

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2014/86



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	Z2-4158
Naslov projekta	DINAMIČNA ANALIZA PREMOSTITVENIH OBJEKTOV OB SOČASNEM VPLIVU VOZIL IN VETRA
Vodja projekta	27673 Eva Zupan
Tip projekta	Z Podoktorski projekt
Obseg raziskovalnih ur	3400
Cenovni razred	A
Trajanje projekta	07.2011 - 06.2013
Nosilna raziskovalna organizacija	792 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	2 TEHNIKA 2.05 Mehanika 2.05.04 Konstrukcijska mehanika
Družbeno-ekonomski cilj	02. Okolje
Raziskovalno področje po šifrantu FOS	2 Tehniške in tehnološke vede 2.03 Mehanika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

2. Povzetek raziskovalnega projekta¹

SLO

V podoktorskem projektu je Eva Zupan razvila nove računske metode in pripravila pripadajoča programska orodja za obravnavanje povezanega problema gibanja vozil vzdolž premostitvenih objektov ob sočasnem vplivu vetra. Problem matematično opišemo s sistemom togih algebrasko-diferencialnih enačb, v katerih kot osnovne neznanke nastopajo tudi prostorski zasuki. Premostitvene objekte modeliramo s prostorskimi, geometrijsko nelinearnimi linijskimi končnimi elementi. Telo, ki se giblje po deformabilnem nosilcu, modeliramo kot trirazsežno togo telo, njun stik pa opisujejo vzmeti. Zaradi prepletenosti algebraskih in diferencialnih enačb in neaditivnosti prostorskih zasukov je problem računsko zelo zahteven. V okviru projekta so bili zato razviti tudi novi časovni integratorji, ki temeljijo na parametrizaciji

zasukov z rotacijskimi kvaternioni. Uporaba kvaternionov se je izkazala za odlično izbiro, vseeno pa je bilo za večjo numerično učinkovitost potrebno konsistentno transformirati vodilne enačbe problema. Tak pristop se je izkazal kot robusten, numerično stabilen in učinkovit. Pripravljena programska orodja so primerna za natančnejšo analizo premostitvenih objektov tako za železniški kot cestni promet pod vplivi gibajočih se vozil in vetra, izdelane parametrične študije pa opozarjajo na prednosti natančnejših modelov ter učinkovitost in stabilnost predlaganih računskih metod. Delo je naletelo na zelo ugodne odzive v mednarodnih znanstvenih krogih. To dokazuje pet izvirnih znanstvenih člankov v uglednih mednarodnih revijah s faktorjem vpliva, šest odmevnih referatov na mednarodnih konferencah in vzpostavitev sodelovanja s tujimi partnerji. Rezultati in izkušnje raziskovalnega projekta so tudi odlična osnova za nadaljnje delo v raziskovalni skupini in sodelovanje s tujimi raziskovalci, razvite numerične metode, še posebej nove časovne integratorje, pa zlahka priredimo za reševanje sorodnih inženirskih problemov.

ANG

In the research project we introduced novel numerical methods for coupled dynamic analysis of three-dimensional frame structures and moving vehicles under time-dependent wind load. The problem is mathematically described by a system of stiff differential-algebraic equations in which spatial rotations are members of the primary unknowns. The structure was modelled by modern geometrically exact beam elements, the motion of the vehicle was described by dynamic equations of the rigid body and springs were used for modelling the contact between the vehicle and the structure. The interdependence of algebraic and differential governing equations and the non-additivity of spatial rotations make the problem computationally very demanding. Therefore, novel time-integrators based on quaternion representation of rotations were developed within the project. The use of rotational quaternions was proven as an excellent choice. Still, for high efficiency of the proposed numerical algorithms a consistent transformation of the governing equations to the quaternion algebra was also needed. Our approach resulted in robust, computationally stable and efficient numerical models. The developed computer program is directly applicable for the analysis of long-span road and railway bridges under moving vehicles and wind loads. The numerical studies have shown that simplified models can underestimate the dynamic response of the structure. The work was well accepted among researchers working in the field of structural and multibody dynamics. We have published five papers in the international journals indexed by SCI and presented our work at six international conferences. New contacts and cooperation with foreign research organizations was also established. Results and experiences of the project represent a suitable basis for future work at the research group and cooperation with foreign researchers. The proposed numerical models especially novel time-integrators are applicable and suitable for various engineering problems.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu²

Težišče dela podoktorskega projekta je bila priprava natančne, a hkrati numerično stabilne in robustne formulacije povezanega problema gibanja vozila vzdolž prostorske linijske konstrukcije ob sočasnem vplivu vetra. Na osnovi izpeljane numerične formulacije in razvitih metod smo v skladu s teoretičnimi spoznanji sočasno razvijali prototip programa v okolju Matlab. Razvita programska orodja so neposredno uporabna za analizo konkretnih inženirskih objektov pod vplivom vozil in vetra. O raziskovalnih pristopih in ugotovitvah smo poročali mednarodnim znanstvenim krogom, ki delujejo na raziskovalnih področjih projekta, in naleteli na zelo ugodne odzive in precejšnje zanimanje za naše pristope. V okviru projekta smo vzpostavili intenzivnejše in dolgoročnejše stike z raziskovalci na uglednem inštitutu Fraunhofer ITWM.

Razvoj numeričnih metod za dinamično analizo deformabilnih konstrukcij pod vplivom gibajočega se telesa je nujno potreben in zato tudi v zadnjem času precej intenziven o čimer priča precejšnje število člankov s to problematiko, objavljenih v zadnjih letih. Relativno preprosti modeli za konstrukcijo in telo pričajo o teoretični in numerični zahtevnosti problema. Z razvojem tehnologije, zaradi geografskih in tehnoloških zahtev pa se v sodobnem času vse pogostejše srečujemo s premostitvenimi objekti, ki so ukrivljeni v eni, pogosto pa tudi v dveh ravninah. Hkrati se soočamo tudi z velikimi ekstremnimi dinamičnimi obtežbami, še posebej se kot zelo vplivna obtežba pojavlja obtežba z vetrom. To narekuje natančnejše modele konstrukcij in ustrežnejše analize. V naših raziskavah smo premostitvene objekte modelirali s prostorskimi linijskimi nosilci, ki dopuščajo začetno ukrivljeno in zvito obliko, hkrati pa se ne omejimo glede velikosti pomikov in zasukov in upoštevamo tudi materialno nelinearnost. Telo, ki se giblje po konstrukciji, modeliramo kot trirazsežno telo, njun stik pa opisujemo z vzmetmi. Vodilne enačbe problema so zelo zahtevne in jih lahko rešimo le numerično. Numerično reševanje ni preprosto zaradi medsebojne povezanosti enačb, algebrajske

diferencialne narave vodilnih enačb, velikega števila neznank problema in različnega fizikalnega pomena in obnašanja opazovanih količin.

Naše izkušnje na tem področju in izkušnje mnogih raziskovalcev kažejo, da je za uspešno numerično reševanje povezanih problemov v dinamiki sistemov teles ključno uspešno modeliranje časovne odvisnosti količin, t.i. časovna diskretizacija. Pri tem se moramo podrediti togi naravi problema, ki zahteva implicitne sheme reševanja in posebnosti prostorskih zasukov. Prostorskih zasukov med sabo namreč ne smemo seštevati, kar onemogoča neposredno uporabo standardnih metod. Obstoječe metode večinoma temeljijo na formulacijah z uporabo Liejevih grup in algeber, kar poveča računsko zahtevnost algoritmov, tipično pa se pojavljajo tudi težave z numerično stabilnostjo, ki jih je težko rešiti, ne da bi vplivali na natančnost rezultatov. V okviru projekta smo razvijali nove alternativne pristope, ki temeljijo na uporabi rotacijskih kvaternionov za opis zasukov konstrukcije in vozil. Prednosti rotacijskih kvaternionov je veliko, vendar pa se pri dinamičnih sistemih pojavlja tudi precejšnje število težav, rešitve zanje pa še niso bile dokumentirane v znanstveni literaturi. Kot pomembno prednost izpostavimo manjše računske čase pri določanju zavrtenih leg in popolno odpravo singularnosti.

Cilj projekta je bil razvoj numerično učinkovite in stabilne formulacije, ne da bi pri tem vplivali na natančnost izračunanih rezultatov. Z vpeljavo kvaternionov za opis zasukov smo ta cilj le delno dosegli. Kot smo poročali v člankih, je že ta pristop dovolj za stabilnejše obnašanje znanih integratorjev, ki se uporabljajo v dinamiki sistemov teles. Vseeno pa lahko v določenih primerih zaznamo težave z numerično stabilnostjo. Nadaljnji razvoj je potekal v dveh smereh: i) vodilne enačbe problema smo skušali zapisati v obliki, ki je kar najbolj usklajena z uporabo kvaternionске algebre, ii) razvijali smo nove metode za integracijo na nelinearnih konfiguracijskih prostorih. Kombinacija obeh smeri razvoja se je izkazala za izredno uspešno in učinkovito. Problem smo zapisali v jeziku kvaternionске algebre s konsistentnim upoštevanjem variacijskih principov in lastnosti matematičnega konfiguracijskega prostora. Razvili smo več družin integratorjev po času, ki dosledno upoštevajo naravo vodilnih enačb in rotacijskih kvaternionov, pri čemer smo precejšnjo pozornost namenili tudi metodam višjega reda, saj, kot je dobro znano, ob enaki natančnosti rezultatov dosegajo bistveno boljše računske čase.

Pristopi in modeli, ki smo jih razvili so novi in izvirni, posebej pa smo ponosni na izboljšano numerično robustnost in stabilnost v primerjavi s primerljivimi dosedanjimi rešitvami. Del izsledkov raziskovalnega dela je že bil objavljen v uglednih mednarodnih revijah s faktorjem vpliva. Plod raziskovalnega dela na projektu je pet izvirnih znanstvenih člankov. Posebej moramo izpostaviti dva članka, ki spadata v skupino A' – zelo kvalitetnih znanstveno-raziskovalnih dosežkov. Dva članka sta bila objavljena v revijah druge skupine, eden pa v reviji tretje skupine baze SCI. Vodja projekta se je udeležila šestih mednarodnih in ene slovenske konference, kjer je predstavila svoje raziskovalno delo mednarodni in slovenski znanstveni javnosti. Pozitivni odzivi in precejšnje zanimanje za naše delo pričajo o aktualnosti predstavljenih modelov. Čeprav je od objave prvih izsledkov minilo relativno malo časa, se opažena in relevantnost našega dela že kaže tudi v prvih citatih v mednarodno priznanih revijah. Glede na trenutne trende v numeričnem modeliranju dinamike konstrukcij lahko upravičeno pričakujemo, da bo število citatov na ta dela še precej naraslo.

Naši pristopi in resno znanstveno delo na področju dinamike konstrukcij so bili tudi temelj vzpostavitve sodelovanja z inštitutom Fraunhofer ITWM (Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik) iz Nemčije. Po njihovem povabilu je vodja projekta gostovala na ITWM v juliju 2012 in tam predstavila svoje raziskovalno delo in raziskovalno delo v njeni raziskovalni skupini. Ta obisk je bil osnova za intenzivnejše sodelovanje, ki se je nadaljevalo v obliki več delovnih obiskov, skupnih objav in prijav projektov. Rezultat sodelovanja je tudi možnost postdoktorske usposabljanja na ITWM za raziskovalce iz Slovenije. Trenutno eno takšno usposabljanje že poteka. V bodoče pa načrtujemo še intenzivnejše sodelovanje.

Znanje in izkušnje pridobljene pri reševanju povezanih problemov, odvisnih od časa, bodo odlična podlaga za nadaljnje raziskovalno delo na tem področju. Del rezultatov bo osnova za modele, ki jih razvija raziskovalna skupina Katedra za mehaniko na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, kjer je vodja projekta delovala. Pridobljena znanja in razvita programska orodja pa vodja projekta uspešno uporablja pri svojem nadaljnjem delu v raziskovalni skupini Konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, kjer se ukvarja s statično in dinamično analizo mostov.

4. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev³

Projekt je bil izvajan v skladu z napovedmi. Cilji so bili doseženi in program dela realiziran.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma

sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁴

Projekt je bil izvajan v okviru napovedi brez pomembnejših odstopanj. Sprememb v projektni skupini ni bilo.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

	Znanstveni dosežek		
1.	COBISS ID	5478497	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Integracija rotacij iz kotnih hitrosti
		ANG	Integrating rotation from angular velocity
	Opis	SLO	Primerjava različnih časovnih integratorjev na temeljni nalogi dinamike sistemov teles – določitvi zasukov iz znanega polja rotacij je ključnega pomena pri odločitvah glede njihove implementacije v kompleksnejše programsko okolje za reševanje zahtevnejših problemov. Razvoj novega integratorja in njegova primerjava z obstoječimi daje dodatna znanja in izkušnje, ki so pomembna osnova za nadaljnji razvoj in uporabo integratorjev na nelinearnih konfiguracijskih prostorih.
		ANG	Comparison between different time integrators when dealing with fundamental problem in multibody dynamics – the reconstruction of rotations from angular velocities is crucial for choosing the most suitable time integrators to be employed in more complex software environment for solving more demanding problems. Development of a new integrator and its comparison to the existing represents an important knowledge and basis for further development and application of time integrators on nonlinear configuration spaces.
	Objavljeno v		Elsevier Applied Science; Advances in engineering software; 2011; Letn. 42, št. 9; str. 723-733; Impact Factor: 1.092; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 0.971; WoS: EV, EW; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	5751393	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Dinamika geometrijsko nelinearnih prostorskih nosilcev s kvaternionskim opisom rotacij in uporabo metod Runge-Kutta
		ANG	Quaternion-based dynamics of geometrically nonlinear spatial beams using the Runge-Kutta method
	Opis	SLO	V članku povsem opustimo tradicionalen način dvojnega opisa rotacij prek rotacijskega vektorja in rotacijske matrike. Namesto tega uporabimo kvaternione kot edini opis rotacij in z njimi povezanih količin. Kvaternioni so elementi štirirazsežnega linearnega prostora in zato primernejši za uporabo kot, sicer zelo priljubljena, posebna ortogonalna grupa rotacijskih matrik. Preprostejši konfiguracijski prostor pomembno olajša interpolacijo rotacijskih količin in omogoči uporabo standardnih metod družine Runge-Kutta. Tako lahko popolnoma izkoristimo pomembne prednosti teh metod, kot so kontrola lokalne napake in prilagodljiv časovni korak. Delo spada v kategorijo A' – zelo kvalitetnih dosežkov.
		ANG	The classical concept of parametrizing the rotation matrix by the rotational vector is completely abandoned so that the only rotational parameters are the rotational quaternions representing both rotations and rotational strains in the beam. Because the quaternions are the elements of a four dimensional linear space, their use is an advantage compared to the elements of the special orthogonal group. This makes possible, e.g. to interpolate the rotational quaternions in a standard additive way and to apply standard Runge-Kutta time integration methods. Thus we benefit from theoretically well based adaptive time-step algorithms and avoid the

		analytical linearization of the governing equations.
	Objavljeno v	North-Holland; Finite elements in analysis and design; 2012; Letn. 54; str. 48-60; Impact Factor: 1.389; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 0.905; A': 1; WoS: PN, PU; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran, Zupan Dejan
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	5825377 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Dinamika prostorskih nosilcev v kvaternionskem opisu z uporabo Newmarkove integracije
		<i>ANG</i> Dynamics of spatial beams in quaternion description based on the Newmark integration scheme
	Opis	<i>SLO</i> Z uporabo kvaternionov lahko povsem opustimo tradicionalen način dvojnega opisa rotacij prek rotacijskega vektorja in rotacijske matrike. V članku izrazimo vodilne enačbe problema v kvaternionski algebri in predstavimo prilagoditev Newmarkove metode za rotacijske kvaternione. Teoretične osnove so predstavljene dovolj podrobno, da članek pomeni osnovo za uporabo kvaternionov tudi v drugih končnih elementih, ki uporabljajo rotacije. Model smo preizkusili na številnih primerih. Izpeljani elementi so še posebej natančni in učinkoviti, kadar uporabimo oblikovne funkcije višjih redov. Zanimiva lastnost prestavljenega modela je povečana numerična stabilnost računov. Delo spada v kategorijo A' – zelo kvalitetnih dosežkov.
		<i>ANG</i> With the use of the quaternion parametrization of rotations we completely avoid the need for use of the rotational vector and the rotation matrix. The equations are therefore presented in terms of quaternion algebra. An adaptation of the Newmark integration method for use with quaternions is presented. This work brings a firm theoretical tools and knowledge for the use of the quaternion parametrization of rotation in any finite-element implementation of the rotation-based theories. The proposed numerical model was verified by numerical examples. Present elements were shown to be particularly accurate and computationally efficient when a higher-order interpolation is used. The interesting property of the present time integrator is that the increased numerical stability of the total mechanical energy can be observed.
	Objavljeno v	Springer; Computational mechanics; 2013; Letn. 51, št. 1; str. 47-64; Impact Factor: 2.432; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.369; A': 1; WoS: PO, PU; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran, Zupan Dejan
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	6211681 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> S principom virtualnega dela usklajena kvaternionska formulacija Reissner-Simove teorije nosilcev
		<i>ANG</i> On a virtual work consistent three-dimensional Reissner-Simo beam formulation using the quaternion algebra
	Opis	<i>SLO</i> Pri modeliranju rotacij s kvaternioni moramo upoštevati še algebrasko vezno enačbo, ki zagotavlja enotskost rotacijskih kvaternionov. V tem delu smo predstavili popolnoma konsistenten splošen princip virtualnega dela s kvaternionsko parametrizacijo rotacij, kjer po metodi Lagrangevih množiteljev upoštevamo pogoj enotskosti. Poučna in zanimiva sta ustrezna momentna ravnotežna enačba in kvaternionski moment, definiran kot komplement variacije rotacijskega kvaterniona. Ker je enotskosti rotacijskega kvaterniona avtomatsko zadoščeno, sta diskretizacija in interpolacija prepuščeni svobodni izbiri. V nasprotju s standardnimi pristopi predlagana metoda deluje izjemno stabilno in natančno tudi pri uporabi

			interpolacij zelo visokih redov.
		ANG	In the paper we present the Reissner-Simo beam theory in which the rotations are represented by quaternions. From the generalized virtual work principle, where the unity constraint of the rotational quaternion is properly considered and the consistent energy complements of the rotational quaternions are employed, we derive the weak kinematic equations in the quaternion-based description. These equations are then employed in the extended virtual work principle to obtain the consistent governing equations of the three-dimensional beam in terms of the quaternion algebra. The quaternion moment equilibrium equation is analysed, discussed and interpreted. In numerical implementation the standard Galerkin discretization is used to obtain the quaternion-based finite element formulation. Various examples prove the suitability of the formulation.
	Objavljeno v	Springer; Acta mechanica; 2013; Letn. 224, št. 8; str. 1709-1729; Impact Factor: 1.247; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.369; WoS: PU; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran, Zupan Dejan	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	6429793	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Na kvaternionih osnovana integracija kotnih hitrosti višjega reda
		ANG	On higher order integration of angular velocities using quaternions
	Opis	SLO	Določitev polja rotacij iz znanih kotnih hitrosti je izredno pomemben del dinamičnih sistemov. V jeziku kvaternionijske algebre lahko zapišemo analitično rešitev in različne numerične algoritme, pri čemer se posebej posvetimo metodam višjega reda, ki so v dinamiki konstrukcij, pri povezanih problemih in dinamiki sistemov teles redkost. Analitična rešitev je izražena z neskončno kvaternionisko vrsto in zato manj primerna za neposredno numerično implementacijo, predstavlja pa odlično osnovo za razvoj numeričnih metod. Za praktično uporabo so še posebej primerne tiste, ki ohranjajo enotskost rotacijskega kvaterniona in temeljijo na znanih in na novo predstavljenih preslikavah, ki vektorjem priredijo enotske kvaternione.
		ANG	In the paper we study the integration of angular velocities with a special attention given to exact and higher order methods. Both exact and approximate results are expressed in terms of rotational quaternions. Analytical solution is found using the theory of analytic differential systems. This exact solution serves as a suitable basis for derivation of various numerical methods. Approximative approaches based on Taylor series and several maps from pure to unit quaternions are presented. A special care is taken in describing the higher order approximations. The computational performance and comparison of numerical methods is demonstrated by examples.
	Objavljeno v	Pergamon.; Mechanics Research Communications; 2014; Letn. 55; str. 77-85; Impact Factor: 1.050; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.369; WoS: PU; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Zupan Dejan	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁶

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	5969505	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Linijski končni elementi s kvaternionskim opisom rotacij

		ANG	The rotational quaternion - based beam FEM formulations	
Opis		SLO	Slovensko društvo za mehaniko je član Osrednjega evropskega združenja za numerično mehaniko (Central European Association for Computational Mechanics - CEACM). V letu 2012 smo se udeležili srečanja ECCOMAS 2012, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering v organizaciji CEACM. Udeležba na takšnih srečanjih pomeni tesnejše povezovanje raziskovalcev znotraj osrednje evropske regije in širše.	
		ANG	The Slovenian Association for Mechanics is a member of a Central European Association for Computational Mechanics (CEACM). In 2012 we participated at the CEACM meeting: ECCOMAS 2012, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Participating at such an event increases cooperation inside central European region and globally.	
Šifra		B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci		
Objavljeno v		University of Technology; ECCOMAS 2012 CD-ROM Proceedings; 2012; Str. 1-19; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran, Zupan Dejan		
Tipologija		1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci		
2.	COBISS ID		5899105	Vir: COBISS.SI
Naslov		SLO	Dinamični odziv geometrijsko nelinearnih nosilcev pod vplivom gibajočih se teles	
		ANG	Dynamic response of geometrically non-linear beam under moving mass	
Opis		SLO	Na tematski konferenci smo predstavili naš pristop k povezanemu problemu dinamičnega odziva linijske konstrukcije, ki je obremenjena s potujočim telesom. Izvirna formulacija prostorskih nosilcev po metodi končnih elementov, ki temelji na šibkih konsistentnih enačbah, se je izkazala za zelo zanimivo tudi za druge raziskovalce. Numerične študije, s katerimi smo opozorili, da je povezano reševanje takih problemov zelo pomembno, saj lahko sicer močno podcenimo odziv konstrukcije so prav tako pritegnile precej pozornosti.	
		ANG	At the thematic conference our approach to the coupled problem of the dynamics of a beam-like structure under moving body was presented. Our specially designed finite-element formulation of the three-dimensional beam based on the weak form of consistency conditions was recognized as a suitable choice among the researchers in this field. Numerical studies showing that the uncoupled models might highly underestimate the response of the structure compared to the present coupled analysis also received a considerable attention.	
Šifra		B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci		
Objavljeno v		University of Stuttgart, Institute of Engineering and Computational Mechanics; The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics; 2012; Str. 1-9; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran		
Tipologija		1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci		
3.	COBISS ID		6300001	Vir: COBISS.SI
Naslov		SLO	Integracija rotacijskih kvaternionov iz kotnih hitrosti	
		ANG	On integration of rotational quaternions from angular velocities	
Opis		SLO	S prispevkom na tematski konferenci z ožjega področja projekta smo opozorili na prednosti in naše izvirne rešitve pri rekonstrukciji zasukov iz kotnih hitrosti, kadar za parametrizacijo zasukov uporabimo rotacijske kvaternione. Referat je naletel na zelo ugoden odziv in kar nekaj pobud za znanstveno sodelovanje.	
			At the thematic conference in the field of the research project our approach	

		ANG	to the reconstruction of rotations from the given angular velocity field was presented. The quaternion representation of rotations was shown to be suitable for both analytical and higher-order numerical solutions. The exact solution serves as a suitable basis for derivation of various numerical methods where as specially suitable are recognized the methods that exactly preserve the unit norm constraint were found. Presentation was well accepted by the audience and several offers for scientific cooperation were proposed on this basis.
	Šifra	B.03	Referat na mednarodni znanstveni konferenci
	Objavljeno v	University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture; Proceedings; 2013; Str. 695-701; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Saje Miran, Zupan Dejan	
	Tipologija	1.08	Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci
4.	COBISS ID	6328929	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Kvaternionska dinamika geometrijsko točnih Cosseratovih nosilcev
		ANG	Quaternion-based dynamics of geometrically exact Cosserat rods
	Opis	SLO	Članek predstavlja konsistenten pristop k dinamični analizi geometrijsko točnih prostorskih nosilcev, kjer zasuke opišemo s kvaternioni. Hkrati predstavlja ta članek rezultat uspešnega sodelovanja z inštitutom Fraunhofer ITWM (Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik).
		ANG	This paper presents a consistent approach in dynamic analysis of geometrically exact three-dimensional beams with quaternion description of rotational degrees of freedom. This article is a result of successful cooperation with the researchers at Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics.
	Šifra	B.03	Referat na mednarodni znanstveni konferenci
	Objavljeno v	CanCNSM; Conference proceedings; 2013; Str. 1-6; Avtorji / Authors: Zupan Eva, Linn Joachim, Saje Miran, Zupan Dejan	
	Tipologija	1.08	Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁷

Delovni obisk vodje projekta na inštitutu Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Nemčija, v času od 1. 7. - 4. 7. 2012, na povabilo dr. Joachima Linna. Ta obisk je bil osnova za intenzivnejše sodelovanje, ki se je nadaljevalo v obliki več delovnih obiskov, skupnih objav in prijav projektov. Rezultat sodelovanja je tudi možnost postdoktorskega usposabljanja na ITWM za raziskovalce iz Slovenije. Trenutno eno takšno usposabljanje že poteka. V bodoče pa načrtujemo še intenzivnejše sodelovanje.

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti⁹

SLO

Razvoj numeričnih metod za dinamično analizo deformabilnih konstrukcij pod vplivom gibajočega se telesa je nujno potreben in zato tudi v zadnjem času precej intenziven o čimer priča precejšnje število znanstvenih člankov s to problematiko, objavljenih v zadnjih letih. V okviru projekta smo razvili nove pristope v dinamiki konstrukcij in predlagali nove časovne integratorje. Izkušnje pri integraciji diferencialnih enačb in njihova prilagoditev za multiplikativne prostore so uporabne tudi na drugih znanstvenih področjih, kjer probleme opisujejo toge diferencialne enačbe, še posebej če so v modele vključeni tudi prostorski zasuki. Rezultati in izkušnje raziskovalnega projekta so tudi odlična osnova za nadaljnje delo v raziskovalni skupini in za sodelovanje s tujimi raziskovalci.

ANG

The development and improvement of numerical methods for dynamic analysis of deformable structures under moving body is a subject of extensive research, which is confirmed by a number of recent papers.

Within the project we proposed novel approaches in structural dynamics and developed several new time integrators. The experiences with different solvers and their modification to multiplicative configuration spaces are applicable to various areas of research where the problems are modelled with stiff differential equations and/or rotations.

Results and experiences of the project are also a suitable basis for future work in the research group and for cooperation with foreign researchers.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Razvoj numeričnih metod za dinamično analizo deformabilnih konstrukcij pod vplivom gibajočega se telesa in ekstremnih dinamičnih obtežb je izrednega pomena za sodobno ovrednotenje obstoječih in načrtovanje novih inženirskih objektov.

Z razvitim numeričnim modelom bolje razumemo obnašanje prostorskih, začetno ukrivljenih in zvitihi linijskih konstrukcij po vplivom gibanja vozil in obtežbe z vetrom.

Pripravljena programska orodja so primerna za natančnejšo analizo premostitvenih objektov tako za železniški kot cestni promet pod vplivi gibajočih se vozil in vetra, izdelane parametrične študije pa opozarjajo na prednosti natančnejših modelov ter učinkovitost in stabilnost predlaganih računskih metod.

Del izsledkov raziskovalnega dela že uporabljamo pri analizi obstoječih starejših mostov, za katere je zaradi strožjih sodobnih zahtev in večjih prometnih obtežb potrebna ponovna evalvacija.

ANG

The development of numerical methods for dynamic analysis of deformable structures under moving body is of utmost importance for the re-assessment of the safety of such engineering structures and in designing the new ones.

With the developed model a better understanding of the dynamic response of three-dimensional initially curved and twisted frame structures under moving vehicle and wind loads was achieved. The study of more demanding problems has shown that simplified models can underestimate the response of the structure.

The methods and the developed computer program is directly applicable for the analysis of long-span road and railway bridges under moving vehicles and wind loads.

Some of the results and the experiences of the project are currently employed in the analysis of several old bridges in Slovenia, where due to novel standards and higher traffic loads re-assessment is needed.

10. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	

	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

Komentar

11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!
Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	

G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☐	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☐	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☐	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☐	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☐	☐	☐	☐	
G.02.07.	Večji delež izvoza	☐	☐	☐	☐	
G.02.08.	Povečanje dobička	☐	☐	☐	☐	
G.02.09.	Nova delovna mesta	☐	☐	☐	☐	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	☐	☐	☐	☐	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	☐	☐	☐	☐	
G.02.12.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	☐	☐	☐	☐	
G.03.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	☐	☐	☐	☐	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	☐	☐	☐	☐	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	☐	☐	☐	☐	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	☐	☐	☐	☐	
G.04.06.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	☐	☐	☐	☐	
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj	☐	☐	☐	☐	
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.03.	Energetska infrastruktura					

			☐	☐	☐	☐	
G.07.04.	Drugo:		☐	☐	☐	☐	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva		☐	☐	☐	☐	
G.09.	Drugo:		☐	☐	☐	☐	

Komentar

12.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹¹

	Sofinancer			
1.	Naziv			
	Naslov			
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		EUR	
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		%	
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja		Šifra	
		1.		
		2.		
		3.		
		4.		
		5.		
Komentar				
Ocena				

13.Izjemni dosežek v letu 2013¹²**13.1. Izjemni znanstveni dosežek**

13.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za
gradbeništvo in geodezijo

Eva Zupan

ŽIG

Kraj in datum:

Ljubljana	13.4.2014
-----------	-----------

Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2014/86

¹ Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁴ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'. [Nazaj](#)

⁶ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁸ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

⁹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

¹² Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2013 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2014 v1.03
39-68-F8-58-E1-99-65-F8-3F-21-94-25-91-3B-9B-82-05-65-F8-77