



1. ábra. A 3D-s modellek előállításához alkalmazott SUAV-t különféle mérőmodulokkal szerelték föl (Fotó: Molnár András)

Prof. dr. Molnár András*

Adatfúziós távérzékelési eljárások kis méretű pilóta nélküli légi járművek alkalmazásával

BEVEZETÉS

Hagyományos mérési módszerekkel komplex összefüggések nem, vagy csak nagyon nehezen mutathatók ki különböző mérési sorozatok vagy adatok között. A modern

robotrepülőgépes távérzékelés jó lehetőséget biztosít számos mérés egyazon időtartományban történő elvégzésére és rögzítésére. [1] [2] [3] [4] Amennyiben a mérési adatok rögzítése során biztosítani lehet az adatkapcsolatot az egyes mérések között, úgy a független mérési sorok ké-

ÖSSZEFOGLALÁS: Azonos időben történő, látszólag független adatok rögzítése során létrehozhatók idő szerint összekapcsolt adatstruktúrák, amelyeket „n” dimenziós adathalmaznak is tekinthetjük. A halmaz egyes elemei között ismert a kapcsolat, így lehetőség nyílik tetszőleges adatcsoportok egymás függvényében történő kiértékelésére, elemzésére. A kis méretű pilóta nélküli légi járművekkel vagy – angol terminológia szerint SUAV-kkel (Small Unmanned Air Vehicle) – végzett távérzékelés során gyűjtött mérési adatok ilyen értelmű tárolása és feldolgozása különösen előnyös, mivel lehetőséget biztosít komplex összefüggések feltárására vagy a hagyományos mérési és feldolgozási eljárásokhoz képest érzékenyebb, szelektívebb változások kimutatására. A módszer jól alkalmazható hagyományos, egydimenziós adatsorok összekapcsolására, de ugyanilyen eredményes akár több detektorral készített, egymástól független, de egymáshoz kapcsolt képi adatok esetén is. Természetesen kombinált adatstruktúrák esetén is jó eredmények érhetők el például képi információkhoz kapcsolt egydimenziós adatokkal. Hasonlóan érdemi információk nyerhetők ki rendkívül zajos egydimenziós mérési eredményekhez kapcsolt kétdimenziós helyadatok komplex elemzése során.

KULCSSZAVAK: többdimenziós adatstruktúra, adatfúzió, többdimenziós adatelemzés, SUAV, távérzékelés

ABSTRACT: By capturing concurrent, seemingly independent data, time-linked data structures can be created. These linked data structures can also be considered as “n”-dimensional data sets. The relationship between the individual elements of the set is known, so it becomes possible to evaluate and analyze arbitrary data groups in a mutually dependent way. Storing and processing measurement data collected in this sense during remote sensing with drones is particularly advantageous, as it provides an opportunity to explore complex connections or to detect more sensitive, selective changes compared to conventional measurement and processing methods. The method is well-suited for the interconnection of conventional, one-dimensional data sets, but is equally effective even for independent but interconnected image data created using multiple detectors. Naturally, in the case of combined data structures, good results can be achieved too, for example, with one-dimensional data linked to image information. Equally meaningful information can be obtained in the complex analysis of two-dimensional spatial data linked with extremely noisy one-dimensional measurement results.

KEY WORDS: multidimensional data structure, diffusion, multidimensional data analysis, remote sensing using drones

* Óbudai Egyetem, Neumann János Informatikai Kar. ORCID: 0000-0003-4330-6547

sőbbi analízisekor ezen kapcsolatok felhasználhatók. Ilyen lehet például egy hőmérő szenzor adatsora, amelyet a repülés során rögzített a rendszer. Ez az adatsor csupán annyi információt tartalmaz, hogy az időben egymást követő hőmérsékletértékek miként változtak (emelkedett, csökkent vagy éppen állandó volt a hőmérséklet) vagy mekkora volt a maximum-/minimumérték. Ugyanakkor, ha a repülés során a magassági adatokat is rögzítették oly módon, hogy minden mért hőmérsékletértékhez rögzítették a mérés pillanatában a magasság- (vagy fordítva, minden mért magassághoz a mérés pillanatába rögzítették a hőmérséklet-) adatot is, akkor lehetőség van például a hőmérsékleti adatok elemzése során az értékek magasság függvényében történő vizsgálatára. Ez esetben beszélhetünk 2 dimenziós adatstruktúráról.

Mivel a robotrepülőgépek alapvetően rendelkeznek helymeghatározó rendszerekkel (GPS), kézenfekvő a mérési adatokhoz ezen rendszerek adatait is hozzákapcsolni. Ha csak a repülési nyomvonalat kívánjuk térben rekonstruálni, akkor is már 3 dimenziós adatstruktúráról beszélünk (földrajzi szélesség, földrajzi hosszúság és magasság). Amennyiben az ábrázolás során a magassági adatokat lecseréljük például hőmérsékleti adatokra, akkor a hőmérséklet területi változásairól kaphatunk információt (feltételezve, hogy a mérések azonos magasságban történtek).

A fentiek analógiáját követve létrehozható egy olyan „n” dimenziós adatstruktúra, amely az egyes adatok közötti összefüggések vizsgálatára alkalmas. Ebben az adatstruktúrában a dimenziószám („n”) megfelel az egyes mért jellemzők számának, amelyek mindegyike a hozzá tartozó adatsorokat tartalmazza. Ilyenek például a már említett hőmérséklet, a magasság, a légnyomás, a páratartalom vagy bármely más mérhető adatsor. A dimenziószám tehát a mért jellemzők számától függ.

A többdimenziós adatelemzés új összefüggések feltárására vagy már ismert összefüggések alapján szelektív adatvizsgálatra nyújt lehetőséget. Ilyen lehet például a magasság függvényében értékelt hőmérséklet-változás, amely segítségével jól látható módon lehet az inverziós réteg aktuális határait meghatározni, vagy a háttérsugárzás zajába vesző sugárforrás lokalizációja a sugárzás – terület függvényében történő elemzésével és ábrázolásával.

DETEKTOROK

A kis méretű pilóta nélküli légi járművel végrehajtott távérzékeléshez felhasználható szenzorok sora szinte végtelen. A szenzoroknak meg kell felelniük néhány alapkövetelménynek:

- a szenzornak kompakt kivitelűnek kell lennie. Ez azt jelenti, hogy a szenzor nem igényelhet bonyolult és főleg nagy méretű kiszolgáló rendszert (például referencia gázt biztosító gázpalackot vagy nagy méretű termosztátot stb.);
- alacsony energiafogyasztásúnak kell lennie, mivel a rendelkezésre álló energia erősen korlátozott;

- kis tömeggel kell rendelkeznie, mivel a hordozóeszközök erősen korlátozott tömegű hasznos terhet képesek szállítani;
- nagy érzékenység mellett gyors reakcióidejűnek kell lennie, hogy a repülőeszköz sebessége ne korlátozza a pontos mérési hely meghatározását.

A fenti feltételeknek megfelelő szenzort nagyon sok gyártó kínál, így nemcsak ember vezette repülőgépekhez [5], hanem SUAV-khoz is viszonylag egyszerűen készíthető speciális mérőegység. [6] Az 1. és a 2. ábrákon látható eszközöket különféle mérőmodulokkal szerelték fel. A tanulmányban bemutatott mérések mindegyike az ábrákon látható eszközök egyikével készült.

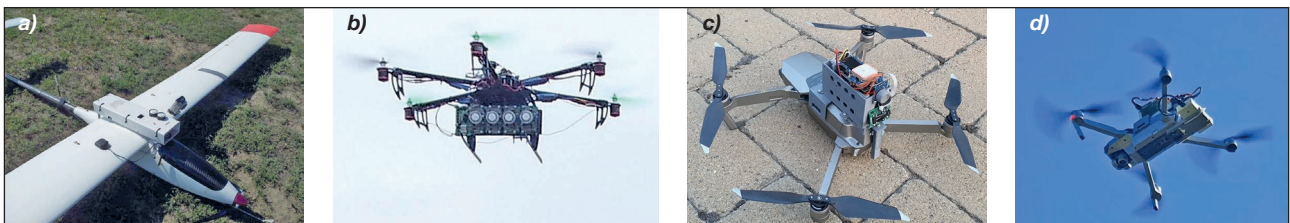
INFRAVÖRÖS ORTOFOTÓK ÉS 3D-S MODELLEK ELŐÁLLÍTÁSÁHOZ SZÜKSÉGES FELDOLGOZÁSI ELJÁRÁSOK

Az eljárás alapja az, hogy kihasználjuk az RGB¹ (Red-Green-Blue – vörös-zöld-kék) és az IR (Infrared – infravörös) képek kapcsolatát. A fotogrammetriai eljárást az RGB képen végezzük el, de az eljárás során kiszámított transzformációkat az IR képen is végrehajtjuk. Ez akkor lehetséges, ha a két kép egybevágó, azaz ugyanazt a területet tartalmazza ugyanabból a nézőpontból, azonos geometriai torzítással.

Mivel az RGB és az IR képek egybevágósága nem biztosított, az eljárás első eleme ennek létrehozása. Tekintettel arra, hogy az alkalmazott rendszerben az IR kép kisebb területet tartalmaz, mint az RGB kép, azaz az IR kép tartalma részhalmozza az RGB képet, az egybevágósági transzformációkat az IR kép paraméterein alapján kell elvégezni. Az eljárás további feltétele, hogy a két kamera egymáshoz rögzített, azaz a képek geometriai eltérései állandóak. További feltétel, hogy a képpárok azonos időpillanatban készüljenek. Az eljárás során nem képi tartalom, hanem előzetes mérések során meghatározott értékek szerinti nagyításokat, illetve eltolásokat kell végrehajtani az IR képen majd hasonló módon előre meghatározott csomópontokat kell elvégezni az RGB képen. A műveletek végzetével létrejönnek pixel méretben és tartalomban is megegyező RGB-IR képpárok. Az IR képen további konverziót kell végrehajtani. Az eredeti IR kép 14 bites, amelyet a konverzió során 8 bitesre kell konvertálni. Ez az átalakítás adatvesztéssel jár. Amennyiben elegendő a relatív hőmérsékleti viszonyok szemléltetése az ortofotón vagy a 3D-s modellen, akkor ez az adatvesztés nem okoz lényegi hibát. Természetesen a radiometriai adatok is elvesznek, ami azt jelenti, hogy a feldolgozott végeredményen hőmérsékletmérésre nem lesz lehetőség. Amennyiben az eredmények kiértékelése során szükséges a radiometriai adatok megőrzése, úgy lehetőség van a 14 bites hőkép 24 bitre történő kiegészítésére. A bemutatott eljárásban a hőképek 8 bites konverziója valósul meg.

Második lépésben az RGB kép szürkeárnyaltos konverziója történik meg úgy, hogy az RGB színes kép formátuma

2. ábra. A kísérletek során alkalmazott eszközök (Fotók: Molnár András)



megmarad. Ez azt jelenti, hogy a színes kép mindhárom színcsatornája azonos pixelinformációkat, azaz egymással egyenértékű szürkeárnyalatos képeket tartalmaz. Az így előállított szürke kép kék (B) színcsatornájának adatait le kell cserélni az előző lépésben már 8 bitesre konvertált IR kép adataira. Eredményül létrejön egy fuzionált kép, amelynek egyik színcsatornája (R) a szürke képet, a másik színcsatornája (B) a hőképet tartalmazza. A zöld színcsatorna adatai a továbbiakban nem kerülnek felhasználásra.

A speciálisan létrehozott, fuzionált kép alkalmas fotogrammetriai feldolgozásra. A kísérleteink során az Agisoft Photoscan szoftver segítségével elkészültek a fotogrammetriai feldolgozások, amelyek során IR ortofotók és IR 3D-modellek készültek. Az elkészült 3D-s modellek vagy ortofotók végül utófeldolgozással nyerték el a hőmérsékletfüggő, úgynevezett hamis színezést biztosító színpalettát.

Az utófeldolgozás során egy speciálisan erre a célra fejlesztett Matlab szoftverrel, a 3D-s modell esetén a textúráképeket, ortofotó esetén magát az ortofotót színeztük át. Ennek lényege, hogy a kék színcsatorna alapján (mivel ez tartalmazza az adott pixel hőmérsékleti információját) a kép teljes színe átíródik. Így létrejön egy mesterségesen színezett hőkép, ahol a pixel színe arányos az eredeti felület sugárzási hőmérsékletével. Az átszínező program – a jobb vizuális élmény biztosítása érdekében – lehetőséget nyújt a hőkép hisztogramjának² módosítására. A hisztogram módosításával élesebb kontraszt biztosítható, illetve a szem számára láthatóvá tehető a kismértékű hőmérsékletkülönbségek is. Igaz ugyan, hogy az utófeldolgozás ezen eleme többletinformációt nem szolgáltat, a kép azonban sokkal látványosabbá válik.

A vizuális élmény a már elkészült hőszínezésű modelleken (3D-s modell vagy ortofotó) élkimieléssel is fokozható. Az éleket a modelleken olyan színnel célszerű megjeleníteni, amely szín a hőképen nem szerepel. Ilyen lehet például az alkalmazott palettától függően a fekete vagy a fehér szín. A hőképen használt színektől jól elkülönülő, markáns kontúrral jobban értelmezhető végeredmény állítható elő.

HŐKÉPES ORTOFOTÓ EGY MELEG VÍZŰ FORRÁS KÖRNYÉKÉN

Dunaalmás határában található egy természetes hőforrás. A föld mélyéről 32 °C-os víz tör elő, amely a forrástól nem messze, a Dunába folyik. A forrás területéről 1200 (RGB és IR) képpár készült. Ezen képek segítségével készült el a 3. a) ábrán látható 1,5 cm/pixel terepi felbontású IR ortofotó. Jól látható a kép legvilágosabb területe, ahol a forrás 32 °C-os vize a felszínre tör. Innen, a képen jobb oldali irányba folyik el a meleg forrásvíz. A meleg vízű patak nyomvonala kissé hidegebbnek látszik az ortofotón, de a valóságban a fényképezett szakaszon a víz nem hűl ki. A patak felszínén vízínövények szaporodtak el, és ezek

„árnyékolják” a felszíni hőszugárzást. A felvétel készítése idején a levegő hőmérséklete 1 °C volt.

A 3. b) ábrán látható a forrás területének színes (RGB) ortofotója. A képen jól látható a forrás, és attól gáttal elválasztott eredeti patak. Az emberi szem számára természetes színes képen nincs különbség a két vízfelület között, de összehasonlítva az RGB és az IR ortofotót, azonnal markánsan elkülönül a két vízfelület.

HŐKÉPES 3D-S MODELL ÉPÜLETEKRŐL

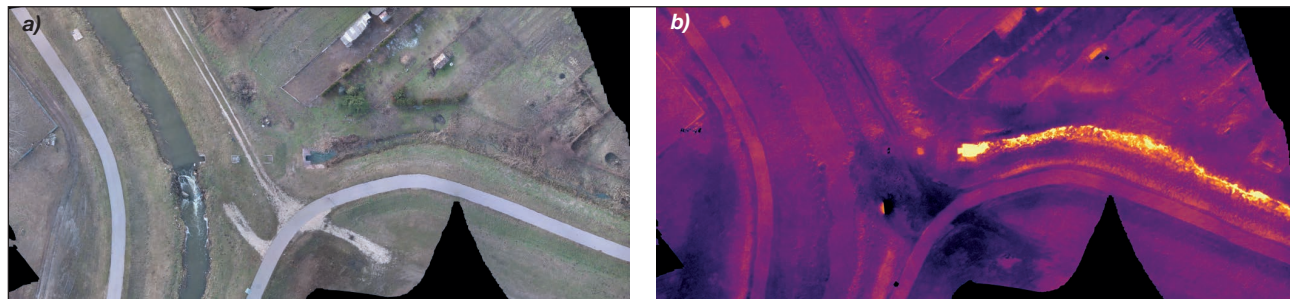
Az ismertetett hőképes fotogrammetriai eljárás nemcsak sík vetületek, hanem 3D-s modellek készítésére is alkalmas. A 4. ábra egy lakóház 3D-s IR modelljét szemlélteti. A modell elkészítéséhez 1266 képpár készült a házról, minden irányból. Az átfedő képekből a már ismertetett eljárással készült 3D-s modell. A felvételek készítése idején ugyan fagypont körüli volt a hőmérséklet (0 °C), de napsütéses idő volt. A napsütés hatására a házfalak felmelegedtek. Ez az oka annak, hogy a fűtött épület ablakai hidegebbek, mint az amúgy hőszigetelt ház fala. Noha a külső besugárzás hatása legjobban éjszaka zárható ki, az eljárás nappali megvilágítást igényel a hagyományos színes kép készítése miatt. Amennyiben a felvételkészítés célja az épület vagy egy objektum saját hő kibocsátásának feltérképezése, úgy a felvételeket borult időben, úgynevezett dif-fúz fénynél érdemes készíteni.

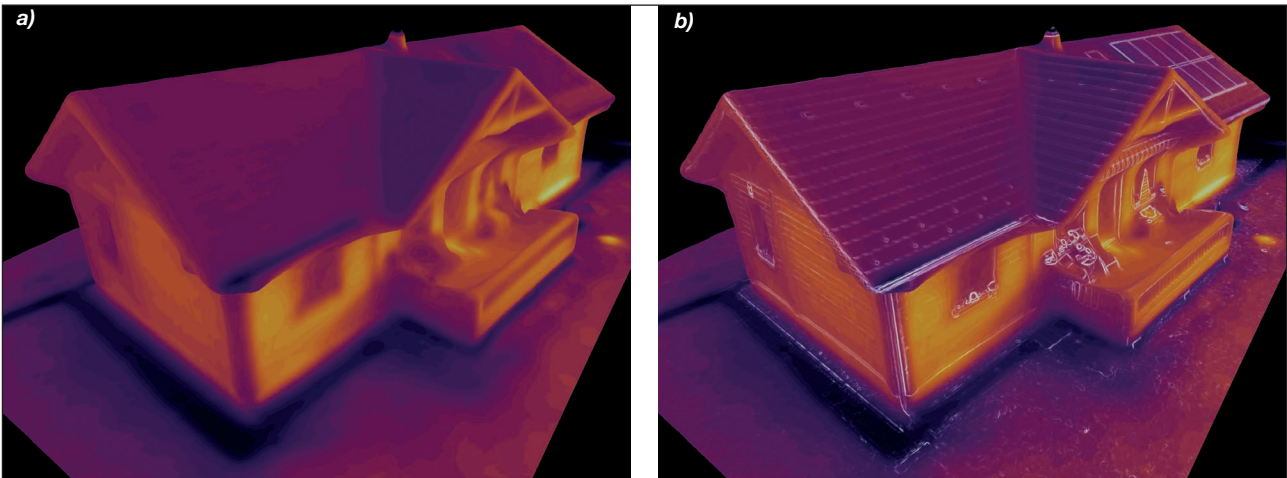
A Matlab alkalmazásban implementált Fuzzy élkimielés [7] az utófeldolgozás során jelentős minőségjavulást eredményezett a 3D-modelleken. (Mivel az utófeldolgozásokat Matlab környezetben végeztük – többek között a már előzőekben bemutatott színpaletta beállítását – kézenfekvő volt, hogy szükség esetén további korrekciókat is ebben a programkörnyezetben végezzünk. Több élkimielő eljárás ismert, amelyek közül a kísérleteink során a Fuzzy alapon megvalósított technológia adta a legjobb eredményt.) Ez a minőségjavulás – különösen az alacsony felbontású 3D-s modellek esetén – olyan hatást kelt, mintha a felvételek eredetileg is 300×200 vagy még nagyobb natív felbontású hőkamerával készültek volna.

HŐKÉPES 3D-S MODELL FÖLD ALATT IZZÓ GYÖKEREKET BORÍTÓ FÖLDHALOMRÓL

Egy terület cserjéktől történő megtisztítását követően, a földből kiforgatott gyökerek égetése során a tüzet az égő gyökereket földdel betakarva oltották el. A keletkezett földhalom azonban még hónapokig füstölt, amit a föld alatt található gyökerek izzása eredményezett. Noha azok eloltására több alkalommal vizes oltási kísérlet történt, a halom időről időre újra füstölni kezdett. Mivel a vízzel történő ol-

3. ábra. A dunaalmási 32 °C-os hőforrás RGB- a) és IR ortofotója b) (Fotók: Molnár András)





4. ábra. Egy lakóház IR 3D-s modellje a) és ugyanaz a modell élkiemeléssel b) (Fotók: Molnár András)

tást minden esetben a füstölgő területen végezték, valószínűsíthető volt, hogy a föld alatti izzás lényegesen nagyobb területen zajlik. A füst csupán azon a részen jelent meg, ahol a keletkező gázok a föld repedésein keresztül utat találtak a felszínre. A föld alatti izzás megszüntetéséhez több megoldás is kínálkozott. Földmunkagéppel részben meg lehetett volna nyitni a földhalmot, és annak szétterítésével eloltható lett volna a még izzó gyökérzet. Tartani lehetett attól azonban, hogy a földhalm megnyitásával friss levegő kerül az izzó gyökerekhez, amelynek következtében heves égés indul meg. Másik megoldás a vizes elárasztás, de nem lehetett pontosan tudni sem az izzó anyag mennyiségét, se annak pontos elhelyezkedését a föld alatt.

Az izzás mértékének megállapításához magától értetődő a hőkamera alkalmazása. A 5. a) ábrán jól látható a kérdéses földhalm, valamint az is érzékelhető, hogy a füst csak a földhalm egy kis részén tör elő. Ugyanakkor a területről FLIR³ hőkamerával készített légifotó (5. b) ábra) már lényegesen nagyobb kiterjedésű izzásról tanúskodik. A kép készítésekor a környezeti hőmérséklet kissé fagypont felett (2 °C) volt. Látható, hogy a hőképen megjelölt 60 °C-os felszíni hőmérséklet a földhalm jelentős részére kiterjed, de kissé hidegebb, ugyanakkor a továbbra is aktív izzásra utaló magas felszíni hőmérséklet még nagyobb területen kimutatható. A hőképen az is megfigyelhető, hogy több

kisebb gócpontja van az izzó gyökereknek. Amennyiben nem csupán egyetlen felvétel készül a kérdéses területről, lehetőség nyílik a képek segítségével fotogrammetriai eljárással 3D-s modell készítésére is.

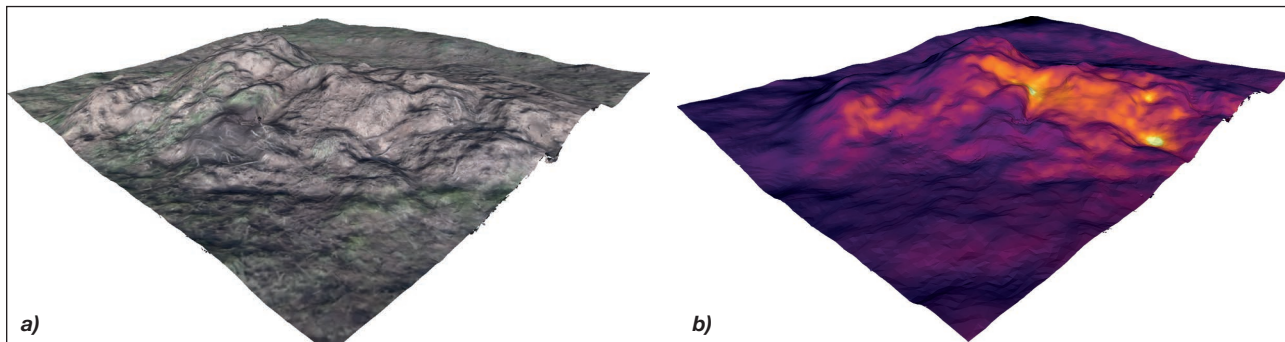
A terület felett FLIR Duo típusú kamerával felszerelt DJI Phantom II multikopter két felszállás során 1028 db képpárt készített különböző irányokból. Az ismertetett adatfúziós eljárással elkészült az izzó gyökereket takaró földhalm 3D-s modellje. A látható tartományú (RGB) képek alapján készült modell a 6. a) ábra képe, a modell hőképes fúziójának eredményét pedig a 6. b) ábra szemlélteti. Jól megfigyelhető, hogy az egyszeri hőképes légi felvétel (5. b) ábra) információtartalma a 3D-s modellen is megjelenik, de a térbeli ábrázolás további segítséget nyújt a föld alatti izzó struktúra megismeréséhez.

Természetesen a 3D-s modell tetszőleges irányból (nézőpontból) megtekinthető, így a vizsgált struktúra jól elemezhető. Mivel a két modell (RGB és IR) csupán a textúrájukban térnek el egymástól, az IR modellen látható izzó gócpontok egyszerűen megfeleltethetők az RGB modellel, amely segítségével a valóságos terepen már igen könnyen meghatározhatók a kérdéses területrészek.

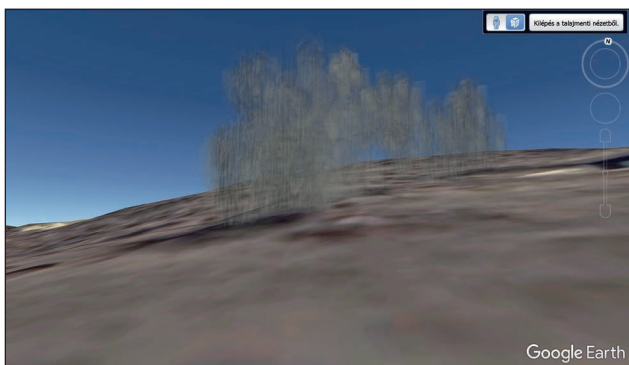
Mivel az izzás levegőtől elzártan történik, a kiszabaduló füst a tökéletlen égés égésterméke, amely jelentős mennyiségű CO (szén-monoxid) gázt tartalmaz. A CO gáz szabad

5. ábra. Földdel eltakart izzó gyökerek hagyományos a) és hőkamerás légi fotója b) (Fotók: Molnár András)





6. ábra. Földdel eltakart izzó gyökerek 3D-s modellje (balra) és IR 3D-s modellje (jobbra) (Fotók: Molnár András)



7. ábra. Izzó növényzet által kibocsátott CO₂ gáz eloszlásának 3D-s modellje (Készítette a szerző saját mérési adatai alapján)

szemmel nem látható, fajsúlya közel megegyezik a levegőével, így a felszínen a légáramlatokkal mozog, azaz szignifikánsan nem ülepszik és nem illan el. Megfelelő érzékelőkkel jól detektálható, elektrokémiai vagy atomabszorpciós szenzorral kimutatható. Ilyen szenzorokkal felszerelt multikopter képes a vizsgált légtérben akár több magasságban is pásztázó repüléssel adatokat gyűjteni. A mérési adatokhoz hozzárendelve azok térbeli koordinátáit, 3D-s modell készíthető a szintelen gáz területi eloszlásáról. A vizsgált területen egy ilyen mérés eredményét szemlélteti az 7. ábra.

Mivel a 3D-s modell létrehozásához minden mérési pont GPS-koordinátája rendelkezésre áll, az elkészült modellt akár a Google Earth világképeire is ráilleszthető. Az illesztés természetesen a valós helyszínhez történik, így a

mérgező gáz terjedése a valóságos környezet viszonyában vizsgálható.

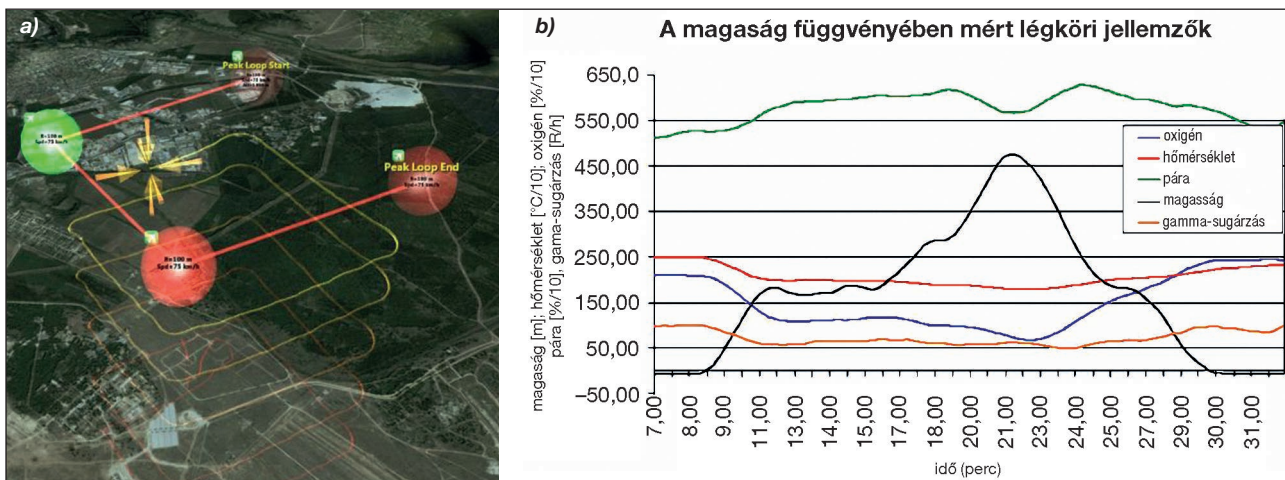
A LEVEGŐBE KERÜLT VESZÉLYES ANYAGOK TÉRBELI ELOSZLÁSÁNAK KIMUTATÁSA

Felhasználva a már ismertetett eljárást, létrehozható olyan SUAV-kon alkalmazható detektorrendszer, amely segítségével a légköri szennyezők térbeli és akár időbeli eloszlása is megfigyelhetővé válik.

A 8. ábra egy merev szárnyú pilóta nélküli repülőgépre szerelt gázérezékelő modul repülés során rögzített adatait szemlélteti. A 8. a) ábra a repülés 3D-s nyomvonalát ábrázolja. Az elektromos meghajtású repülőgép egy virtuális „kéményben” emelkedett a starthelytől mérten 500 m magasságba, majd azonos nyomvonalon siklórepüléssel tért vissza. A mérőegység a különféle szenzorok adatait a teljes repülési idő alatt rögzítette. Ezen adatokat az idő függvényében a 8. b) ábra diagramja szemlélteti. A kísérlet célja az volt, hogy ismert légköri jellemzőket mérjünk és megvizsgáljuk, hogy a kapott eredmények mennyire igazolják az elméleti modelleket. Jól megfigyelhető például az O₂ mennyiségének csökkenése a magasság függvényében.

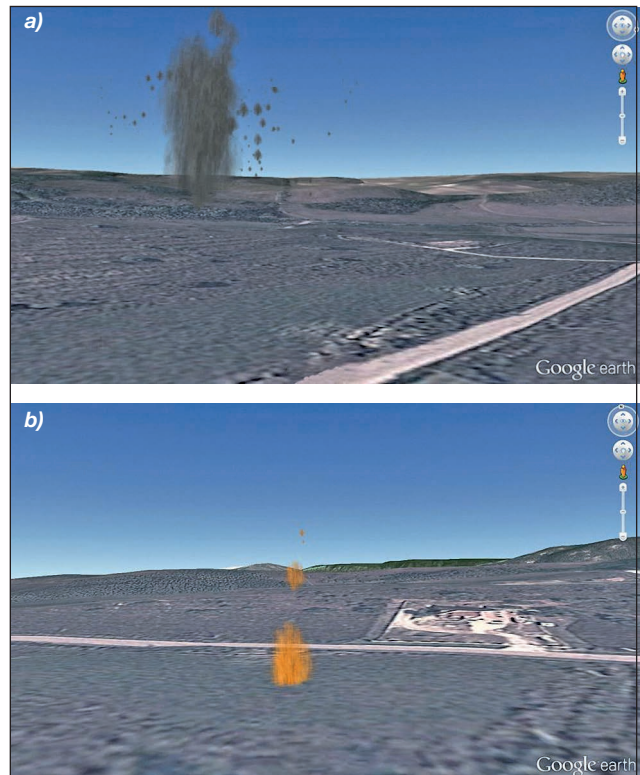
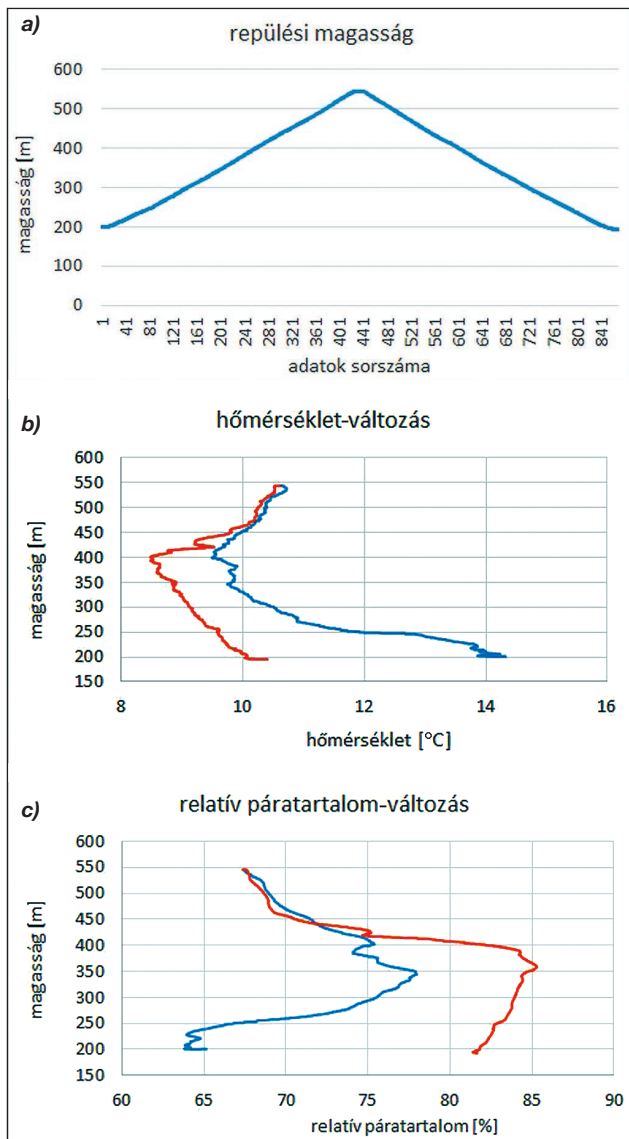
Hasonló méréseket – viszonylag egyszerűen és alacsony költséggel – függőlegesen emelkedni és süllyedni képes repülőeszközök alkalmazásával is meg lehet valósítani. A multikopterek ideális hordozóeszközei lehetnek egy adott helyen magasságfüggő légköri adatokat gyűjtő szenzormodulok számára. Az elektromos hajtású multikopter

8. ábra. Légköri összetevők mérése 500 méteres emelkedés, majd süllyedés során, merev szárnyú repülőeszközzel Várpalota térségében (Készítette a szerző saját mérési adatai alapján)



lényegében nem zavarja meg a mérést, mert nem rendelkezik zavaró égéstermékkel és számottevő hőszennyezéssel sem. A drónok további előnye a ballonokkal szemben, hogy nem sodródnak el, alkalmazásukkal a mérést a kijelölt pont felett lehet elvégezni. A 9. ábrán egy kísérleti mérés eredménye látható. A DJI Mavic multikopterre erősített modul hőmérséklet-, páratartalom-, szén-monoxid- és CO₂-mérő szenzorokat tartalmazott. A mérési adatokhoz az adatgyűjtő elektronika folyamatosan hozzárendelte a mérés időpontját és az adott időponthoz tartozó GPS-koordinátákat is. A DJI Mavic akkumulátora egyenletes, de kellően lassú emelkedés (~0,9 m/s) és hasonló sebességű süllyedés mellett (9. a) diagram) 350 m starthely feletti magasság elérését tette lehetővé. A viszonylag lassú emelkedést az alkalmazott szenzorok sebessége indokolta. Gyorsabb szenzorok esetén, vagy előre meghatározott magasságban történő méréskor a 350 m-es magasság növelhető, de figyelembe kell venni az eszköz maximális süllyedési sebességét is, amely a DJI Mavic esetében -5 m/s. Az ettől nagyobb intenzitású függőleges süllyedés során a kialaku-

9. ábra. Függőleges emelkedés során mért légköri jellemzők Mavic quadrokopterrel (Készítette a szerző saját mérési adatok alapján)



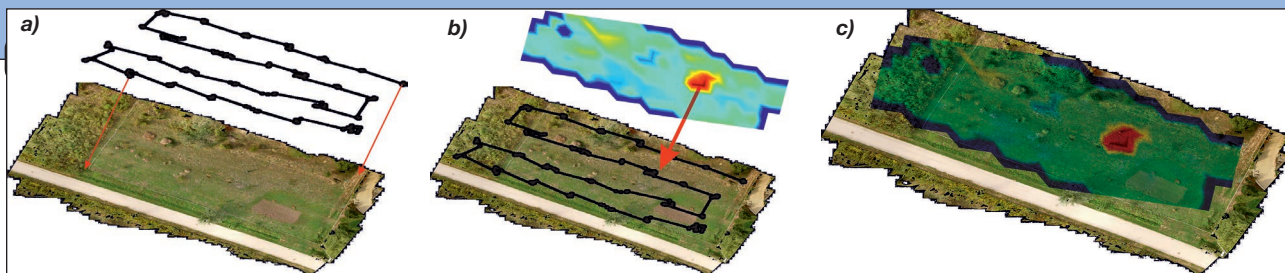
10. ábra. Gázok terjedésének 3D-s kísérleti mérési eredményei. A felső ábra a szén-monoxid-, az alsó a nitrogén-monoxid-gáz terjedésének 3D-s rekonstrukciója (Készítette a szerző saját mérési adatok alapján)

ló örvénygyűrű a repülőeszköz veszélyes instabilitását okozza. Ennek hatása a multikopter merülés közben történő előre haladásával csökkenthető, de lényegesen az -5 m/s merülési sebességet így sem lehet meghaladni.

A 9. b) diagram a kísérlet alatt mért hőmérsékleti adatokat szemlélteti. Jól látható, hogy a starthely (tengerszint feletti magassága 180 m) felett 200 méterrel a hőmérséklet-csökkenés megfordul, és tovább emelkedve növekvő tendenciát mutat. Hasonló változás figyelhető meg a 9. c) diagramon, amely a levegő relatív páratartalmának mérési eredményeit ábrázolja. A hőmérsékleti gradiens megváltozásának magasságában a levegő relatív páratartalma is csökkenni kezd, míg alatta egyenletesen növekedett. Valójában a mérési adatok alapján az első inverziós réteg alsó határának pillanatnyi magassága olvasható ki a diagramokból.

Amennyiben a mérési adatokat a mérés helyadataival fuzionáljuk, 3D-s gázeloszlási képet kaphatunk. Ennek feltétele, hogy a vizsgált területen több magasságban is végezzünk nagy lefedettségű méréseket. A célra hatékonyan alkalmazhatók a többrotoros robotrepülőgépek (multikopter), amelyek tévesen a drón megnevezéssel kerültek be a köztudatba. A multikopterek nagy előnye, hogy igen lassan is képesek haladni, vagy szükség esetén egy-egy mérési ponton akár függeszkedni is tudnak, így az a fedélzetükön alkalmazott szenzorok mérési sebességéhez a repülőeszközök sebessége jól illeszthető.

A 10. ábrán a légkörbe került szennyező gázok térbeli eloszlásának kísérleti eredményei láthatók. A 10. a) ábrán a területen mesterségesen elhelyezett szén-monoxid forrásból származó szennyezés, a 10. b) ábrán pedig egy nitrogén-monoxid forrás által létrehozott szennyezés terjedésének vizualizációja látható. Valós balesetek során a mérések



11. ábra. Gamma-sugárforrás detektálása quadrokopterrel és 3D-s terepmodell szintetizálása (Készítette a szerző saját mérési adatok alapján)

egységnyi időközönként ismételhetők és az eredmények akár animálva, idősorosan is megjeleníthetők. A képeken a gázok megjelenítése mesterséges, azaz a valóságban ezek a felhők nem voltak láthatók. A szén-monoxid szemmel nem látható, a nitrogén-monoxid pedig rendkívül alacsony koncentrációja miatt szintén láthatatlan volt.

SZABAD TERÜLETI GAMMA-SUGÁRZÁS DÓZISELOSZLÁS VIZUALIZÁCIÓJA

Speciális adatfúziós eljárással vizualizálható egy terület radioaktív sugárzásának eloszlása. Amennyiben a hordozóra (drónra) felszerelt sugármérő adatait – a már megismert módon – a mérés helykoordinátaival együtt értelmezzük, elkészíthető a terület gamma-sugárzásával árnyos fedvény. A mérés során a quadrokopter átfedő fényképeket is készít a területről, amely a hagyományos fotogrammetriai eljárással feldolgozva ortofotót vagy 3D-s terepmodellt szolgáltat. Ezen adatok szintén összekapcsolhatók a mért sugárzás értékével és annak helykoordinátaival. Éppen ezért előállítható olyan ortofotó vagy akár 3D-s terepmodell, amely mesterséges színezéssel a felmért terület sugárzásának mértékéről informál. (11. ábra)

A sugárméréshez kellően könnyű, ugyanakkor nagy érzékenységgel rendelkező detektor vagy detektorrendszer szükséges, hogy az adott terület felett akár lassú de folyamatos repüléssel is értékelhető mérési eredményekhez lehessen jutni. A 11. ábrán látható mérést egy Mavic quadrokopterrel szerelt kis méretű szcintillációs detektorral sikerült elvégezni úgy, hogy a területre kis mennyiségű radioaktív ásvány – az Urán, Autunit nevű természetes előfordulása ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \times (10-12)\text{H}_2\text{O}$) – került kihelyezésre. A multikopter a terület felett pásztázó repülés során előre meghatározott mérési pontokon függeszkedett 10 másodpercig, majd tovább haladt a következő mérési ponthoz. A rögzített adatokat erre a célra készített Matlab szoftver segítségével dolgoztuk fel, és illesztettük rá a mérés során készített képekből előállított ortofotóra. A 39x24 m, azaz 936 m² nagyságú vizsgált terület felett 45 perc alatt 3 felzárással készült a felvétel.

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott alkalmazások felhívják a figyelmet arra, hogy a kis méretű pilóta nélküli légi járművek felhasználásával igen széles körű és rendkívül hatékony távérzékelési rendszerek hozhatók létre. Alkalmazásuk vagyoni- és emberi védelem területén egyaránt lehetséges. Az alkalmazott szenzorok fajtájától függően hatékony megfigyelő, monitorozó rendszer alakítható ki akár megelőzési, akár katasztrófaelhárítási feladatok ellátása során.

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Martin, Peter G., Dean T. Connor, Natalia Estrada, Adel El-Turke, David Megson-Smith, Chris P. Jones,

David K. Kremer, és Thomas B. Scott. „Radiological Identification of Near-Surface Mineralogical Deposits Using Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle”. *Remote Sensing* 12, sz. 21 (2020. október 30.): 3562. <https://doi.org/10.3390/rs12213562>;

- [2] Sato, Yuki, Shingo Ozawa, Yuta Terasaka, Masaaki Kaburagi, Yuta Tanifuji, Kuniaki Kawabata, Hiroko Nakamura Miyamura, Ryo Izumi, Toshikazu Suzuki, és Tatsuo Torii. „Remote Radiation Imaging System Using a Compact Gamma-Ray Imager Mounted on a Multicopter Drone”. *Journal of Nuclear Science and Technology* 55, sz. 1 (2018. január 2.): 90–96. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211>;
- [3] Mochizuki, S., J. Kataoka, L. Tagawa, Y. Iwamoto, H. Okochi, N. Katsumi, S. Kinno, és mtsai. „First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima”. *Journal of Instrumentation* 12, sz. 11 (2017. november 17.): P11014–P11014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/P11014>;
- [4] Hinterhofer, T., Pfennigbauer, M., Schraml, S., Hofstätter, M. „UAV based multi-sensor system with real-time data processing and downlink for survey of nuclear disaster locations for first-responder support” *Auvsi Xponential 2017*;
- [5] Zelenák J., Csurgai J., Halász L., Solymosi J., Vincze Á. „A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során” *Hadmérnök*, 4. évf., 1. szám (2009);
- [6] Makkay, Imre, és Sándor Takács, és Péter Willand. „Meteorológiai szenzorok alkalmazása a kisgépes repülésben”. *Repüléstudományi Közlemények* 32, sz. 3 (2020): 83–91. <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.7>;
- [7] „Fuzzy Logic Image Processing - MATLAB & Simulink”. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-logic-image-processing.html> (Letöltés: 2021.10.21.).

JEGYZETEK

- 1 Az RGB színrendszerben a színek a három – más színből nem kikeverhető – alapszín, a vörös (red), a zöld (green), és a kék (blue) egymásra vetítésével állíthatók elő, ez tulajdonképpen az additív (összeadó) színkeverés. Az RGB-színteret elektronikai eszközök és a számítástechnika terén alkalmazzák. (A szerk.)
- 2 A hisztogram metrikusan skálázott tulajdonságok grafikus ábrázolása. Általánosabb matematikai értelemben a hisztogram egy $m(i)$ függvény, amely az egyes diszjunkt osztályokba tartozó megfigyeléseket számolja. A hisztogram mint grafikon ennek egy ábrázolási módja. Hisztogramokat a képfeldolgozásban és a leíró statisztikában készítenek, ha a sűrűségfüggvényt, eloszlást szeretnék becsülni – nemcsak az eloszlás egyes paramétereit – vagy azt gyanítják, hogy több tényező hat egy folyamatra, és ezt bizonyítani is akarják, illetve ha értelmes specifikációs határokat akarnak megállapítani egy folyamatra. (A szerk.)
- 3 FLIR: Forward-looking infrared – előre tekintő infravörös kamera. Általában katonai és polgári repülőgépeken alkalmazott termográfiai kamera, amely érzékeli az infravörös sugárzást. (A szerk.)