



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0460

Numerické modelovanie, spracovanie obrazu a analýza dát

Zodpovedný riešiteľ **prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.**

Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Stavebná fakulta**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie, Stavebná fakulta STU v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

NA

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

NA

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

MIKULA, Karol - KOLLÁR, Michal - OŽVAT, Aneta Alexandra - AMBROZ, Martin - ČAHOJOVÁ, Lucia - JAROLÍMEK, Ivan - ŠIBÍK, Jozef - ŠIBÍKOVÁ, Mária. Natural numerical networks for Natura 2000 habitats classification by satellite images. In Applied Mathematical Modelling. No. 116 (2023), s. 209-235. ISSN 0307-904X (2022: 5 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.08 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85143493733; CC: 000694508100001; DOI: 10.1016/j.apm.2022.11.021. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

MIKULA, Karol - ŠIBÍKOVÁ, Mária - AMBROZ, Martin - KOLLÁR, Michal - OŽVAT, Aneta Alexandra - URBÁN, Jozef - JAROLÍMEK, Ivan - ŠIBÍK, Jozef. NaturaSat - A software tool for identification, monitoring and evaluation of habitats by remote sensing techniques. In Remote Sensing [elektronický zdroj]. Vol. 13, iss. 17 (2021), online, [19] s., art.no. 3381. ISSN 2072-4292 (2021: 5.349 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.283 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000694508100001; SCOPUS: 2-s2.0-85114022851; DOI: 10.3390/rs13173381. Kategória publikácie do 2021: ADC

PARK, Seol Ah - SIPKA, Tamara - KRIVÁ, Zuzana - LUTFALLA, Georges - NGUYEN-CHI, Mai - MIKULA, Karol. Segmentation-based tracking of macrophages in 2D+time microscopy movies inside a living animal. In Computers in Biology and Medicine. No. 153 (2023), [22] s., art. no. 106499. ISSN 0010-4825 (2022: 7.7 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.222 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85145355159; CC: 000918038000001; DOI: 10.1016/j.compbio.2022.106499. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

SIPKA, Tamara - PARK, Seol Ah - OZBILGIC, Resul - BALAS, Laurence - DURAND,

Thierry - MIKULA, Karol - LUTFALLA, Georges - NGUYEN-CHI, Mai. Macrophages undergo a behavioural switch during wound healing in zebrafish. In *Free Radical Biology and Medicine*. No. 192 (2022), s. 200-212. ISSN 0891-5849 (2022: 7.4 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.625 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85139285698; CC: 000933868600004; DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2022.09.021. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

HAHN, Jooyoung - MIKULA, Karol - FROLKOVIČ, Peter - PRIESCHING, Peter - BALAŽOVJECH, Martin - BASARA, Branislav. Second-order accurate finite volume method for G-equation on polyhedral meshes. In *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*. Vol. 40, iss. 2 (2023), s. 1053-1082. ISSN 0916-7005 (2022: 0.9 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.374 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000988735600013; SCOPUS: 2-s2.0-85151133678; DOI: 10.1007/s13160-023-00574-x. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

HAHN, Jooyoung - MIKULA, Karol - FROLKOVIČ, Peter - BASARA, Branislav. Finite volume method with the Sonner boundary condition for computing the signed distance function on polyhedral meshes. In *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 123, iss. 4 (2022), online, s. 1057-1077. ISSN 0029-5981 (2022: 2.9 - IF, Q2 - JCR Best Q, 1.043 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000727237700001; DOI: 10.1002/nme.6888; SCOPUS: 2-s2.0-85120657496. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

MINARECHOVÁ, Zuzana - MACÁK, Marek - ČUNDERLÍK, Róbert - MIKULA, Karol. On the finite element method for solving the oblique derivative boundary value problems and its application in local gravity field modelling. In *Journal of geodesy*. Vol. 95, no. 6 (2021), [19] s., art. no. 70. ISSN 0949-7714 (2021: 4.809 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.725 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000660556200001; SCOPUS: 2-s2.0-85107683478; DOI: 10.1007/s00190-021-01522-8. Kategória publikácie do 2021: ADC

MACÁK, Marek - MINARECHOVÁ, Zuzana - TOMEK, Lukáš - ČUNDERLÍK, Róbert - MIKULA, Karol. Solving the fixed gravimetric boundary value problem by the finite element method using mapped infinite elements. In *Computational Geosciences*. Vol. 27, no. 4 (2023), s. 649-662. ISSN 1420-0597 (2022: 2.5 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.806 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 001038331100007; SCOPUS: 2-s2.0-85163955312; DOI: 10.1007/s10596-023-10224-3. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

FROLKOVIČ, Peter - ŽERAVÝ, Michal. High resolution compact implicit numerical scheme for conservation laws. In *Applied Mathematics and Computation*. No. 442 (2023), [17] s., art. no. 127720. ISSN 0096-3003 (2022: 4 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.962 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000903958900005; SCOPUS: 2-s2.0-85145559681; DOI: 10.1016/j.amc.2022.127720. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

GÄRTTNER, Stephan - FROLKOVIČ, Peter - KNABNER, Peter - RAY, Nadja. Efficiency of micro-macro models for reactive two-mineral systems. In *Multiscale Modeling and Simulation*. Vol. 20, no. 1 (2022), s. 433-461. ISSN 1540-3459 (2022: 1.6 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.855 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85128013407; DOI: 10.1137/20M1380648. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky projektu sa uplatnia predovšetkým v environmentalistike a ochrane prírody a biodiverzity Zeme, ďalej vo vývojovej biológii a imunológii pri analýze správania makrofágov pri odozve imunitného systému na zápaly, pri sledovaní variácií tiažového poľa Zeme a presunov hmôt vplyvom klimatickej zmeny a optimalizácii emisií skleníkových plynov pri procesoch horenia v spaľovacích motoroch.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Ciele projektu boli splnené. Bolo vytvorených 45 originálnych vedeckých prác, ktoré boli publikované v renomovaných karentovaných časopisoch a zborníkoch z významných medzinárodných vedeckých konferencií v oblasti aplikovanej matematiky, matematického a numerického modelovania a spracovania veľkorozmerných dát, predovšetkým

mikroskopického a satelitného obrazu a videa. V prvom rade, bol vytvorený a publikovaný nový algoritmus hlbokého strojového učenia na báze dopredno-spätných parciálnych diferenciálnych difúzných rovníc na neorientovaných a orientovaných grafoch, pomocou ktorého sa podarilo s doposiaľ najvyššou presnosťou automaticky klasifikovať chránené biotopy Natura 2000 zo snímok družice Sentinel-2 Európskej vesmírnej agentúry ESA. Ďalej sa podarilo vytvoriť a publikovať efektívne a presné algoritmy na segmentáciu a tracking imunitných buniek (makrofágov) vo videách konfokálnej mikroskopie, umožňujúce s viac ako 97% presnosťou extrahovať ich trajektórie a ďalšie morfo-kinetické charakteristiky. Boli tiež vytvorené algoritmy na zhladenie trajektórií a rekonštrukciu rýchlostného poľa spôsobeného chemoatraktívnym gradientom ako aj metódy na štúdium náhodného správania makrofágov počas imunitných reakcií. Ďalej boli vytvorené efektívne paralelné výpočtové metódy na určovanie gravitačného poľa Zeme na báze metódy konečných prvkov a konečných objemov, ktoré riešia originálnu nelineárnu geodetickú okrajovú úlohu, respektíve okrajovú úlohu so šikmou deriváciou na vonkajšej nekonečnej oblasti mimo povrchu Zeme. Tieto metódy boli aplikované na presné určovanie kvázigeoidu v oblasti Hong Kongu a amerického štátu Colorado. V rámci riešenia projektu boli tiež dosiahnuté originálne výsledky v aplikácii level-set metód na modelovanie šírenia frontu horenia v spaľovacích motoroch. Bola vytvorená a publikovaná nová metóda konečných objemov pre tzv. G-rovnicu, ktorá obsahuje vplyv externého rýchlostného poľa a vplyv krivosti na pohyb frontu horenia. Takisto sa nám podarilo vytvoriť nové efektívne algoritmy na výpočet funkcie vzdialenosti pomocou riešenia tzv eikonalovej rovnice a navrhli sme práve eikonalovú rovnicu ako prirodzenú okrajovú podmienku pre level-set metódu. Na riešenie level-set a ďalších typov hyperbolických rovníc ako aj riešenie nelineárnych zákonov zachovania sme vytvorili nové semi-implicitné kompaktné numerické schémy, ktoré sú stabilné pre vysoké Courantove čísla a dávajú druhý, prípadne aj vyšší rád presnosti, pre hladké riešenia takýchto úloh. Všetky vytvorené metódy a postupy majú veľký potenciál využitia v praxi, najmä v ochrane prírody a jej biodiverzity, optimalizácii emisií skleníkových plynov a sledovaní variácií tiažového poľa v súvislosti s klimatickou zmenou.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The objectives of the project were met. 45 original scientific works were created, which were published in renowned peer-reviewed journals and proceedings of international scientific conferences in the field of applied mathematics, mathematical and numerical modeling and processing of large-scale data, primarily microscopic and satellite image and video. First of all, a new deep-learning algorithm based on forward-backward partial differential diffusion equations on undirected graphs was created and published, with the help of which it was possible to automatically classify protected habitats Natura 2000 from the images of the Sentinel-2 satellite of the European Space Agency ESA with the highest accuracy so far. Furthermore, it was possible to create and publish efficient and accurate algorithms for the segmentation and tracking of immune cells (macrophages) in confocal microscopy videos, allowing extraction of their trajectories and other morpho-kinetic characteristics with more than 97% accuracy. Algorithms for smoothing the trajectories and reconstructing the velocity field caused by the chemoattractive gradient as well as methods for studying the random behavior of macrophages during immune reactions were also created. Furthermore, effective parallel computational methods for determining the Earth's gravity field were created based on the method of finite elements and finite volumes, which solve the original nonlinear geodetic boundary value problem, respectively the boundary value problem with an oblique derivative on the outer infinite region outside the Earth's surface. These methods were applied to the precise determination of the quasi-geoid in the area of Hong Kong and the American state of Colorado. As part of the project solution, original results were also achieved in the application of level-set methods for modeling the propagation of the combustion front in internal combustion engines. A new finite volume method for the so-called G-equation, which includes the effect of the external velocity field and the effect of curvature on the motion of the flame front was developed. We also managed to create new effective algorithms for calculating the distance function using the solution of the so-called eikonal equation, and we proposed the eikonal equation as a natural boundary condition for the level-set method. For solving level-set and other types of hyperbolic equations as well as solving nonlinear conservation laws, we have created new semi-implicit compact numerical

schemes that are stable for high Courant numbers and give second or even higher-order accuracy for smooth solutions of such problems. All created methods and procedures have a great potential for use in practice, especially in the protection of nature and its biodiversity, optimization of greenhouse gas emissions and monitoring of gravity field variations in connection with climate change.