

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - СММ2Deformation“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, редовни професор*
- *Милан Благојевић, истраживач-сарадник*
- *Александар Дишић, истраживач-сарадник*
- *Др Радован Славковић, редовни професор*

Наручилац техничког решења

- Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије
- ИЦ Инжењеринг, Крагујевац

Корисници техничког решења

- ИЦ Инжењеринг, Крагујевац
- Милановић Инжењеринг, Крагујевац

Година када је техничко решење урађено

- 2011-2012

Техничко решење прихватили-користе

- Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- ИЦ Инжењеринг, Крагујевац
- Милановић Инжењеринг, Крагујевац

Начин верификације резултата

- Резултати су верификовани поређењем са аналитичким и нумеричким решењима, резултатима добијеним другим софтверима за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења и тестирањем

Начин коришћења техничког решења

- Софтвер СММ2Deformation користи се у индустрији за одређивање деформација великих конструкција (регална складишта, уређај за профилисање цеви, каросерија аутомобила) на основу фотограметријских мерења, где конвенционалне методе мерења не могу ефикасно и/или успешно да се примене

Област технике на коју се техничко решење односи

- Метрологија, Рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење, софтвер CMM2Deformation, припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42). Софтвер се односи на одређивање поља деформација физичког објекта изложеног дејству оптерећења на основу серије мерења оптичком координатном мерном машином.

Мерење деформација има велики значај при верификацији понашања прототопова конструкција, као и испитивању конструкција у експлоатацији. Потпуна слика о деформацијама елемената конструкције добија се одређивањем величине три међусобно управне компоненте деформације (померања) изазваних променом оптерећења која делују на конструкцију.

Области примене оваквих система су: анализа деформација услед механичких и/или топлотних оптерећења, мерење деформација великих и/или комплексних објеката, код којих се конвенционалне методе мерења не могу применити (мостови, кранови, ...), анализа деформација квазистатичких стања (на пример квазистатички crash тест).

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Конвенционалне методе мерења статичких и квазистатичких деформација објеката заснивају се на постављању различитих типова давача (мерних трака и давача хода (индуктивних, капацитивних, потенциометарских, ...)) и прикључних каблова на мерни објекат и/или око њега. Ове методе захтевају и системе за мерење и аквизицију на које се повезују ови давачи. Мерење деформација овим методама захтева дуготрајне припреме објекта мерења, при чему време припреме зависи од броја мерних места.

Савремене оптичке координатне мерне машине, које имају и модуле за мерење деформација замењују конвенционалне системе. Ове машине су обично преносни мерни системи који прецизно и бесконтактно одређују положаје тачака под статичким или квазистатичким оптерећењима, а затим на основу ових мерења одређују деформације посматраних конструкција.

На тржишту постоје бројна комерцијална решења (Leica GeoMoS, Leica GPS Spider и FARO Photon 120) намењена мерењу деформација претежно великих објеката (броне, тунели, мостови, високе зграде и сл.). Постоје и решења намењена за одређивање деформација машинских конструкција (NIKON K-Series Optical CMM, TRITOP Deformation). У нашој земљи не постоји развијено решење (машина или софтвер) за мерење деформација.

Оптичке координатне мерне машине одређују деформације коришћењем посебно развијених софтверских модула. На пример, модул Deformation оптичког мерног система TRITOP је софтверска надоградња која кошта око 10 000€.

3. Суштина техничког решења

Развој високо прецизних оптичких инструмената омогућио је прецизно мерење положаја референтних маркера постављених на површину објекта. Референтни маркери се веома једноставно и брзо постављају на одабрана мерна места. Одређивање њиховог положаја у различитим конфигурацијама, код мерења статичких деформација, стиче се јасна представа о карактеру и величини деформације посматраног објекта.

На основу савремених научних сазнања развијен је домаћи софтвер који омогућава решавање нове класе проблема – мерење деформација коришћењем оптичке координатне мерне машине. Другим речима, у случајевима када су доступне неке од оптичких координатних мерних машина, развијени софтвер им даје додатну функционалност омогућавајући мерења деформација. Основни задатак софтвера CMM2Deformation је одређивање вредности деформације поређењем два облака тачака добијених мерењем оптичким координатним мерним машинама (CMM).

На Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу инсталиран је оптички мерни систем TRITOP [1-3], па је развијени софтвер прилагођен одређивању деформација овом

координатном мерном машином. Могуће је прилагођавање софтвера и за мерне машине осталих произвођача који за мерење користе фиксне маркере постављене на површину мерног објекта.

За истраживање и индустријску праксу посебно је значајан податак да је метод директно поредив са резултатима нумеричких прорачуна, на пример методом коначних елемената. Референтне тачке постављене на површину објекта мерења могуће је искоритити као чворове при моделирању конструкција методом коначних елемената. На тај начин добијају се потпуно компатибилни модели који се употребљавају за: (а) верификацију поља деформација добијених прорачуном методом коначних елемената и (б) идентификацију непознатих карактеристика материјала.

Развијени софтвер је на нивоу познатих светских софтвера за мерење деформација. Развијени софтвер ће бити присутан на домаћем и иностраном тржишту софтвера и моћи ће успешно да се примењује у решавању практичних проблема у индустрији, као и у научноистраживачком раду и настави на техничким факултетима у земљи и иностранству. Развијени софтвер је једноставан за употребу и подржан пратећом документацијом, одржавањем и обуком. Упутство за примену софтвера урађено је по узору на упутства водећих светских произвођача.

4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

Развоју софтвера SMM2Deformation за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења, претходила је детаљна анализа теоријских поставки проблема, као и анализа могућности постојећих софтверских решења. Софтвер је намењен за анализу деформација изазваних статичким и квазистатичким оптерећењима.

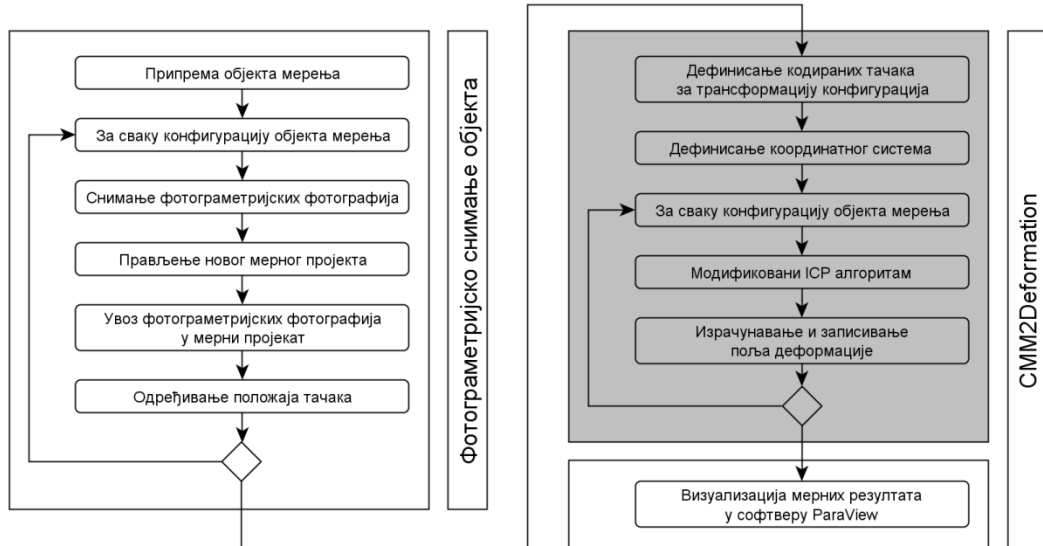
Овде под деформацијом подразумевамо поље померања које представља разлику положаја тачака у деформисаној и недеформисаној конфигурацији [4]. Под конфигурацијом подразумевамо скуп положаја свих тачака тела у неком тренутку времена. Конфигурација у временском тренутку $t = 0$ назива се референтна (недеформисана) конфигурација $\kappa_0(B)$, док се конфигурација коју тело заузима у посматраном тренутку времена назива се текућа (деформисана) конфигурација $\kappa_t(B)$. Деформацију изазивају спољашња оптерећења (концентрисане, површинске и запреминске силе (гравитација или електромагнетне силе)), или температурске промене унутар тела.

Мерење положаја тачака оптичким мерним методама заснива се на употреби референтних мерних тачака [4, 5]. Референтне тачке су самолепљиви или магнетни мерни маркери који се наносе на површину објекта мерења. Имају дефинисану геометрију и висок ниво контраста (бео круг на црној позадини). Разликујемо кодирание и некодирание референтне тачке. Кодирание референтне тачке имају дефинисан кружни бар код, тако да систем може једнозначно идентификовати референтну тачку у различитим конфигурацијама објекта мерења. Одабир мерних места у којима се одређују деформације врши се постављањем некодираних референтних тачака. Оваква припрема објекта за задатке мерења деформација је вишеструко бржа и омогућава већи број мерних места у односу на конвенционалне методе [6, 7].

Фотограметријско мерење деформација поред развијеног софтвера захтева методологију за вршење мерења сваке од конфигурација. Целокупан процес одређивања деформација, укључујући методологију снимања конфигурација и рад са развијеним софтвером, састоји се од следећих корака (слика 1) [6, 7]:

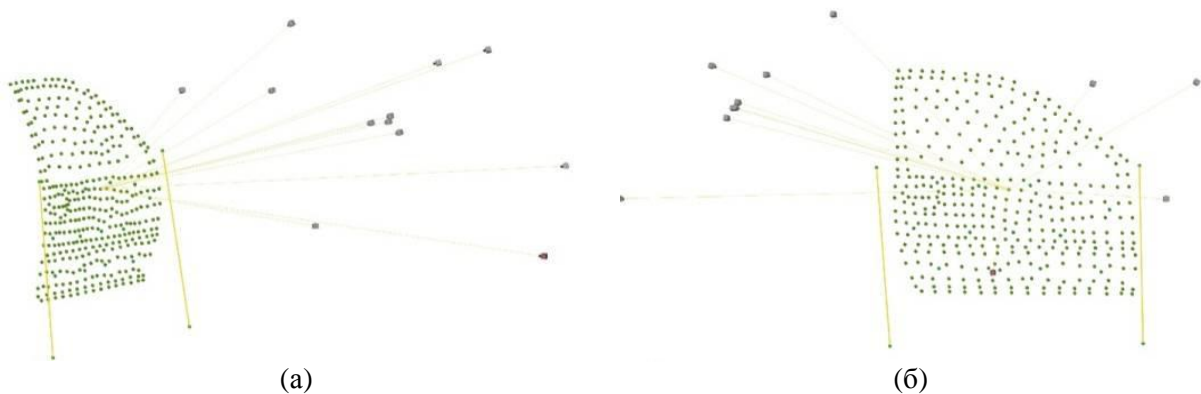
1. Припрема објекта мерења,
2. Фотограметријско снимање свих посматраних конфигурација, у оквиру кога имамо следеће кораке:
 - 2.1. Снимање фотограметријских фотографија,
 - 2.2. Прављење новог мерног пројекта,
 - 2.3. Увоз фотограметријских фотографија у пројекат,
 - 2.4. Израчунавање положаја тачака,

3. Дефинисање кодираних тачака за трансформацију деформисане конфигурације у координатни систем референтне конфигурације,
4. Дефинисање кодираних тачака за трансформацију конфигурација,
5. Дефинисање координатног система,
6. Одређивање поља деформација/померања,
7. Визуализација и анализа мерних резултата, и генерисање мерног извештаја.



Слика 1: Алгоритам за одређивање деформација софтвером CMM2Deformation

Свака конфигурација у деформацијском пројекту је независан мерни пројекат. Пре фотограмметријског мерења, потребно је правилно припремити објекат мерења. За деформацијски пројекат потребно је најмање 5 кодираних референтних тачака за трансформацију, постављених на местима са занемаривом деформацијом, као и некодиране референтне тачке постављене на местима где је потребно одредити деформацију. Након тога приступа се снимању фотограмметријских фотографија. Приликом фотограмметријског мерења сваке конфигурације треба снимити скуп калибрационих фотографија (прве четири фотографије), а затим и извесан број мерних фотографија. Реконструкција положаја камере током фотограмметријског снимања приказана је на слици 2. Када су снимљене потребне мерне фотографије за сваку од посматраних конфигурација, креира се нов мерни пројекат у који се учитавају мерне фотографије, на основу којих систем одређује положаје снимљених референтних тачака. Фотограмметријским снимањем конфигурација тела изложених различитим спољашњим оптерећењима добијају се облаци тачака који прецизно описују површину објекта мерења. Добијени облаци тачака се налазе у различитим координатним системима, па је потребно трансформисати посматрану конфигурацију у координатни систем референтне конфигурације на основу скупа кодираних референтних тачака.



Слика 2: Положаја камера током фотограмметријског снимања врата аутомобила

У софтвер CMM2Deformation, за сваку конфигурацију добијену мерењем координатном мерном машином, учитава се датотека која број тачке (ID) и координате тачака. Конфигурацију тела из мерног пројекта треба извести као **stage_i.ref** датотеку, где је i означава број посматране конфигурације, при чему i има вредности од 1 до укупног броја снимљених конфигурација [6, 7]. При извожењу облака тачака треба водити рачуна да су одабране све неопходне референтне тачке (кодирание и некодирание). Овај поступак се понавља за сваку од посматраних конфигурација мерног објекта.

Управљање софтвером врши се преко конфигурационе датотеке [7]. У њој се наводи број посматраних конфигурација тела, број референтне конфигурације, бројеви кодираних референтних тачака преко којих се обавља трансформација конфигурација и остали параметри везани имплементирани алгоритам.

Да би одредио деформације објекта мерења, софтвер CMM2Deformation извршава следеће процедуре [6, 7]:

- Идентификацију одговарајућих парова кодираних референтних тачака у свакој снимљеној конфигурацији,
- Трансформацију референтне конфигурације у задати координатни систем,
- У петљи по снимљеним конфигурацијама:
 - Трансформацију свих конфигурација у координатни систем референтне,
 - Идентификацију одговарајућих парова некодираних референтних тачака у свакој снимљеној конфигурацији,
 - Израчунавање поља деформације, и
 - Записивање резултата.

Нумерација кодираних референтних тачака је једнозначна, јер су ове тачке означене бар кодом [8]. У свакој снимљеној конфигурацији посматрана кодирана тачка има увек исти број. Насупрот томе, нумерација некодираних тачака није једнозначна. Код објеката мерења великих габарита постоји могућност да у појединим конфигурацијама нису реконструисани положаји свих тачака. Због тога софтвер на основу листе кодираних референтних тачака за трансформацију, задате у конфигурационој датотеци, претражује да ли су тачке идентификоване и одређује да ли је трансформација конфигурација могућа. Да би се једна конфигурација трансформисала у координатни систем друге, потребне су најмање три кодирание референтне тачке. Већа тачност постиже се узимањем већег броја тачака.

У неким гранама индустрије дефинисан је координатни систем у коме треба да буде извршено мерење. На пример, у аутомобилској индустрији, координатни почетак се налази у средини предње осовине, подужна x оса је усмерена према задњем крају аутомобила, y оса има правац предње осовине и усмерена је према десној страни возила, док је z оса управна на раван xy и усмерена на горе. У вагонској индустрији такође је прецизно дефинисан координатни систем. У мањим мерним пројектима користе се кориснички дефинисани координатни системи. На основу кодираних референтних тачака које су предвиђене за дефинисање координатног система врши се трансформација референтне конфигурације у задати координатни систем. Након тога, све конфигурације трансформишу се у координатни систем референтне конфигурације.

Задатак се своди на то да један скуп тачака, такозвани облак тачака, трансформишемо у координатни систем другог скупа тачака, постављајући га тако да се одређене тачке преклапају што је могуће боље (*best-fit*). Критеријум доброг преклапања је да збир квадрата растојања између одабраног подскупа кодираних референтних тачака у текућој и референтној конфигурацији буде минималан.

Посматрамо 2 скупа тачака $N, D \subseteq R^d$, где скупови N и D садрже само кодирание референтне тачке у недеформисаној и деформисаној конфигурацији. Задатак се своди на проналажење функције $\mu: D \rightarrow N$, која минимизира квадратни корен средње вредности растојања (*RMSD*) између скупова тачака N и D . Потребно је минимизирати следећу функцију:

$$RMSD(D, N, \mu) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x \in D} \|x - \mu(x)\|^2}, \quad (1)$$

Овде је n број кодираних референтних тачака које представљају пресек скупова N и D , док су x координате тачака које припадају скупу D .

Трансформација тачака врши се као трансформација крутог тела, па се проблем своди на то да нађемо оптималне матрице транслације и ротације. Укључујући транслацију и ротацију у претходни израз, треба да нађемо:

$$\min_{\mu: D \rightarrow N, t \in R^d, R \in SO(d)} \sum_{x \in D} \|R\mathbf{x} - \mathbf{t} - \mu(\mathbf{x})\|^2, \quad (2)$$

где је \mathbf{R} матрица ротације, \mathbf{t} је вектор транслације, а $SO(d)$ је скуп специјалних ортогоналних матрица димензије d . За извршење овог задатка користи се итеративни Iterative Closest Point (ICP) алгоритам, који се састоји од следећих корака:

- 1) Иницијализација матрица: $\mathbf{R} = \mathbf{I}$, $\mathbf{t} = \mathbf{0}$,
- 2) За дато \mathbf{R} и \mathbf{t} одреди оптимално μ израчунавањем $\min_{\mu} RMSD(D, N, \mu)$,
- 3) За дато μ одреди оптимално \mathbf{R} и \mathbf{t} израчунавањем $\min_{R, t} RMSD(RD - t, N, \mu)$,
- 4) Скок на корак 2, све док μ престане да се мења.

Алгоритам тражи минимум $RMSD$, наизменичним понављањем корака за одређивање преклапања (2) и корака трансформације (3). У кораку за одређивање преклапања, за дату транслацију и ротацију, одређује се оптимално преклапање минимизирањем функције $RMSD$. У кораку трансформације, рачунају се оптимална транслација и ротација. Скуп тачака преко којих се рачуна трансформација облака тачака је познат, јер су то кодирани референтне тачке. Због тога софтвер прави само једну итерацију у којој одређује матрице транслације и ротације. Коришћењем добијених матрица, коригују се координате некодираних референтних тачака у текућој конфигурацији.

Када су конфигурације трансформисане, врши се идентификација парова некодираних тачака у недеформисаној и деформисаној конфигурацији. Одређивање вредности деформација врши се одузимањем одговарајућих координата некодираних референтних тачака, јер је деформација у посматраној тачки релативни положај тачке у деформисаној у односу на положај у недеформисаној конфигурацији.

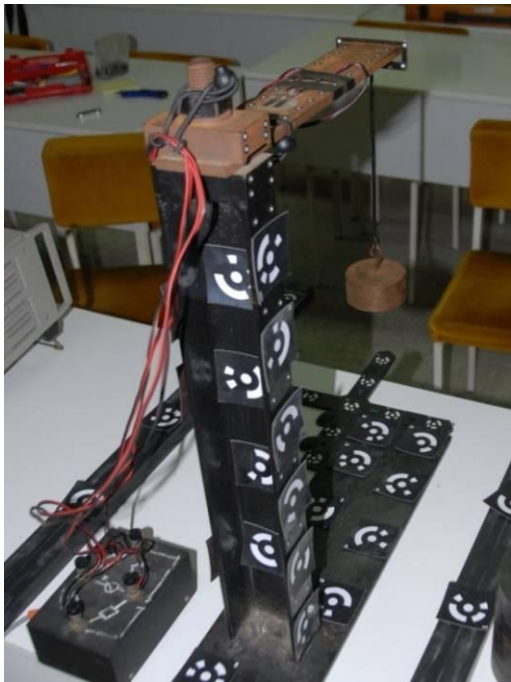
Визуализација деформација врши се у софтверу ParaView [9]. ParaView је софтвер отвореног кода за анализу и визуализацију великих скупова података, који подржава рад са више процесора на великом броју архитектура. Овај софтвер пружа изузетне могућности визуализације деформација, а комуникација између софтвера CMM2Deformation и ParaView је остварена преко датотека **stage_i.vtk**, које представљају деформацију i -те конфигурације у односу на референтну [6, 7].

Пример 1 – Верификација мерне методе поређењем израчунате деформације са аналитичким и решењем МКЕ. Верификација мерне методе извршена је поређењем мерних резултата са аналитичким решењем и прорачуном методом коначних елемената на примеру савијања конзоле правоугаоног попречног пресека под дејством силе (слика 3) [9-11].

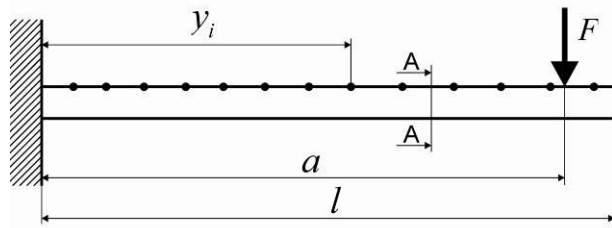
Аналитичко решење одређено је на основу једначине еластичне линије конзоле:

$$z = \frac{F l^3}{6 \mathbf{B}} \left\{ \left[3 \frac{a}{l} \left(\frac{y_i}{l} \right)^2 - \left(\frac{y_i}{l} \right)^3 \right] + \left(\frac{y_i - a}{l} \right)^3 \right\}, \quad (3)$$

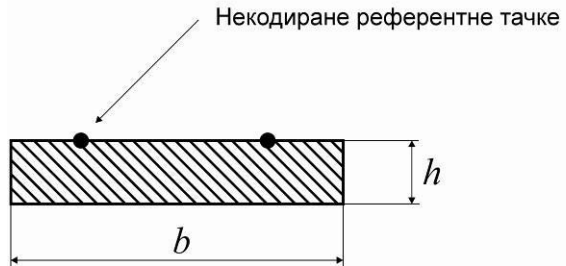
где је F примењена сила, \mathbf{B} савојна крутост, a је растојање од укљештења на коме делује концентрисана сила, l је укупна дужина узорка, y_i је у координата посматране референтне тачке. Све дужине су одређене директним фотограметријским мерењем посматраног узорка. Вредности угиба одређене су на местима постављених референтних некодираних тачака, чије су координате y_i одређене оптичким координатним мерењем. Оптерећивање узорка вршено је тековима од 1kg (случај 1), 2kg (случај 2), 3kg (случај 3), и 10kg (случај 4).



(a)



Пресек А-А



Некодирани референтне тачке

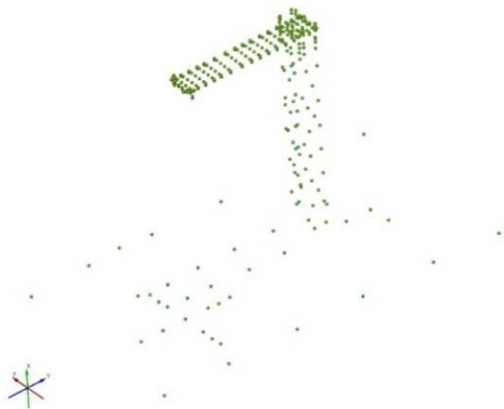
(b)

Слика 3: Експериментални узорак:

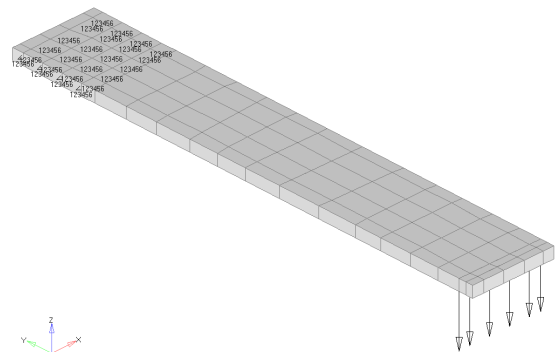
- (a) Конзола правоугаоног попречног пресека са постављеним референтним тачкама и
 (б) схема узорка са карактеристичним димензијама

Нумерички модел формиран је на основу референтних тачака снимљених у недеформисаној конфигурацији (слика 4a). Софтвер може да запише датотеку у формату Femap Neutral (*.neu) која садржи чворове модела коначних елемената на местима која на физичком моделу одговарају залепљеним некодираним референтним тачкама. На овај начин, целокупна геометрија физичког узорка је реално пренета у прорачунски модел (слика 4a), па резултати прорачуна могу директно да се пореде са мерењем и аналитичким решењем.

На слици 5a приказано је поље деформације конзоле оптерећене силом од 9.81N (1kg), док је на слици 5b приказана T3 трансформација за исти случај оптерећења одређена методом коначних елемената. На слици 6 дат је упоредни приказ експерименталних, аналитичких у нумеричких резултата. Слагање ових резултата је веома добро, а одступања која се јављају мања су од декларисане тачности коришћене мерне машине.



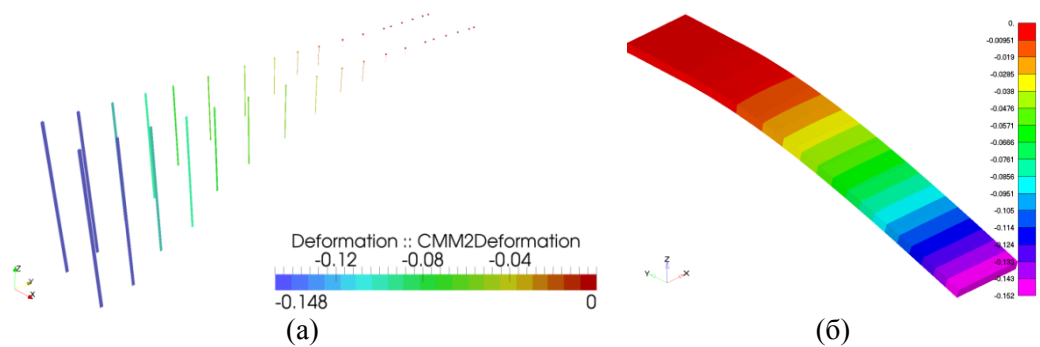
(a)



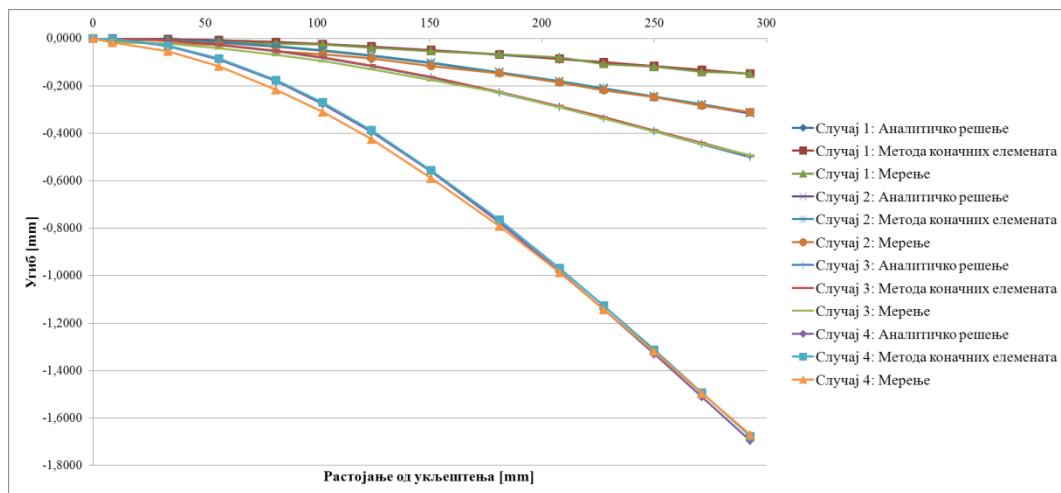
(б)

Слика 4: Креирање нумеричког модела:

- (a) облак тачака који одговара недеформисаној конфигурацији и
 (б) модел коначних елемената

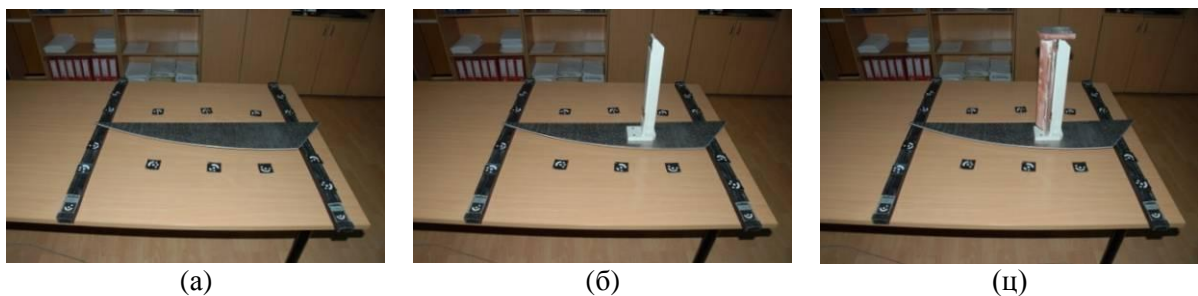


Слика 5: Поље померања за случај конзоле оптерећене тегом од 1кг:
(а) CMM2Deformaion и (б) МКЕ



Слика 6: Упоредни приказ резултата (аналитичко решење, МКЕ, мерење)

Пример 2 – Верификација мерне методе поређењем поља деформације одређено софтверима CMM2Deformation и TRITOP Deformation. Резултати добијени софтвером CMM2Deformation поређени су са резултатима добијеним модулом TRITOP Deformation [4]. Извршено је фотограметријско мерење неоптерећеног модела (слика 7а), модела оптерећеног силом F (слика 7б) и модела оптерећеног силом $2F$ (слика 7ц). Овај модел може да се посматра као греда променљивог попречног пресека. Оптеређивање модела извршено је постављањем два идентична машинска дела.

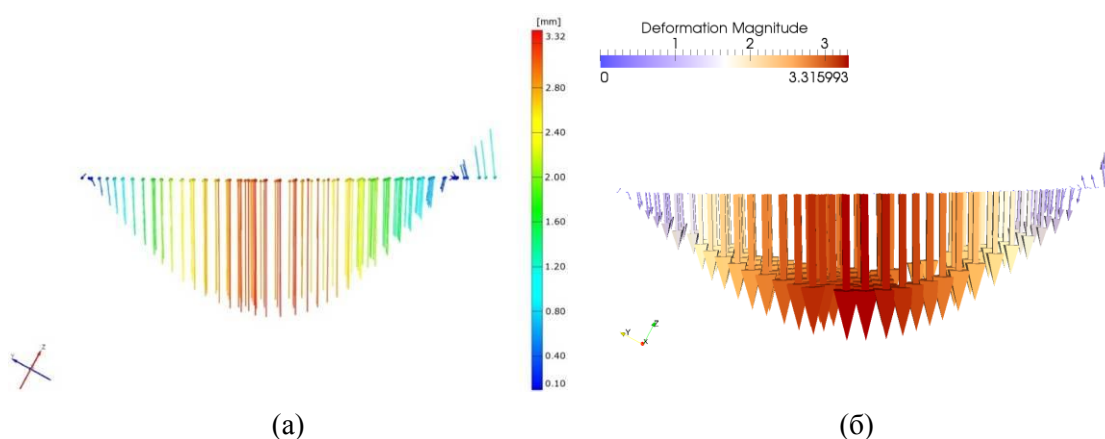


Слика 7: Експериментални модел:
(а) неоптерећен, (б) оптерећен силом F , (ц) оптерећен силом $2F$

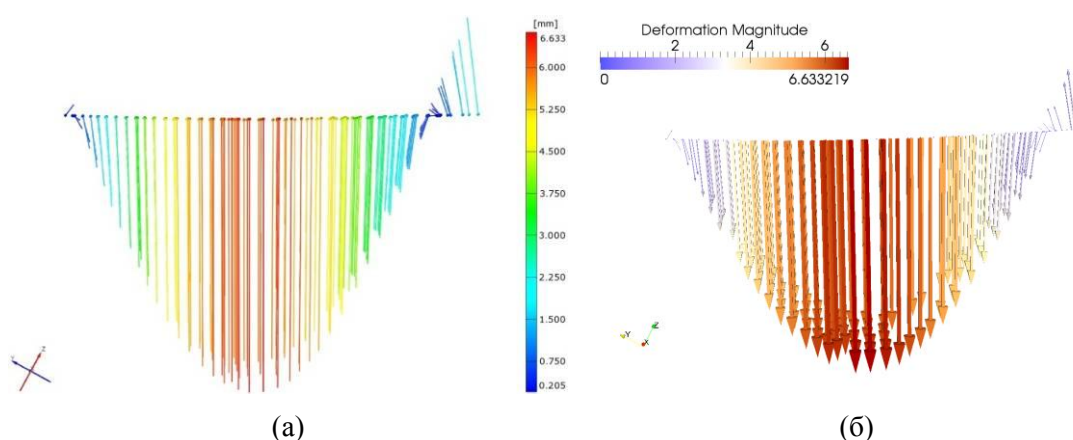
На основу фотограметријских снимака модела извршена је реконструкција положаја референтних тачака, а затим је одређивање поља деформација извршено је одређено модулом TRITOP Deformation и софтвером CMM2Deformation.

На слици 8а приказан је резултат добијен модулом TRITOP Deformation, а на слици 8б резултат одређен софтвером CMM2Deformation за случај оптерећења F . На слици 9а приказан је резултат добијен модулом TRITOP Deformation, а на слици 9б резултат одређен софтвером

CMM2Deformation за случај оптерећења $2F$. Слагање мерних резултата у оба посматрана случаја је веома добро.

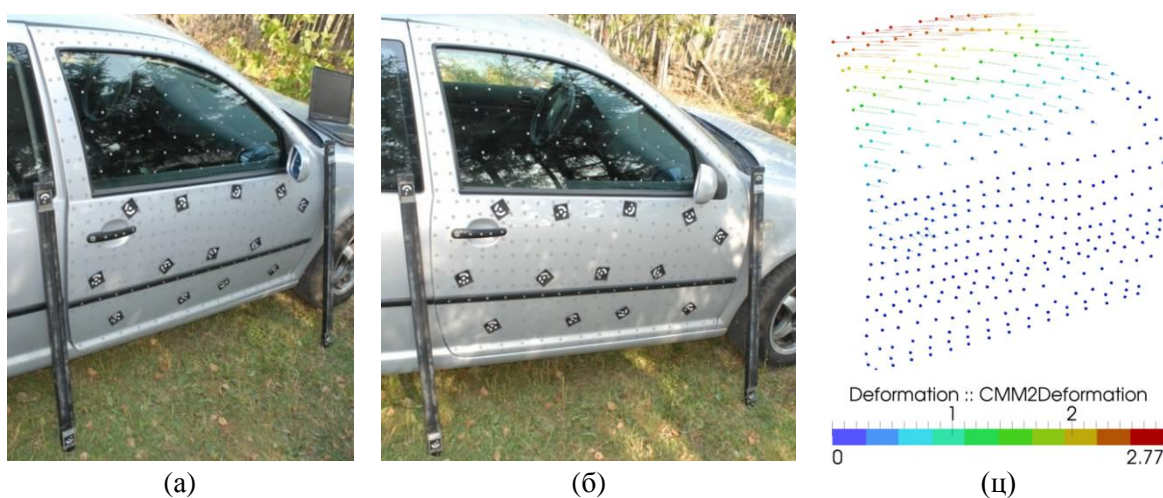


Слика 8: Деформација конфигурације оптереће силем F у односу на референтну конфигурацију



Слика 9: Деформација конфигурације оптереће силем $2F$ у односу на референтну конфигурацију

Пример 3 - Деформација десних врата аутомобила. Деформисање врата аутомобила одређено је посматрањем два могућа положаја врата [12]. Конфигурацију када су врата отворена сматрамо референтном (слика 10а). Услед дејства заптивних елемената, као и због неправилног положаја врата изазваног дугогодишњом употребом, врата у затвореном положају се деформишу (слика 10б). На слици 10ц приказано је поље деформације врата аутомобила.

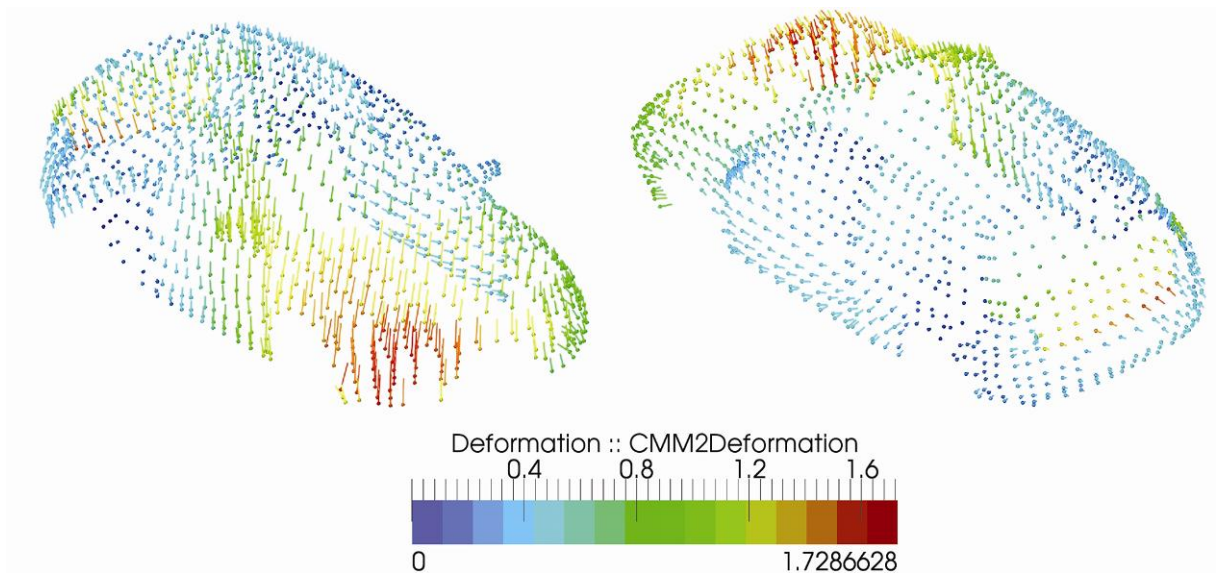


Слика 10: Мерење деформација десних врата аутомобила:
 (а) референтна конфигурација (врата су отворена), (б) деформисана конфигурација (врата су затворена) и (ц) поље деформације

Пример 4 - Деформација каросерије аутомобила у пуној величини. Одређено је поље деформације путничког аутомобила Голф 4, са свим елементима каросерије. Правилно припремљен мерни објекат са реферетним објектима приказан је на слици 12а. Деформисање каросерије изазвано је подизањем предњег десног точка за 120 mm (слика 12б). Овакав случај оптерећења у пракси се јавља при наилажењу возила на ивичњак или при вожњи по неравном путу. Трансформација деформисане у координатни систем недеформисане конфигурације извршена је преко кодираних реферетних тачака у околини задњих блатобрана, за које се претпоставља да се занемарљиво релативно померају током деформације каросерије. Поље деформације приказано је на слици 13.



Слика 12: Каросерија аутомобила у пуној величини:
(а) мерни објекат припремљен за извођење мерења и (б) оптерећивање објекта



Слика 13: Поље деформације каросерије аутомобила у пуној величини

Сви наведени примери су саставни део упутства софтвера, уз које су доступне изворне фотографије, као и датотеке **stage_i.ref** и **stage_i.vtk**. Из приказаних примера види се да софтвер има примену при мерењу деформација реалних конструкција. Приказани резултати показују да је мерни метод једноставан за примену, поуздан и прецизан. Омогућава лако мерење великих објеката, са произвољним бројем посматраних тачака. Повећање броја мерних тачака не утиче значајно на дужину мерења, односно, незнатно се повећава само време потребно за припремне радове. У поређењу са конвенционалним методама време потребно за извођење мерења је знатно краће. На пример, за мерење деформације каросерије аутомобила у пуној величини (пример 4), са преко 2000 мерних места, потребно око 8 часова за припрему објекта, мерење два деформациона стања и одређивање деформација. Развијени софтвер CMM2Deformation има неке напредније и кориснички ефикасније функције од комерцијално

доступних решења. На пример, могуће је пратити деформације тела у серији узастопних конфигурација, при чему је свака i -та конфигурација референтна за $i+1$ конфигурацију.

5. Литература

- [1] TRITOP, User Manual – Software, TRITOP v6.1, GOM mbH, 2008.
- [2] TRITOP, User Information, TRITOP Photogrammetric Camera NIKON D200, GOM mbH, 2008.
- [3] TRITOP, User Information, TRITOP Adapters, GOM mbH, 2008.
- [4] Милан Благојевић, Мирослав Живковић, Мерење деформација оптичким мерним методама, 27. Саветовање са међународним учешћем - ИБР2012, Дивчибаре, 2012, 09-12. Октобар.
- [5] Благојевић М (2009) Примена оптичких мерних система у моделирању у симулацији, Дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, Србија.
- [6] Живковић М, Благојевић М, Дишић А, Славковић Р (2012) CMM2Deformation – Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Србија.
- [7] Благојевић М, Живковић М, Дишић А (2012) CMM2Deformation – Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења, Упутство за коришћење са примерима, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Србија, <http://fempak.fink.rs/software/CMM2Deformation>.
- [8] Vladojević M, Živković M, User-Generated Reference Objects in Photogrammetric 3D Measurement and Quality Control, 6th International Quality Conference, Kragujevac, 2012, ISBN 978-86-86663-82-5.
- [9] Vladojević M, Dišić A, Živković M, Slavković R, Verification of Deformation Measurement Results Using Optical Measuring System TRITOP, 29th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Belgrade, Serbia, 2012, 26th-29th September, pp. 290-293, ISBN 978-86-7083-762-1.
- [10] Bathe KJ (1996) Finite element procedures in engineering analysis, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Prentice-Hall.
- [11] Којић М, Славковић Р, Живковић М, Грујовић Н (1996) Метод коначних елемената – Линеарна анализа, Машински факултет у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, Србија.
- [12] Vladojević M, Živković M, 3D Deformation Measurement of Car Body Parts Based on Point Cloud Generated by Optical Measuring Techniques, International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, 2012, October 3rd-5th, ISBN 978-86-86663-39-9.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр. 01-1/3123-41 од 28.11.2012. године именовани смо за рецензенте техничког решења: „**Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - SMM2Deformation**“ аутора: др Мирослава Живковића, ред. проф., Милана Благојевића, истраживач-сарадника, Александра Дишића, истраживач-сарадника, др Радована Славковића, ред. проф. На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА UNIVERZITET KRAJEVAC		
12.12.2012		
01-1/3424		

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење „**Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - SMM2Deformation**“ аутора: др Мирослава Живковића, ред. проф., Милана Благојевића, истраживач-сарадника, Александра Дишића, истраживач-сарадника, др Радована Славковића, ред. проф., реализовано у току 2011. и 2012. године, приказано је на 10 страница формата А4, писаних фонтом величине 11, садржи 13 слика и 12 референци. Техничко решење припада области научно-технолошких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42) и представљено је у 5 поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)
5. Литература

Наручиоци техничког решења су **Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије** и „**ИЦ инжењеринг**“ а.д., Крагујевац. Реализовано је у оквиру рада на пројекту: **ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема** – који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, у периоду од 2011 до 2014.

Из приложених примера види се да је техничко решење нашло примену у индустрији и научно-истраживачком раду. Прва примена и валидација

предложеног техничког решења реализована је у предузећима „ИЦ инжењеринг“ а.д., Крагујевац и „Милановић Инжењеринг“ а.д., Крагујевац.

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења „Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - CMM2Deformation“ су приказали стање решености проблема у свету и у нашој земљи, и детаљно описали развијени софтвер. Техничко решење поседује стручну компоненту и представља заокружен резултат. Резултати техничког решења излагани су на научним скуповима.

Познато је да се рад са оптичким координатним мерним машинама заснива на употреби референтних маркера, који се веома једноставно и брзо постављају на одабрана мерна места. Оптичке координатне мерне машине са великом прецизношћу одређују 3Д положаје маркера и тиме, између осталог, омогућавају брзо и ефикасно одређивање одступања у односу на САД модел, затим контролу толеранција облика и положаја, као и проверу спецификација дефинисаних технолошком документацијом.

Развијени софтвер CMM2Deformation омогућава мерење статичких и квазистатичких деформација посматране конструкције коришћењем оптичких координатних мерних машина, на основу референтних маркера. Одређивање вредности деформација коришћењем софтвера CMM2Deformation врши се поређењем два облака тачака - скупа реконструисаних положаја маркера. На овај начин стиче се јасна представа о карактеру и величини деформације посматраног објекта. Другим речима, развијени софтвер даје додатну вредност системима за оптичко координатно мерење и омогућава даљи прорачун и анализу деформација.


На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:

- 1. Развијени софтвер CMM2Deformation представља користан алат за решавање проблема у анализи конструкција и може се широко примењивати за мерење деформација у различитим апликативним истраживањима за потребе аутоиндустрије, авиоиндустрије, производње компоненти за прерађивачку индустрију, итд.,*

2. Развијени софтвер CMM2Deformation, у поређењу са другим комерцијалним решењима даје поуздане резултате и има сличне могућности,
3. Софтвер омогућава генерисање модела коначних елемената, тако да је могуће директно поређење мерених и прорачунских вредности на посматраним мерним местима, што омогућава даљу анализу понашања материјала у одређеним зонама и изналажење решења за оучене проблеме у самој конструкцији при промени оптерећења,
4. Софтвер је праћен добро документованим упутством за кориснике и мноштвом демо примера за презентацију могућности техничког решења; упутство за примену софтвера урађено је по узору на упутства за сличне софтвере водећих светских произвођача,
5. Кроз оригинални развој оваквог софтверског решења могућа су даља унапређења и развој кроз прилагођавање условима мерења што га чини поузданијим и робустнијим за самог корисника у различитим областима примене.

Имајући у виду значај и апликативни карактер предложеног и валидираног техничког решења, његове могућности за широку примену у индустрији, као и то да оно додатно унапређује и допуњује постојећа хардверско-софтверска решења и системе који се користе на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, са задовољством предлагемо да се „Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - CMM2Deformation“ прихвати као техничко решење – нови софтвер - М85 према класификацији из Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. гласник РС“, бр. 32/2008).

14.12.2012., у Крагујевцу


Др Весна Мандић, ванр. проф.,


Др Петар Тодоровић, ванр. проф.



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: ТР-72/2012
20. 12. 2012. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на својој седници од 20. 12. 2012. године на основу члана 205. Статута Факултета инжењерских наука, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења - СММ2Deformation“, аутора др Мирослава Живковића, редовног професора, Милана Благојевића, истраживача сарадника, Александра Дишића, истраживача сарадника и др Радована Славковића, редовног професора.

Решење припада класи М85, према класификацији из Правилника о поступку, начину вредновању, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС“ - бр. 38/2008).

Рецензенти су:

1. **Др Весна Мандић**, ванр. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац,
Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,
2. **Др Петар Тодоровић**, ванр. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац,
Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг.

Достављено:

- Ауторима
- Архиви

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



Мирослав Бабић
Др Мирослав Бабић, редовни професор

М.С.

Datum/Date 30.01.2013.

Znak/Ref. 30-01/13-01

ПРЕДМЕТ: Техничко решење – Софтвер:
Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења -
CMM2Deformation

Овим се потврђују следеће чињенице у вези предметног техничког решења:

Врста техничког решења:

Софтвер (М85)

Назив техничког решења:

Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења -
CMM2Deformation

Аутори техничког решења:

Др Мирослав Живковић, ред. проф.
Милан Благојевић, истраживач-сарадник
Александар Дишић, истраживач-сарадник
Др Радован Славковић, ред. проф.

Корисник техничког решења:

ИЦ Инжењеринг, Крагујевац

Година израде:

2011 – 2012. година

Примена техничког решења:

Софтвер CMM2Deformation омогућава успешно одређивање угиба регалних складишта,
где конвенционалне методе мерења не могу ефикасно и/или успешно да се примене.

Напомена:

Техничко решење CMM2Deformation је оригинални софтвер развијен на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру пројекта ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја уз партиципацију ИЦ Инжењеринг д.о.о., Крагујевац.


Директор
Дејан Максимовић, дипл. маш. инж.

Milanović inženjering d.o.o., Sobovica bb-34 321 Cerovac, Kragujevac, Srbija

Број: 83/13
Датум: 30.01.2013. год.

ПРЕДМЕТ: Техничко решење – Софтвер:
Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења -
СММ2Deformation

Овим се потврђују следеће чињенице у вези предметног техничког решења:

Врста техничког решења:
Софтвер (М85)

Назив техничког решења:
Софтвер за одређивање деформација на основу фотограметријских мерења -
СММ2Deformation

Аутори техничког решења:
Др Мирослав Живковић, ред. проф.
Милан Благојевић, истраживач-сарадник
Александар Дишић, истраживач-сарадник
Др Радован Славковић, ред. проф.

Корисник техничког решења:
Милановић Инжењеринг д.о.о., Крагујевац

Година израде:
2011 – 2012. година

Примена техничког решења:
Софтвер СММ2Deformation коришћен је приликом монтаже уређаја за профилисање
цеви. На основу резултата добијених коришћењем софтвера СММ2Deformation стиче се
јасна слика о деформисању подсклопова конструкције изазваних интеракцијом са дугим
елементима у склопу.

Напомена:
Техничко решење СММ2Deformation је оригинални софтвер развијен на Факултету
инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру пројекта ТР32036 - Развој
софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, који финансира
Министарство просвете, науке и технолошког развоја уз партиципацију Милановић
Инжењеринг д.о.о., Крагујевац.

3. Директор
Братислав Милановић

