

Analiza termalnih anomalija u okruženju neeksplozivnih sredstava

Dejan Blagojević, Zoran Milivojević

Katedra za Informatičko-komunikacione tehnologije
Akademija Tehničko Vaspitaskih Strukovnih Studija
Niš, Srbija

dejan.blagojevic@akademijanis.edu.rs,
zoran.milivojevic@akademijanis.edu.rs

Bojan Glamoclija, Jelena Krstic

Centar za razminiranje Republike Srbije
Beograd, Srbija

bojan.glamoclija@czrs.gov.rs
jelena.krstic@czrs.gov.rs

Sažetak— Osnovni cilj ovog rada jeste pokušaj unapređenja metodologije primene tehnike termalnog mapiranja u ne tehničkom izviđanju terena na kojem su izvođenja borbena dejstva i na kojima su prisutni ostaci neeksplozivnih sredstava UXO. Analiza termalnih fotografija dobijenih tokom vazdušnih izvođenja sprovedena standardnim metodama au DJI Therlam tools okruženju da bi nakon toga bila proširena primenom dvodimenzionalne Gausove raspodele. Na ovaj način nastavljena su istraživanja u pravcu stvaranja okvira za preciznije odlučivanje u postupku detekcije UXO. Kao platforma je korišćena je konvencionalna UAV MATRICE 300 RTK DJI beopilotna letilica tipa copter, H20t DJI dualna kamera. Eksperiment je sproveden na poligonima Centra za razminiranje Republike Srbije u Grockoj.

Gljučne reci: *deminiranje, mapiranje termalna analiza, luminansa, gausova raspodela, modeliranje*

I. UVOD

U poslednje vreme, sve organizacije i mednarodna tela, koja se bave razminiranjem, suočavaju se sa ključnim pitanjem efikasnosti napora u čišćenju zemljišta. Situaciju dodatno komplikuje činjenica da opšte procene i istraživanja uticaja često preteruju u pogledu obima problema označavajući velike površine kao sumnjive [1]. Razlikovanje između terena koje stvarno predstavlja ozbiljan rizik po lokalno stanovništvo i ostaka koje je pod određenom sumnjama jeste složen i komplikovan zadatak [2].

Ovi složeni izazovi su podstakli dubinsku reviziju metodologija unutar sektora koji se bavi razminiranjem. Postoji hitna potreba za ponovnim razmatranjem perspektiva, procesa i metodologija vezanih za oslobodjenje zemlje koje su klasifikovane kao standardne operacione procedure SOP. Ovo ponovno razmatranje dobija na važnosti zbog nadolazećih rokova povezanih sa međunarodnom konvencijom o zabrani mina. Države i šira zajednica koja se bavi razminiranjem aktivno prihvataju nedavno razvijene koncepte oslobodjenja zemlje kako bi uspostavili sveobuhvatne okvire za svoje aktivnosti [3-5]. Osnovni cilj ovog istraživanja jeste da predloži i potvrdi efikasnu metodologiju za mapiranje minskih polja putem snimanja terena pomoću bespilotnih letilica

primenom različitih tehnologija sa jedne strane i razvojem metodologija za analizu i obradu prikupljenih podataka.

U ovom kontekstu, za potrebe ovog rada obezbeđena je adekvatna oprema, konvencionalna UAV (Bespilotna Vazduhoplovna Letelica) tipa Matrice 300 RTK opremljena ha H20t DJI dualnom kamerom. Metodologija istraživanja zasnivala se na pretpostavkama činjenicama da podaci o fizičkim svojstvima površine zemlje sadrže pokazateljne informacije o prisustvu/odsustvu mina na odgovarajućem području. Zatim da se podaci o fizičkim svojstvima površine dobijaju se putem preciznih senzora za snimanje, instaliranih na mobilnoj vazdušnoj platformi [5].

Konačno, odluka o prisustvu/odsustvu mina donosi se na osnovu sveobuhvatne analize podataka dobijenih različitim senzorima ugrađenim na platformi. Rezultati u velikoj meri zavise od uslova snimanja, i karakteristika kamere kao i njene kalibracije ali i metodologije obrade prikupljenih snimaka.

II. METODOLOGIJA SNIMANJA IZ VAZDUHA

Planiranje vazdušnih snimaka se sprovodi u skladu s postojećim instruktivnim i metodološkim dokumentima, uz pažljivo razmatranje geografskih detalja i specifikacija opreme (sl.1). Ovaj proces takođe uzima u obzir konkretne operativne zahteve korisnika, kao što su maksimalno dopušteno vreme za izvršenje zadatka, željena preciznost izlaznog proizvoda i potrebni nivo zaštite informacija [6. 7].

Što se tiče geografskih podataka, ključne informacije o teritoriji uključuju precizne koordinate područja od interesa. Dodatno, obuhvata se sveobuhvatno razumevanje konfiguracije terena, uključujući detalje poput vrste zemljišta, pokrivača vegetacije i prisustva eventualnih veštačkih objekata. Takođe, u procesu planiranja uzimaju se u obzir informacije o očekivanoj kategoriji mina, razlikujući između protiv pešadijskih i protivtenkovskih mina.

Uključivanjem ovih faktora, planiranje vazdušnih snimaka ima za cilj da se uskladi sa specifičnim potrebama i preferencijama korisnika, istovremeno obezbeđujući temeljnu i detaljnu procenu određenog položaja. Zadatak planiranja vazdušnih snimaka je uspostavljanje rute, izračunavanje visine

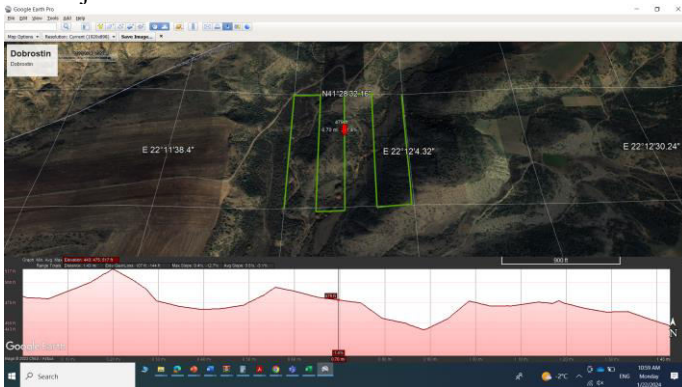
Ukoliko postoje sponzori, navesti ih ovdje. U protivnom, obrisati ovaj text box. (sponsors)

leta UAV-a i učestalosti akvizicije slika nad teritorijom. Ruta se uspostavlja na osnovu zahteva za potpuno pokrivanje celog područja minskog polja i obezbeđivanje zadatog poprečnog preklapanja (obično 40-60%). Visina UAV-a se izračunava na osnovu potrebnog broja piksela unutar pojedinačne slike minskog segmenta - najmanje 50-70 piksela po segmentu mina. Učestalost snimanja teritorije po okvirima treba obezbediti potrebnu vrednost uzdužnog preklapanja (obično 30-40%) slika formiranih od strane ugrađenog senzora [8, 9, 10].

Proces izvođenja vazdušnog snimanja podrazumeva tipičnu rutu leta bespilotne letelice (UAV) tokom snimanja određenog područja (sl.1). Ključni parametri leta i kontrole tokom procesa snimanja su programabilni, što omogućava precizno podešavanje u skladu sa zahtevima. Posebna pažnja se posvećuje dugotrajnosti prethodno procenjene visine leta i sinhronizaciji rada kamere.

Tokom izvođenja vazdušnog snimanja, UAV prati unapred određenu rutu, a kontrolisani parametri omogućavaju optimalnu pokrivenost celog područja od interesa. Ovaj proces je pažljivo planiran kako bi se obezbedila kompletna dokumentacija terena, uzimajući u obzir specifičnosti svakog segmenta područja.

Programabilnost leta omogućava prilagodljivost u skladu sa zahtevima zadatka, a pažljivo podešavanje visine leta i sinhronizacije kamere osigurava kvalitetne rezultate snimanja. Ova sposobnost programiranja omogućava optimizaciju leta u skladu sa specifičnostima terena, obezbeđujući celovitost i tačnost podataka koji se prikupljaju tokom vazdušnog snimanja.



Slika 1. Prikaz terena sa planiranom rutom letenja koji je bio predmet izvidjanja putem UAV u Google Earth pro.

Svaki element ispitivanog područja istovremeno je zabeležen na dve digitalne slike: termalna i konvencionalna u prirodnim bojama. Termalna slika registruje vrednosti temperature površine zemlje u svakom pikselu. Slika u boji sadrži informacije o terenu u ujedinjenom RGB (crvena, zelena, plava) prikazu. U zavisnosti od zahteva i dostupnih tehničkih mogućnosti, puna količina podataka registrovanih pomoću ugrađenih senzora može biti zabeležena na skladištu na letelici ili preneti na zemaljsku stanicu za prijem i obradu. Svaka od ovih slika pruža specifične informacije o ispitivanom području, omogućavajući analizu pod različitim aspektima i spektralnim opsezima. Ova kombinacija slika

obezbeđuje sveobuhvatne podatke o terenu, a mogućnost zadržavanja ili prenosa podataka prilagođava se potrebama i tehničkim mogućnostima projekta. Međutim preciznost podataka i njihova projekcija ostaju i dalje diskutabilni iz više razloga.

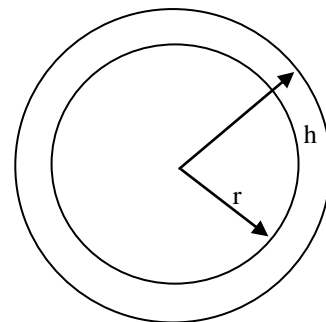
U našem slučaju za prikaz terena, korišćen je Pix4D Mapper. Po pravilu, usluge većine komercijalnih letelica uključuju softverske pakete za planiranje misija aero fotografije, koji često sadrže fotogrametrijske module za kompilaciju mozaika slika. Primena PIX4D omogućava kreiranje mozaik slika u više spektralnih kanala MM (sastoji se od L slojeva, koji odgovaraju broju slika pojedinih spektralnih kanala), zatim kreiranje mozaika termalnih infracrvenih slika MT. Ovaj mozaik je jednoslojan, mozaik u boji sa RGB slikama. Bitno je istaći da svi mozaici slika imaju isti broj piksela (označen kao K), i odgovarajući pikseli mozaika slika imaju isti broj. U daljem MM i MT mozaici slika se obrađuju i analiziraju radi detekcije mina i formiranja mape minskog polja standardnim metodama [11].

Veličina GSD (geometrijski razmak između piksela) se projektuje na jedan piksel bilo koje pojedinačne slike spektralnog pojasa. Ako je veličina GSD-a oko 1-3 cm, tada je to mnogo manje od realnog prečnika segmenta terena. Da bi se smanjila slučajna varijabilnost signala piksela, potrebno je izvršiti adekvatne operacije na mozaiku slika. Ove operacije se izvodi u ciklusu s tzv *sliding windows*-om čiji je prečnik izračunava kao

$$r = \sqrt{\frac{G}{\pi}} \quad (1)$$

III. ANALIZA TEMPERATURNIH ANOMALIJA

U analizi MT slike mozaika, moguće lokacije mina i p^{MT} verovatnoća svake detekcije mine mogu se u velikoj meri odrediti lokalnim temperaturnim anomalijama. Da bi se osigurala jednaka površina i anomalije i pozadine, centralni *sliding windows* radijusa r , izračunat prema jednačini (1), trebalo bi da bude okružen prstenom sa dodatnim radijusom h :



Slika 2 Sliding window sa prstenom

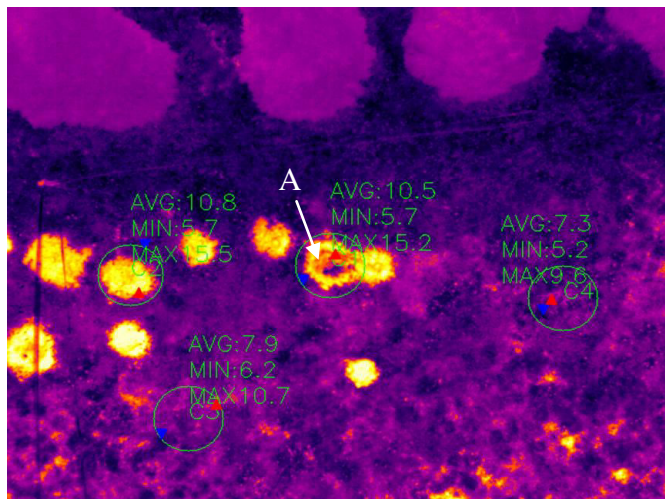
Pri čemu h je

$$h = 0.41r \quad (2)$$

Predmet naše analize bile su RGB i termalne slike sa prisitvno UXO na terenu (sl. 3 i sl. 4). Snimci su uradjeni pod standanim vremenskim uslovima sa visne od 60 m



Slika 3. Deo terena kontaminiran sa UXO

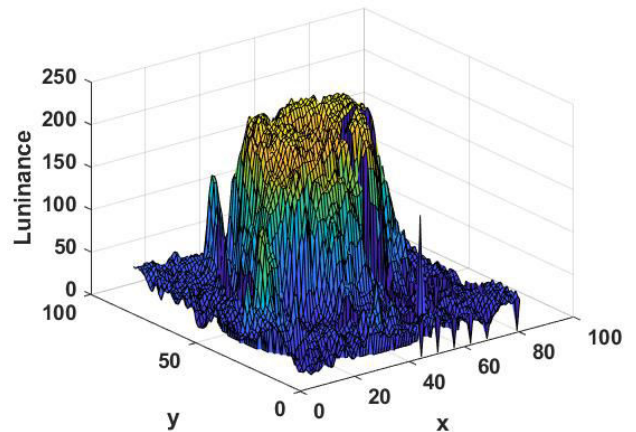


Slika 4. Termalni prikaz kontaminiranog dela terena

Nakon analize slike u odgovarajućem programskom okruženju, DJI Thermal tool, izdvojene su tačke od interesa, koje us bile predmet dalje analize. U prvom koraku u okviru MATLAB-a, a na osnovu izdvojenog segmenta označenog sa tačkom A (sl.4), koji sadrži UXO, izvršen je proračun prostorne luminance segmenta u cilju preciznije analize prisutnog UXO i njegovih karakteristika u odnosu na okruženje (sl.6 i sl.7). U narednom koraku uvedena je dvodimenzionalna Gauss-ova raspodela

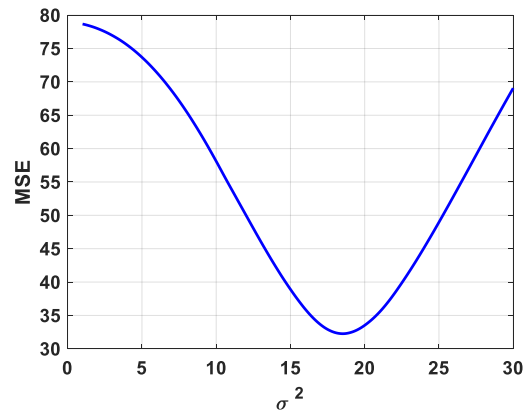
Korišćenjem dvodimenzionalne Gauss-ove raspodele, možemo identifikovati ključne karakteristike slike, uključujući vrhove, minimume i oblik raspodele. Ovo je od suštinskog značaja u mnogim aplikacijama, uključujući prepoznavanje oblika, segmentaciju slika i druge oblasti analize slika, što u našem slučaju može biti od velike korsiti. Prilagođavanje parametara dvodimenzionalne Gauss-ove raspodele omogućava optimizaciju modela prema konkretnim karakteristikama termalnih anomalija UXO i okruženja. Osetljivost na promene u varijansi ili drugim parametrima omogućava prilagođavanje analize različitim uslovima. Na osnovu modela Gauss-ove raspodele, moguće je klasifikovati

regione na slici, prema verovatnoći prisustva mina. Ova klasifikacija može pomoći u prioritizaciji područja koja zahtevaju dodatnu pažnju ili istraživanje.

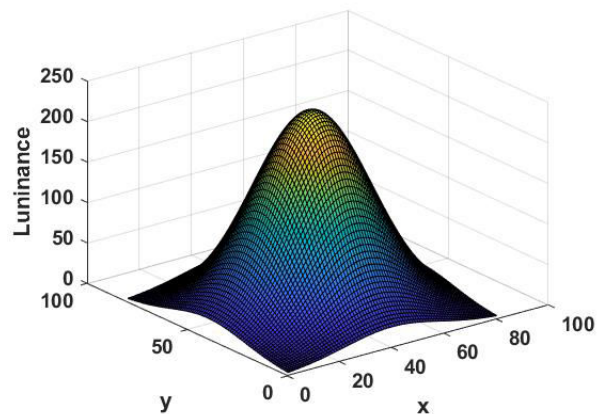


Slika 5 Prikaz prostorne raspodele luminance analiziranog segmenta

Procesom minimizacije srednje kvadratne greške između prostorne raspodele sjajnosti (sl. 6) i dvodimenzionalne Gauss-ove raspodele (dobijena je optimalna vrednost Gauss-ove raspodele sa varijansom σ_{opt}^2 na osnovi MSE, i to na poziciji minimuma MSE

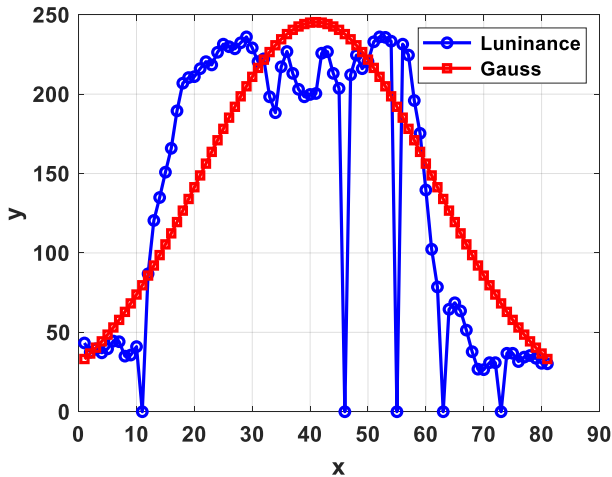


Slika 6. Prikaz mimimuma MSE

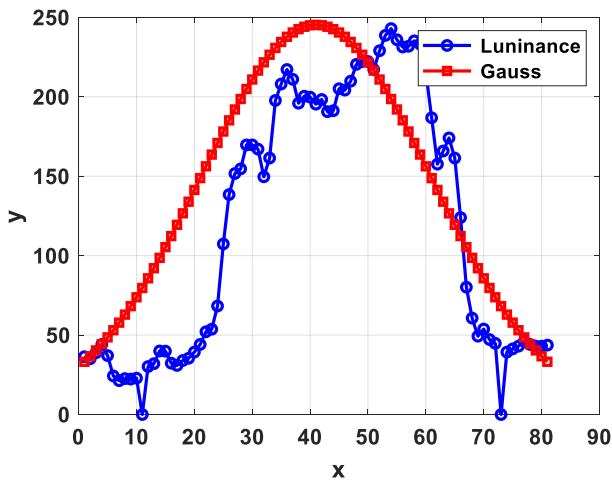


Slika 7- Prikaz prostorne raspodele luminance analiziranog segmenta sa određenom optimalnom vrednošću varijanse

U daljoj analizi sprovedeno poređenje raspodele luminoznosti sa dvodimenzionalnom Gauss-ovom raspodelom, duž x i duž y ose, u cilju stvaranja mogućnosti za ocenu koliko dobro model Gauss-ove raspodele odgovara stvarnim svetlosnim karakteristikama slike (sl.8 i sl.9).



Slika 8 Poređenje rasodela luminase i dvo dimenzionlane Gausove raspodele duž x ose,



Slika 9 Poređenje rasodela luminase i dvo dimenzionlane Gausove raspodele duž y ose,

Proučavanjem srednje kvadratne greške (MSE) između stvarne raspodele luminoznosti na slici i modelirane Gausove raspodele, možemo proceniti koliko je dobro model prilagođen stvarnim podacima. Manja vrednost MSE ukazuje na precizniji model, što u našem slučaju i postignuto.

IV. DISKUSIJA

Već smo istakli da primena dvodimenzionalne Gauss-ove raspodele predstavlja efikasan prilagodljiv model za aproksimaciju prostorne raspodele sjajnosti na slici. Gausova raspodela, kao široko korišćen model, adekvatno opisuje različite tipove raspodele svetlosti. Proces minimizacije srednje kvadratne greške, doprinosi postizanju optimalne

vrednosti Gausove raspodele. Ovaj rezultat ukazuje na precizno odražavanje ključnih karakteristika prostorne raspodele sjajnosti, što obuhvata identifikaciju vrhova, minimuma i oblika raspodele.

Važno je naglasiti da ovaj proces omogućava preciznu korekciju slike, čime rezultujuća Gausova raspodele što vernije odražava stvarnu prostornu raspodelu sjajnosti. Ova preciznost ima poseban značaj u situacijama gde je tačnost rekonstrukcije od suštinskog značaja, kao što je slučaj u medicinskoj dijagnostici ili obradi satelitskih slika.

Metrika srednje kvadratne greške (MSE) služi kao evaluacioni pokazatelj, merenjem prosečne kvadratne greške između stvarne i modelirane raspodele. Minimizacija MSE ukazuje na uspešno prilagođavanje modela prostornoj raspodeli sjajnosti, postizujući visok stepen preciznosti u analizi slike. Gausova raspodela može precizno identifikovati vrhove, minimume i oblik raspodele luminoznosti. Poređenjem ovih karakterističnih tačaka sa stvarnim raspodelama, možemo proceniti koliko dobro model odražava ključne osobine slike.

U kontekstu obrade termalne slike, MSE može imati značajnu ulogu u nekoliko aspekata. Termalne kamere često imaju inherentne karakteristike i greške u merenjima, poput nepreciznosti kalibracije, nehomogenosti senzora ili termičkih efekata. Minimizacija srednje kvadratne greške može se primeniti za prilagođavanje termalne slike kako bi se ispravile ove greške i poboljšala tačnost merenja. Prilikom detekcije i segmentacije objekata na termalnim slikama, minimizacija srednje kvadratne greške može se koristiti za prilagođavanje modela kontura ili regiona objekata sa stvarnim termalnim podacima.

Ovo može poboljšati preciznost detekcije i identifikacije termičkih oblika. U aplikacijama gde je potrebno generisati termalne mape ili distribucije temperature na osnovu merenja, minimizacija srednje kvadratne greške može pomoći u prilagođavanju modela koji opisuje termičke karakteristike scene. Ovo je posebno važno u termografskim inspekcijama ili medicinskim termalnim slikama. U situacijama gde termalne slike pate od šuma, zamućenja ili drugih artefakata, primena minimizacije srednje kvadratne greške može doprineti restauraciji slike. Ovaj pristup može smanjiti uticaj šuma i poboljšati kvalitet termalnih podataka. Minimizacija srednje kvadratne greške može se koristiti za kalibraciju termalnih senzora. Ovaj proces pomaže u postizanju što preciznijeg odnosa između očitavanja termalne kamere i stvarnih temperatura objekata.

Kad je potrebno analizirati temperaturne profile na termalnoj slici, primena minimizacije srednje kvadratne greške može doprineti boljem prilagođavanju modela temperaturnih varijacija. Opisan način, moguće je preći sa detekcije tačkastih anomalija na termalnoj slici na statističku detekciju anomalija u termalnom mozaiku koji odgovara veličini segmenta mina

V. ZAKLJUČAK

Deminiranje postaje sve veći izazov savremnog društva. Kombinacije dostupnih tehnologija koj omogućavaju

prikupljen velikog borj ainformacija u realnom vremenu kao i alati za njihovu obradu daju dboru osnovu za unapređenja stanja uovoj oblasti.

Primena dvodimenzionalne Gausove raspodele u analizi termalnih slika se pokazala izuzetno efikasnom i prilagodljivom metodom za identifikaciju ključnih karakteristika prostorne raspodele sjajnosti. Kroz proces minimizacije srednje kvadratne greške postignuta je optimalna vrednost Gausove raspodele, što ukazuje na precizno odražavanje stvarnih svetlosnih karakteristika slike. Ova metoda se pokazala korisnom u analizi termalnih anomalija, posebno u detekciji i karakterizaciji neeksploziviranih mina. Kombinacija vizualne usklađenosti, matematičkih mera i optimizacije parametara omogućila je stvaranje modela koji tačno opisuje prostornu raspodelu sjajnosti na termalnim slikama. Pored toga, primenom ove metode moguće je klasifikovati regione na slici prema verovatnoći prisustva mina, što pruža praktičan alat za prioritizaciju područja koja zahtevaju dodatnu pažnju ili istraživanje. Ovakav pristup ima široku primenu, od vojnih operacija do civilnih oblasti i doprinosi unapređenju tehnologija za detekciju i analizu termalnih slika u različitim aplikacijama.

LITERATURA

- [1] BALL, M. Landmine Detection with Drones. *Unmanned Systems Technology* [online], 2021. Available from: <https://www.unmannedsystems.com/2021/08/landmine-detection-with-drones/>
- [2] *Detectors and Personal Protective Equipment Catalogue* [online]. Geneva: GICHD, 2009, . Available from: <https://www.files.ethz.ch/isn/97269/Metal-Detectors-Catalogue-2009.pdf>
- [3] GE, E Y., A. KAKILLI, O. KILIÇ, H. ÇALIK, H. ÇITAK, S. NAZLIBILEK and O. KALENDER. Performance Analysis of Techniques Used for Determining Land Mines. *International Journal of Geosciences*, 2014, 5(10), pp. 1163-1189. DOI 10.4236/ijg.2014.510098.
- [4] MAATHUIS, B.H.P. Remote Sensing Based Detection of Minefields. *Geocarto International*, 2003, 18(1), pp. 51-60. DOI 10.1080/10106040308542263.
- [5] GAUR, P. and T. CHOUDHARY. Aerial Landmine Detection. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, 7(3.34), pp. 710-713. DOI 10.14419/ijet.v7i3.34.19457.

- [7] FARDOULIS, J., X. DEPREYTERE, P. GALLIEN, K. DJOUHRI, B. ABDOURHMANE and E. SAUVAGE. Proof: How Small Drones Can Find Buried Landmines in the Desert Using Airborne IR Thermography. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 2020, 24(2), pp. 55-63. DOI 10.5281/zenodo.4409641.
- [8] RAJ, A., I. RAFIQ, A.J. GOWDA and L.S. KRISHNA. Landmines Detection Using UAV. *International Research Journal of Engineering and Technology* [online], 2019, 6(4), pp. 2716-2719. Available from: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I4577.pdf>
- [9] CASTIBLANCO, C., J. RODRIGUEZ, I. MONDRAGON, C. PARRA and J. COLORADO. Air Drones for Explosive Landmines Detection. In: ARMADA, M., A. SANFELIU and M. FERRE, eds. *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, 2014, pp. 107-114. ISBN 978-3-319-03652-6.
- [10] COLOMINA, I. and P. MOLINA. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92, pp. 79-97. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- [11] RACEK, F., T. BALÁŽ T. and P. MELŠA. Hyperspectral Data Conversion in the Case of Military Surveillance. *Advances in Military Technology* [online], 2015, 10(1), pp. 5-13. Available from: <https://aimt.cz/index.php/aimt/article/1054>

ABSTRACT

The main goal of this work is an attempt to improve the methodology of applying the mapping technique using unmanned aerial vehicles in non-technical reconnaissance of the terrain where combat operations are being carried out. The conducted research and the expected results should confirm and validate the effectiveness of existing methodologies for mapping minefields using drones. Expanded with elements of the application of appropriate mathematical distributions as a basis for decision-making in critical situations. As a platform, a conventional UAV MATRICE 300 RTK DJI unmanned aerial vehicle type copter, H20t DJI dual camera was used, the experiment was conducted at the training ground of the Center for Demining of the Republic of Serbia in Grocka.

ANALYSIS OF THERMAL ANOMALIES IN THE ENVIRONMENT OF UNEXPLODED ORDNANCE

Dejan Blagojević, Zoran Milivojević, Bojan Glamočlija,
Jelena Krstic