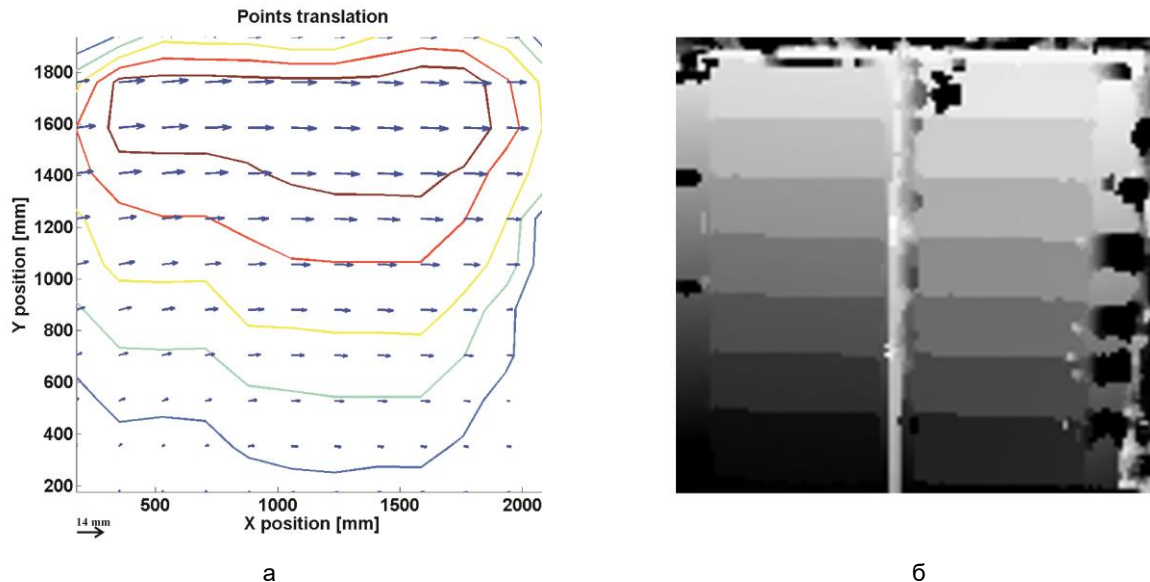
Фиг. 2. Схема на опитната установка при мониторинга на парапет за пешеходци а) и резултати от измерванията б)

При дървените стенни конструкции възникват следните проблеми, които могат да бъдат решени с метода, използващ корелационен анализ на изображения: измерване на хоризонтални или вертикални отклонения под действие на различни по характер натоварвания (въздействие от деформациите на земната основа върху подпорите, поддаване на фундамента, вятър и пр.). Талпено-стълбова стенна конструкция, която изследвахме (фиг. 3), беше подложена на квази-статичен натоварване при комбинация от вертикални и хоризонтални сили. Този експеримент е част от разработана методика за мониторинг на къщи строени в България през периода на Възраждането. Панелът е изградена в лабораторията на Строителния факултет към Университета по архитектура, строителство и геодезия.



Фиг. 3. Схема на опитната установка при мониторинга на талпено-стълбова стена

Към стената е приложен хоризонтално натоварване до нейната повреда и постоянно вертикално натоварване от 21 kN. Фиг. 4а показва полето на хоризонтално преместване в ХУ-равнината на наблюдаваната стена, непосредствено преди нейното разрушаване. На фиг. 4б е представена визуализация на полета на преместване и деформации на дървената стена. Движенията на отделните дъски, от които е изградена стената (те не са свързани помежду си) ясно се виждат, чрез различните тонове на сивото.



Фиг. 4. Поле на хоризонтално преместване на дървената конструкция:
а) векторна диаграма; б) диаграма в тонове на сивото

Заклучение

Системното получаване на информация за текущото състояние на структурния интегритет на големи инженерни конструкции е актуална мултидисциплинарна задача, решаването на която става все по-важно за съвременната цивилизация, характерна с нарастваща концентрация на хора на относително малка територия, каквито са мегаполисите и строителството на все по-мощни съоръжения и машини. Тези продукти на инженерната мисъл са подложени на амортизация в резултат от тяхната интензивна експлоатация, а също и на повреди от въздействието на природни климатични и сеизмични сили. Поради това, броят на публикациите, съответстващи на ключовата комбинация от думи “structural health monitoring” нараства с впечатляващо ускорение през последното десетилетие. Едновременно със засиления интерес към тази тематика, в множеството от тези публикации се обособи и бързо се развива научно-приложен клон, свързан с разработването и използването на методи и екипировка за дистанционен и безконтактен мониторинг на структурното здраве на инженерни съоръжения. Тези методи са свързани главно с получаването, регистрирането и обработката на изображения на обектите, поставени под наблюдение. Измежду тях – методът, основан на цифров корелационен анализ на изображения (DIC) показва най-голям потенциал за приложения към обекти с различни размери, които могат да бъдат инспектирани от разстояния няколко метра, няколко десетки или стотици метри, до разстоянията, характерни за орбиталните апарати. Очевидна е добрата перспектива за прилагането на DIC с използване на безпилотни летателни апарати (дронове) носещи цифрови камери.

В този доклад ние се опитахме да представим състоянието на съвременните технологии за дистанционно обследване и мониторинг на структурната цялост на инженерни съоръжения, нашия опит в създаването на софтуер за реализиране на DIC с относително лесно достъпна екипировка и илюстрирахме възможностите на метода чрез избрани резултати от проведени от нас експерименти.

Литература:

1. Ye, X.W., C. Z. Dong, T. Liu. A Review of machine vision-based structural health monitoring: methodologies and applications. *J. of Sensors*, 2016, article Nr. 7103039
2. Золотухин, Ю. Д. Испытание строительных конструкций. Минск, Высшая школа, 1983.
3. Ramos, T., A. Furtado, Sh. Eslami, S. Alves, H. Rodrigues, A. Arede, P. Tavares, P. Morena. 2D and 3D digital image correlation in civil engineering – measurements in a masonry wall. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 114, 215–222.
4. McCormick, N., J. Lord. Digital image correlation. *Materials today*, 2010, vol. 13, Nr. 12, 52–54.
5. Ri, S., T. Numayama, M. Saka, K. Nanbara, D. Kobayashi. Noncontact deflection distribution measurement for large-scale structures by advanced image processing technique. *Materials Transactions*, 2012, vol. 53, Nr. 2, 323–329.
6. Winstroth, J., L. Schoen, B. Ernst, J.R. Seume E. Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: a comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 524, article no. 012064
7. Malesa, M., D. Szczepanek, M. Kujawińska, A. Świercz, P. Kołakowski. Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique. *Proc. of the 14th International Conference of Experimental Mechanics*, EPJ Web of Conferences 6, 2010, Poitiers, France.
8. Stoilov, G., V. Kavardzhikov, D. Pashkouleva. A Comparative Study of Random Patterns for Digital Image Correlation. *J. of Theor. and Appl. Mechanics*, 2012, vol. 42, Nr. 2, 55–66.
9. Dong, D.Y.L., B. Pan. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 2017, vol. 57, Nr. 8, 1161–1181.
10. Chen, Z., C. Quan, F. Zhu, X. He. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation. *Measurement Science and Technology*, 2015, vol. 26, No. 9, article Nr. 095201.
11. Stoilov, G., V. Kavardzhikov. Multiscale monitoring of deformation fields by digital image correlation method. *J. of Theor. and Appl. Mechanics*, 2018, vol. 48, Nr. 2, 23–40.