

Miehittämättömillä ilma-aluksilla tehtävien lähi-infrapuna-alueen multispektrikuvausten sovellusmahdollisuudet ympäristötutkimuksessa

OLLI-PEKKA SIIRA, ARI SAARTENOJA, SEPPO ALANÄRÄ JA MARKKU PIRTTIJÄRVI

Ihmisen näköhavaintokyky on rajoittunut näkyvän valon aallonpituusalueelle 380–750 nm. Ihmissilmän herkkyys on suurin vihreän valon aallonpituusalueella (555 nm). Infrapuna-alueen sähkömagneettisen säteilyn ihminen aistii lämpönä. Infrapuna-alueesta erotetaan lähi-infrapun (NIR, Near Infra-Red) aallonpituusalue 700–2 500 nm, jota ihmisen silmä ei kykene näkemään (kuva 1). Lähi-infrapunasäteily ei ole haitallista eliöille. Sitä esiintyy luonnossa meille näkymättömänä, mutta lukemattomissa eri sävyissä, joita jotkin eläimet pystyvät aistimaan. Tässä artikkelissa tarkastelemme kiinteäsiipisillä lennokeilla tai pienoiskoptereilla tehtävien lähi-infrapuna-alueen multispektrikuvausten käyttömahdollisuuksia ympäristötutkimuksessa.

Lähi-infrapunasäteily

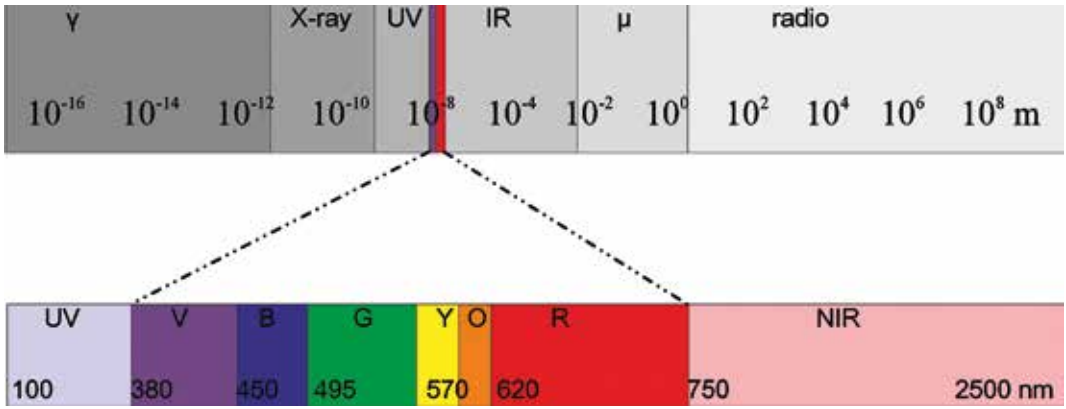
Luonnollinen lähi-infrapunasäteilyn eli NIR-säteilyn lähde on Aurinko. Auringon emittoima spektri vastaa fysiikan teorioista tuttua mustan kappaleen säteilyä. Valtaosa Auringon säteilystä heijastuu ilmakehästä tai absorboituu maaperään ja vesiin, emittoituen myöhemmin lämpösäteilyinä.

NIR-valokuvauksessa huomattiin jo varhain, että lehtivihreä heijastaa erittäin voimakkaasti lyhytaaltoista infrapunasäteilyä. Ilmiö johtuu Auringon säteilyn siroamisesta ja moninkertaisesta takaisinheijastuksesta vihreän kasvillisuuden solukkorakenteissa lähi-infrapuna-aallonpituusalueella (ks. Vollmer ym. 2015). Noin 50 % NIR-säteilystä heijastuu kasvillisuudesta, varsinkin jos kasvusto on tuoretta ja tervettä. Ruskeanharmaa maaperä heijastaa enemmän varsinaisen infrapuna-alueen säteilyä kuin kasvipeitteinen maa. Vesi absorboi suurimman osan tulevasta säteilystä riippumatta säteilyn aallonpituudesta.

Multispektrikuvantaminen lähi-infrapuna-alueella

Tavanomaisessa valokuvauksessa hyödynnetään näkyvän valon aallonpituuksia, jolloin kuvien värientoisto vastaa luonnollisia värisävyjä. Multispektrikuvantamisella tarkoitetaan tekniikkaa, jossa kuvauksessa käytetään useita eri aallonpituuksia. Hyperspektrikuvauksessa eri aallonpituusalueita voi olla rajaton määrä. Useissa sovelluksissa – kuten erilaisissa heijastavuusindeksilaskennoissa – riittää kuitenkin, että tiedetään heijastavuusarvot tietyillä aallonpituuksilla. Erotuksena hyperspektrikuvantamiseen, multispektrikuvantamisessa aallonpituusalueita on vähemmän. Tämä helpottaa analyysien laskentaa ja tulosten tulkitusta. Pilvisyyden aiheuttamat valaistuksen vaihtelut häiritsevät ilmasta tehtyä multispektrikuvantamista, jolloin indeksilaskennasta tulee haastavaa.

NIR-kuvantaminen ei perustu lämpösäteilyn kuvaukseen, vaan materiaalien erilaisiin heijastusominaisuuksiin varsinaisen



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueet. Kuvassa aallonpituudet: γ =gamma, X-ray=röntgen, UV=ultravioletti, IR=infrapuna, NIR=lähi-infrapuna ja μ =mikro. Näkyvän valon alue tarkemmin tarkasteltuna: V=violetti, B=sininen, G=vihreä, Y=keltainen, O=oranssi ja R=punainen.

Figure 1. Wavelength ranges of electromagnetic radiation. Wavelengths: γ =gamma, UV=ultraviolet, NIR=Near Infra-Red, and μ =micro. A closer look at the area of visible light: V=violet, B=blue, G=green, Y=yellow, O=orange, and R=red.

lämpösäteilyalueen ulkopuolella. Optiset laitteet, kuten kaukosäätimet ja robottikamerat, operoivat tavallisesti lähi-infrapun aallonpituusalueella.

Multispektrikuvantamisen sovelluksia

Eräs yleisesti käytetty multispektrikuvantamisen sovellus on kasvillisuusindeksi NDVI (*normalized difference vegetation index*), joka voidaan laskea myös satelliittikuvista. Menetelmä on tunnettu jo 1970-luvulta lähtien. Indeksilaskentaan käytetään punaisen värin ja lähi-infrapun aallonpituusalueiden heijastuksia.

Ilmasta käsin kuvaavat NIR-laitteet muistuttavat tavallista kameraa, mutta ne pystyvät tallentamaan lähi-infrapuna-alueen heijastuksia tavanomaisen näkyvän valon aallonpituuksien sijaan. Mittauksia voidaan suorittaa kiinteäsiipisillä lennokeilla ja pienoiskopteereilla. Tässä tekstissä käytetään näistä suomen kieleenkin vakiintunutta nimitystä drooni (*drone*). Virallisella termillä, miehittämättömät ilma-alukset (*unmanned aerial vehicles*, UAV), tarkoitetaan samaa.

Maataloudessa droonikuvauksella voidaan hallita suuria maatalousalueita kustannustehokkaasti. Droonikuvausta voidaan käyttää esimerkiksi kasvuston biomassan arvioimiseen ja mahdollisten kasvitautilien tunnistamiseen. Ilmakuvat pelloista helpottavat jatkotoimenpiteiden suunnittelua. Esimerkiksi Änäckälän (2020) opinnäytetyössä tutkittiin, kuinka multispektrikameran kuvia ja 3D-mallia voidaan hyödyntää viljelykasvien tarkkailussa. NIR-aallonpituusalueen heijastusominaisuuksia on käytetty myös kasvillisuuden vesipitoisuuden määrittämisessä (Penuelas ym. 1997). NIR-alueen käyttö kuvantamisessa on osoittautunut hyödylliseksi esimerkiksi maanmuokkauksen havainnollistamisessa (Yeom ym. 2019). Droonilla tehtävää NIR-kuvausta on kehitelty myös kaivosalueiden monitorointiin (esim. Carabassa ym. 2020).

Kasvillisuutta ja maankäyttömuotoja kuvaavia indeksejä voidaan määrittää myös satelliittikuvien perusteella. Suomen ympäristökeskuksen Tarkka-palvelussa julkaistaan Copernicus Sentinel -satelliittiohjelman aineistoa, joka on peräisin Euroopan unionin ja Euroopan avaruusjärjestön (ESA) yhteistyöprojektista.



Kuva 2. Pyhäsalmen kaivosalue. Droonikoelennon alue näkyy kuvassa kirkkaan vihreänä. Pohjakartan lähde: Maanmittauslaitoksen aineistoa 3/2022, ortokuva.

Figure 2. Pyhäsalmi mining area. The drone test flight area is shown in bright green in the picture. Background map source: Data of the National Land Survey of Finland 3/2022, orthophoto.

Esimerkitutkimuksia

Koelennot suoritettiin Pyhäsalmen kaivosalueella vuonna 2021 sekä Siikanevan suoalueella ja Hyytiälän metsäalueella vuonna 2022. Lentolaitteena käytettiin Radai Oy:n sähkökäyttöistä kiinteäsiipistä VTOL (*vertical take-off and landing*) droonia, jonka siipien kärkiväli oli 216 cm ja kokonaispaino 8 kg. Kameralta käytettiin alun perin teollisuuskäyttöön suunniteltua multispektrirobottikameraa, joka oli modifioitu käytettäväksi droonikuvauksissa. Kamera tallensi ilmakuvia kahdeksalla NIR-aallonpituusalueella: 720 nm, 760 nm, 800 nm, 840 nm, 860 nm, 900 nm, 940 nm ja 980 nm. Ortomosaikkikuvien tuottamisessa käytettiin PIX4D-ohjelmaa. Ortomosaikkikuvien rasterianalyysi tehtiin QGIS-paikkatieto-ohjelmalla.

Indeksilaskennat

Tutkimuksessa kasvillisuutta ja maaperää kuvattiin MSAVI- ja NDVI-indeksien avulla. MSAVI (*modified soil adjusted vegetation index*) on kasvillisuusindeksi, jonka laskennassa huo-

mioidaan erityisesti maaperän vaikutus. Se soveltuu erityisesti alueille, joissa kasvillisuus on laikuittaista ja lehtivihreän määrä suhteellisen vähäinen. MSAVI lasketaan kaavalla 1:

$$MSAVI = \frac{2N+1-\sqrt{(2N+1)^2-8(N-R)}}{2}, \quad (1)$$

tässä sovelluksessa $N = 980$ nm ja $R = 760$ nm.

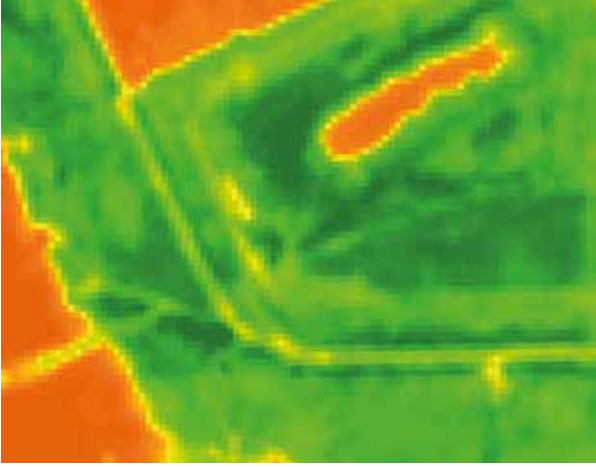
NDVI (*normalized difference vegetation index*) on kasvillisuusindeksi, joka mittaa fotosynteesin aktiivisuutta, mikä ilmenee kasvillisuuden vihreytenä. NDVI lasketaan pikselikohtaisesti kuvan punaisen ja lähellä infrapunaa olevien aallonpituuskaistojen normalisoidusta erosta. NDVI lasketaan kaavalla 2:

$$NDVI = \frac{N-R}{N+R}, \quad (2)$$

missä $R = 760$ nm ja $N = 900$ nm

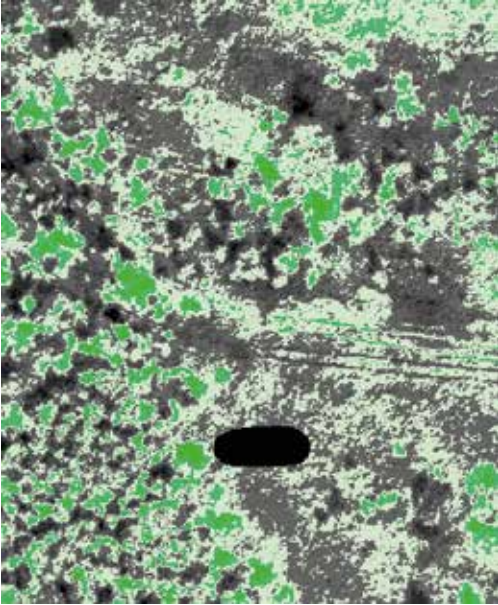
Tulokset ja tarkastelu

Pyhäsalmen kaivosalueella tehtiin koelentoja kesällä 2021 (kuva 2). Lennokeilla tehtyjen kuvausten perusteella määritettiin kasvillisuus-



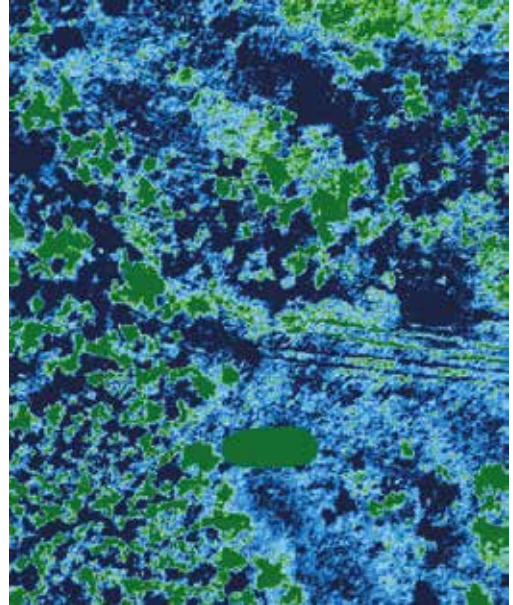
Kuva 3. Pyhäsalmen kaivosalueen kasvillisuusindeksi (NDVI) aikavälillä 1.7.2021–31.7.2021. Sisältää muokattua dataa: ESA Copernicus Sentinel, Syke 9/2024.

Figure 3. Vegetation index (NDVI) of the Pyhäsalmi mining area from time period 1 July 2021–31 July 2021. Contains modified data: ESA Copernicus Sentinel Data, Syke 9/2024.



Kuva 4. NDVI-indeksi Pyhäsalmen kaivosalueen kuvauspisteessä. Vihreä sävy kuvaa suurta NDVI-arvoa (0,5–1,0) ja harmaa sävy pientä NDVI-arvoa (0,0–0,5).

Figure 4. NDVI at the imaging point of the Pyhäsalmi mining area. The green shade describes a high NDVI value (0.5–1.0) and grey shade low NDVI value (0.0–0.5).



Kuva 5. MSAVI-indeksikartta Pyhäsalmen kaivosalueelta. Kasvillisuutta kuvaavat indeksiarvot on väritetty vihreän sävyillä ja kasvitonta maaperää kuvaavat indeksiarvot sinisen sävyillä.

Figure 5. MSAVI index map from the Pyhäsalmi mining area. Index values describing vegetation are coloured in shades of green and vegetation-free soil are coloured in shades of blue, respectively.

indeksi. Droonikuvaesimerkki on koelennon alueen keskeltä. Satelliittikuvassa (kuva 3) Pyhäsalmen kaivosalueen kasvillisuusalueet kuvautuvat vihreällä sävyllä ja vesialueet punaisella. Droonikuvauksessa päästään huomattavasti suurempaan tarkkuuteen kuin satelliittiaineistoja käytettäessä. Pikselikoko tässä käytetyllä tekniikalla on droonikuvauksessa 10 cm x 10 cm, kun taas satelliittikuvauksen

pikselikoko on 10 m x 10 m. Näissä esimerkeissä indeksilaskenta on tehty QGIS-paikkatieto-ohjelmalla. Korkeaa NDVI-indeksiarvoa ilmentävä kasvillisuus on sävytetty vihreällä (kuva 4). MSAVI-indeksissä selväpiirteinen puusto korostuu, mutta vesistöt ja aukot mitauksissa täytyy ottaa tulkinnessa huomioon (kuva 5).



Kuva 6. Siikanevan suoalueen droonikuvauksen (2022) erään NIR-aallonpituusalueen heijastuksista koostettu ortomosaiikkikuva. Pohjakartan lähde: Maanmittauslaitoksen aineistoa 10/2022, ortokuva.

Figure 6. Orthomosaic image composed of reflections in one NIR wavelength range from drone imaging of Siikaneva fen (2022). Background map source: Data of the National Land Survey of Finland 10/2022, orthophoto.

Siikanevan suoalueen NIR-kuvantamisessa kosteuserot ja topografiset vaihtelut kuvautuvat selväpiirteinä sävyroina (kuva 6). Käytetty menetelmä näytti soveltuvan Siikanevan kohteella avoimen maaston luontotyyppikartoitukseen ja ympäristöseurantaan edellyttäen, että alueella on huomattavia eroja kasvillisuudessa ja kosteusolosuhteissa. Hyttiälän metsäalueella kuvantamismenetelmä ei sen sijaan soveltunut käytettäväksi, todennäköisesti metsäalueen kasvillisuuspeitteen tasaisuuden vuoksi.

Johtopäätökset

Miehittämättömillä ilma-aluksilla lähi-infrapuna-aallonpituusalueella suoritettava kuvaus soveltuu avoimen maaston luontotyyppitason tutkimuksiin. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi kaivosympäristön kasvillisuuden kehittymisen seurannassa, mikäli halutaan arvioida häiriintyneen ympäristön ennallistamisen vaikutuksia. Kosteuserojen ja hienopiirteisten topografisten korkeuserojen piirtyminen antoi lupaavia tuloksia suoalueiden

kartoituksessa. Sen sijaan sulkeutuneen metsäympäristön kartoituksessa käytetyllä menetelmällä ei saatu mitattavia tuloksia. Indeksilaskennan avulla saadaan esille kasvillisuuden piirteitä ja eroavaisuuksia. Tarkempaan luontotyyppikartoitukseen ja lajikohtaiseen analysointiin tarvittaisiin referenssimateriaalia.

FT OLLI-PEKKA SIIRA
(olli-pekka.siira@sitowise.com)
Sitowise Oy

FM ARI SAARTENOJA
(ari.saartenoja@radai.fi)

DI SEPPO ALANÄRÄ
(seppo.alanara@radai.fi)

FT MARKKU PIRTtijÄRVI
(markku.pirttijarvi@radai.fi)

Radai Oy

Olli-Pekka Siira on kirjoittanut väitöskirjan Oulun yliopistossa (Oulu Mining School) ja toiminut tutkijatohtorina Helsingin yliopistossa. Hän toimii tällä hetkellä ympäristökonsulttina Sitowise Oy:ssä. Olli-Pekka on vastannut tekstissä esitetyn tutkimuksen suunnittelusta, paikkatietoanalyysistä ja raportoinnista. FM Ari Saartenoja on vastannut droonikuvausten teknisestä suunnittelusta ja toteuttamisesta. Radai Oy:n puolesta työhön ovat osallistuneet myös DI Seppo Alanära, joka on suunnitellut droonin logger-ohjelmiston ja toteuttanut NIR-kameran liitännän loggeriin sekä koostanut ortokuvamosaiikit. FT Markku Pirttijärvi on suunnitellut droonilennot sekä toiminut tieteellisenä ja teknisenä neuvonantajana.

Kiitokset K.H. Renlundin säätiölle innovaatiolle myönnetystä apurahasta.

Summary

Possibilities of multispectral UAV NIR imaging in environmental studies

Near Infra-Red (NIR) wavelength range is 700–2,500 nm, which is beyond visibility for human eyes. NIR imaging is widely used in laboratory scale in pharmacy, medical sciences, and agriculture. In this article is presented a NIR aerial imaging method used with an unmanned aerial vehicle (UAV). Compared to satellite imaging the resolution with the UAV method was about a hundred times more accurate. The UAV NIR imaging method was useful in environmental monitoring, when the moisture and vegetation differences were large, whereas imaging homogenous forest environment was more challenging.

Lähdeluettelo

- Carabassa, V., Montero, P., Crespo, M., Padro, J.-C., Pons, X., ym., 2020. Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring. *Journal of Environmental Management* 270, 110717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110717>
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R. & Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 18, 2869–2875. <https://doi.org/10.1080/014311697217396>
- Vollmer, M., Möllmann, K.-P. & Shaw, J. A., 2015. The optics and physics of near infrared imaging. *Proceedings SPIE 9793, Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2015*, 97930Z. <https://doi.org/10.1117/12.2223094>
- Yeom, J., Jung, J., Chang, A., Ashapure, A., Maeda, M., ym., 2019. Comparison of vegetation indices derived from UA data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing* 11, 1548. <https://doi.org/10.3390/rs11131548>
- Änäkkälä, M., 2020. Kasvuston biomassan määrittäminen multispektrikamerakuvien ja 3D-mallinnuksen avulla. *Maisterintutkielma. Maataloustieteiden osasto. Helsingin yliopisto*, 65 s.