

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Laajakaistaisella laserilla valaistu hyperspektrikamera

Teemu Kääriäinen, Timo Dönsberg  
Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, Tekniikantie 1, 02150 Espoo

#### Tiivistelmä

Hyperspektrikameroiden käyttö on rajoittunut hyvin valaistuihin olosuhteisiin. Erityisesti infrapuna-alueen hyperspektrikuvantaminen vaatii joko hyvin lähelle asetetut termiset valaisimet, tai aurinkoisen päivän. Tässä hankkeessa tutkittiin uudenlaista superjatkumolaseriin perustuvaa aktiivisesti valaistua hyperspektrikuvantamismenetelmää. Menetelmässä spektrinen erotelu tehdään valaisimessa, kameran sijaan. Tämä mahdollistaa minkä tahansa monokromaattisen infrapunakameran hyödyntämisen hyperspektrikuvantamiseen. Hankkeessa kehitetty prototyyppi perustuu VTT:n kehittämään mikroelektromekaaniseen Fabry-Pérot Interferometriin optiseen suodattimeen ja superjatkumolaser teknologiaan. Hankkeessa toteutettiin onnistuneesti aktiivisesti valaistava hyperspektrikameran prototyyppi. Prototyyppi karakterisoitiin ja testattiin sisätiloissa.

#### 1. Johdanto

Hyperspektrikuvantamista hyödynnetään laajasti monissa sovelluksissa teollisuudessa ja tutkimuksessa. Puolustus- ja sotilas-sovellukset ovat yksi suurimpia yksittäisiä markkinasegmenttejä hyperspektrikameroille. Hyperspektrikamera kuvantaa kohteesta kuvia usealla kapealla aallonpituuskaistalla. Eri kohteiden materiaalispesifinen aallonpituusriippuvainen heijastus mahdollistaa kohteiden luokittelun ja tunnistamisen hyperspektrikuvan perusteella.

Hyperspektrikuvantamisen höydyt puolustusellisiin ja sotilaallisiin sovelluksiin ovat selkeät. Laajalla aallonpituuskaistalle tehty kuvantaminen mahdollistaa kohteiden tunnistamisen tavalla, jota vastaan on hyvin vaikea puolustautua esimerkiksi naamioverkoilla tai materiaaleilla, sekä erilaisilla maalipinnoilla. Lähi-infrapuna-alue (900 - 2500nm) on erityisen hyödyllinen hyperspektrikuvantamiselle. Tämä alue sisältää useiden materiaalien osalta voimakkaita ja yksilöllisiä absorptioalueita ja -piikkejä, ja täten mahdollistaa paremmin niiden luokittelun ja tunnistamisen.

Yksi merkittävimpiä rajoitteita lähi-infrapuna-alueen hyperspektrikuvantamiselle on valaisu. Koska hyperspektrikamera mittaa ainoastaan hyvin kapeata aluetta kaikesta kohteeseen osuvasta valaisusta, asettaa se tarkat vaatimukset valaisuolosuhteille. Kuvantaminen ilman keinovaloa onnistuu ainoastaan päivisin. Ideaalisesti olosuhteet ovat pilvetön päivä ja varjostamattomat kohteet. Hyperspektrikuvantaminen pilvisenä päivänä on rajoittunutta, mutta mahdollista. Hyperspektrikameroiden kanssa käytettäviä valolähteitä ovat lähinnä termiset valaisimet. Termiset lähteet eivät kuitenkaan mahdollista pitkää käyttöä, sillä epäkoherenssi valaisu hajailee hyvin nopeasti matkan kasvaessa. Lisäksi suuri tehontarve rajoittaa kenttätoimintaa, sekä menetelmän hyödyntämistä esimerkiksi miehittämättömissä ilma-aluksissa.

Superjatkumolaserit yhdistävät perinteisten laserien pitkän kantaman ja termisen lähteen kaltaisen laajaan emissiospektriin. Nämä lähteet perustuvat yksivärisen korkeatehoisen laserpulsin spektriseen leviämiseen epälinearisessa materiaalissa, tyypillisesti optisessa kuidussa. Kun niin sanotun pumppulaseripulsin tehoitehoisuus epälinearisessa materiaalissa kasvaa tarpeeksi suureksi, usea optinen epälineaarinen efekti johtaa kaottiseen tapahtumasarjaan, jonka seurauksena yksivärisen laserin spektri leviää parhaimmillaan kattamaan koko kuidun tu-

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

keman aallonpituusalueen.

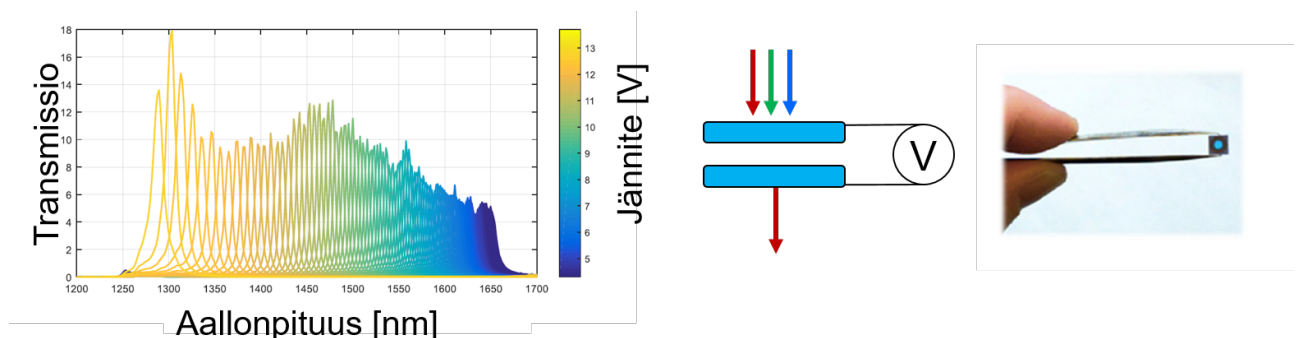
Superjatkumolasereita on käytetty etäältä tehtäviin spektrimittauksiin. Kuitenkin kamerapohjainen hyperspektrikuvantaminen hyödyntäen superjatkumolasereita on jäänyt vähälle huomiolle. Tässä työssä rakennetaan täysin uudenlainen aktiivinen hyperspektrikuvantamisjärjestelmä, joka perustuu VTT:llä kehitettyyn superjatkumolähteeseen, sekä mikroelektromenkaaniin (MEMS) optiseen Fabry-Pérot Interferometri (FPI) suodattimeen. Aktiivisen valaisun ansiosta, tämä laitteisto mahdollistaa monia sovelluksia, joihin passiivinen hyperspektrikamera ei sovellu.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella, rakentaa ja demonstroida aktiivisen hyperspektrikuvantamisjärjestelmän prototyyppi. Prototyyppi perustuu jo olemassa olevaan superjatkumolähteeseen ja MEMS FPI teknologiaan, mahdollistaen prototyypin rakentamisen lyhyessä ajassa. Tutkimuksen avainkysymyksiä oli toimitko superjatkumolähteen suodattamiseen perustuva superjatkumolähte hyperspektrikuvantamiseen.

## 3. Aineisto ja menetelmät

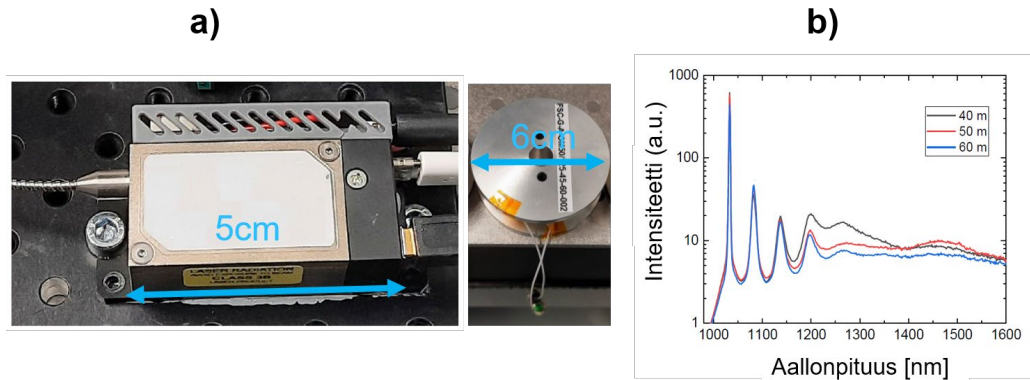
Tutkimuksessa käytetään VTT:n kehittämiä MEMS FPI optisia suodattimia. MEMS FPI perustuu kahden peilin väliin muodostuvaan Fabry-Pérot interferometriin. FPI resonanssiaallonpituutta voidaan vaihtaa, muuttamalla kahden peilin etäisyyttä staattisella jännitteellä. Tämä on esitetty Kuvassa 1, jossa on kuvaajaan piirretty MEMS-FPI läpäisy-spektri, usealla eri jännitteellä. Pienen rakenteensa ansiosta, resonanssiaallonpituuden vaihtaminen tapahtuu hyvin nopeasti, muutamissa millisekunneissa. Tässä työssä käytetyt FPI suodattimet mahdollistavat valon suodattamisen 1300 - 1650nm välillä ja noin 10nm spektrisen resoluution.



**Kuva 1. Mikromekaanisen Fabry-Pérot suodattimen läpäisykaista eri jännitteillä, havainnekuva toiminnasta, sekä valokuva suodatinelementistä.**

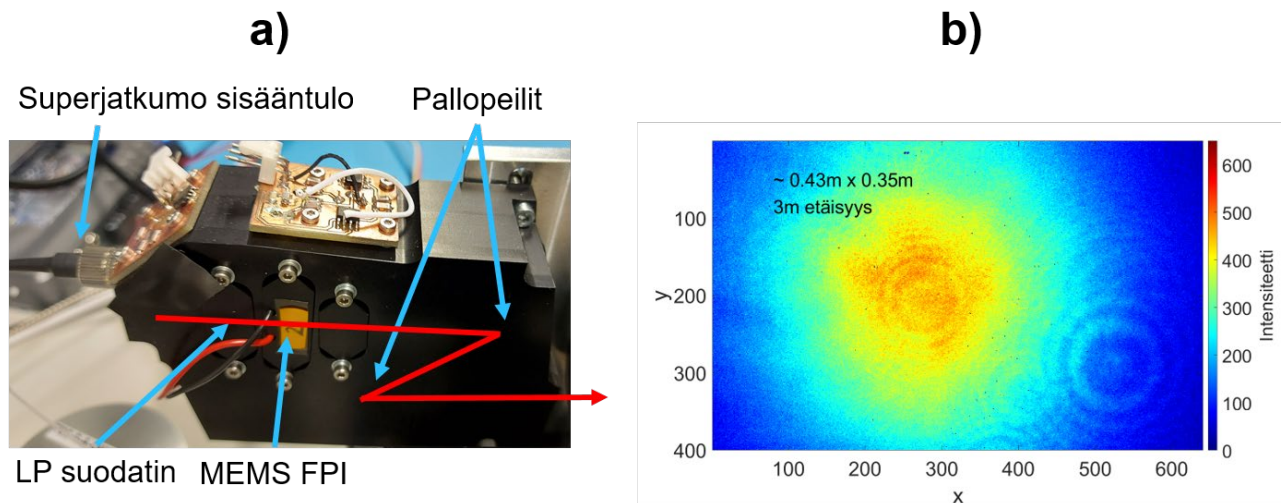
MEMS FPI kokoluokka on millimetreissä, joten ratkaisu ei sovellu suuren kamerakennon eteen integroitavaksi. Vaihtoehtoinen ratkaisu kameraan integroitaviin suodattimiin on samaan periaatteeseen perustuvat piezo-elektroniset optiset suodattimet, joiden pinta-ala on huomattavasti suurempi, mutta myös niiden ohjaus on huomattavasti hitaampaa. MEMS FPI:n lisäksi testeissä käytettiin perinteisiä kaistanpäästösuodattimia kameran edessä vertailua varten.

Tässä työssä rakennetun superjatkumolähteen pumppulähde, sekä suojattu generointikuitu ovat esitetty Kuvassa 2a. Tämä kompakti superjatkumolähde tuottaa 300mW keskimääräistä valaisutehoa lähi-infrapuna-alueella välillä 1000 - 2300nm. Valaisun emissiospektri on esitetty kuvassa 2b. Lähdeä testattiin usealla generointikuidun pituudella, optimin emissiospektrin määrittämiseksi. Kuvassa 2b on esitetty esimerkkinä 3 eri kuidun pituutta ja mitatut emissiospektrit.



**Kuva 2. Superjatkumolähteen pumpplaser (a) ja generointiin käytetyt kuiturullat (b)**

Generoitu superjatkumo tuodaan kuidussa MEMS FPI lähetinyksikölle, joka suodattaa valosta halutun kaistan. Lähetinyksikkö on esitetty kuvassa 3a. Säteestä suodatetaan ensin pois aallonpituudet, jotka ei osu MEMS FPI suodattimen päästökaistalle. Tämän jälkeen valo kulkeutuu MEMS FPI suodattimen läpi. Suodatettu valo kulkee säteenmuokkaus optiikan läpi ja ulos lähettimestä saadaan kollimoitu säde. Kollimoitu valo hajotetaan kohteelle erillisellä lyhyen polttovälin linssillä. Divergenssillä voidaan vaikuttaa säteilykuvion kokoon kohteella. Esimerkki säteilykuvion on esitetty Kuvassa 3b.



**Kuva 3. a) MEMS FPI lähetinyksikkö ja esimerkki valaisuprofiilista 3 metrin etäisyydellä.**

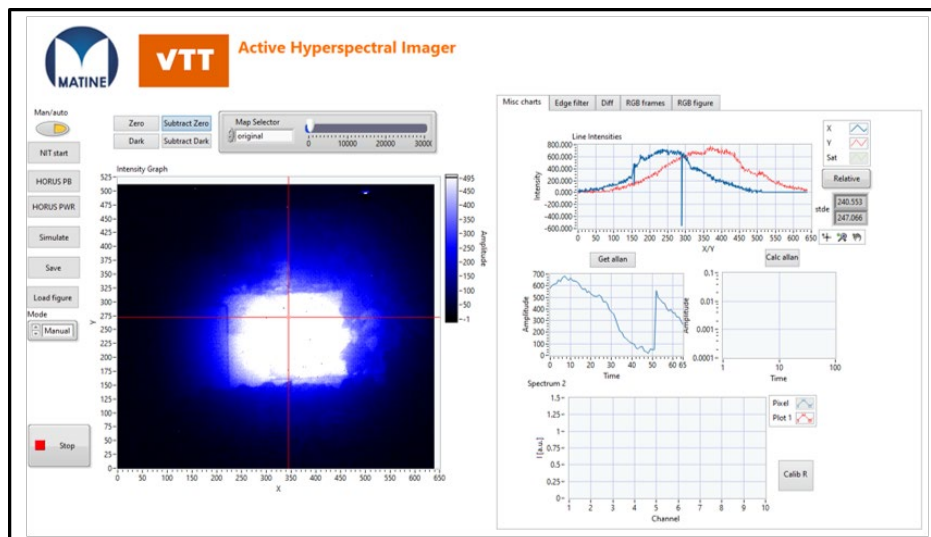
Vastaanottimena käytettiin 640 x 520 pikselin Indium Gallium Arsenide (InGaAs) kuvantavaa anturia. Anturin aallonpituusvaste on 900 - 1700nm, mikä tunnetaan myös short wave infrared (SWIR) alueena. Useimmat SWIR alueella toimivat kamerat voidaan yhdistää tämän työn superjatkumolähteeseen. Aallonpituusvasteen lisäksi anturin vaatimuksena on, että kuvien välillä anturilta saadaan kellosignaali. Tämä mahdollistaa aallonpituusvalinnan synkronoimisen niin että se tapahtuu kuvien välisenä "readout" aikaan, jolloin anturikennoon keräytyneet varaukset luetaan. Tällöin jokainen yksittäinen anturilta saatu kuvat on valaistu ainoastaan yhdellä aallonpituuskaistalla.



**Kuva 4. Vastaanottimena käytetty kuvantava InGaAs anturi ja yksi työssä käytetyistä objektiiveista.**

Kameran edessä käytettävän objektiivin koko vaikuttaa suoraan kerättävän valon määrään ja täten toimintaetäisyyteen. Tässä hankkeessa objektiivin koko säilytettiin maltillisen kokoisena, mutta suuremman objektiivin käyttämisen tuoma etu on suoraviivaisesti laskettavissa. Tärkeä suunnittelu parametri objektiivin kehityksessä on kromaattinen aberratio, joka johtuu linssi-pohjaisen objektiivin polttopisteen aallonpituusriippuvuudesta. Tässä työssä käytettiin akromaattisia tuplalinssejä, joissa kahden linssin yhdistelmällä efektiä voidaan minimoida.

Kameran ja optisen suodattimen asennon ohjaamiseen ja synkronoimiseen käytettiin field programmable gate array (FPGA) piiriin pohjautuvaa kehitysalustaa. FPGA ohjelma lukee kameralta saatavia kellosignaaleja. Kun kamera asettuu "readout" -tilaan, FPGA ohjelma vaihtaa MEMS FPI suodattimen aallonpituutta seuraavaa kuvaa varten. Tässä työssä käytettiin ennalta määrättyä rutiinia, joka mittaa hyperspektrikuva 100 eri aallonpituuskanavalla. Erillinen ohjelmisto (Kuva 5) kehitettiin kuvien lukemiseen ja datan tallentamiseen.



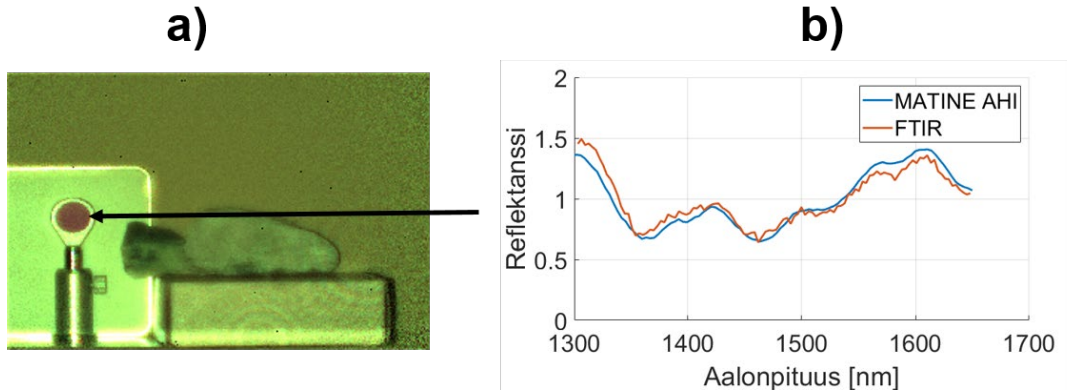
**Kuva 5. Kehitetyn aktiivisen hyperspektrikuvantajan käyttöliittymä.**

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Rakennettua laitteistoa testattiin sisätiloissa 3-5m etäisyyksillä mittatekniikan keskuksessa, Espoossa. Kohteina käytettiin yleisesti saatavilla olevia, eri materiaaleista koostuvia kappaleita. Ensimmäisessä testissä vertailtiin etäältä mitattua spektriä verrattuna referenssilaitteistolla mitattuun spektriin. Referenssilaitteistona käytettiin fourier transform infrared spektrometriä (FTIR). Kuvassa 6a on hyperspektrikuva kohteesta, esitettynä RGB kuvana. RGB kuva on generoitu käyttämällä kolmea valittua kanavaa, 100 kanavaisesta hyperspektridatasta. Kuvassa käytettiin aallonpituuksia 1310nm, 1400nm ja 1600nm (RGB). Kuvassa 6b on eristetty norma-

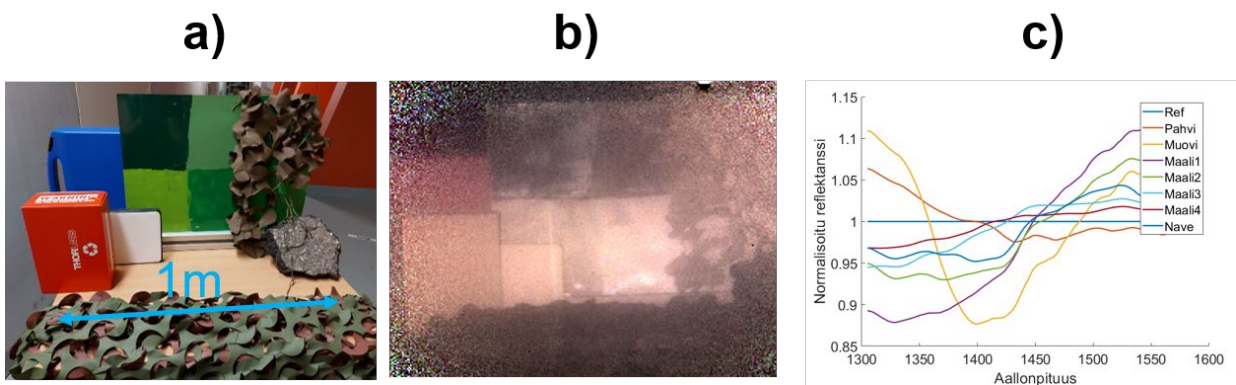


lisoitu spektri nuolen osoittamasta kohteesta, jolla on tunnetusti vaihteleva spektrivaste mitatulla aallonpituusalueella. Mittaus tehtiin n. 3m etäisyydeltä. Aktiivisella hyperspektrikuvantajalla mitattu spektri ja referenssilaitteistolla otettu spektri vastaavat hyvin toisiaan. Hyvä vastaavuus referenssidatan ja aktiivisen hyperspektrikuvantajan välillä mahdollistaa ulkoisten spektrikirjastojen hyödyntämisen käytännön sovelluksiin.



**Kuva 6. Aktiivisen hyperspektrimittauksen datan validointi. Mitatusta hyperspektrikuvasta eristetty spektri (sininen) ja referenssimittaus FTIR spektrometrillä (punainen).**

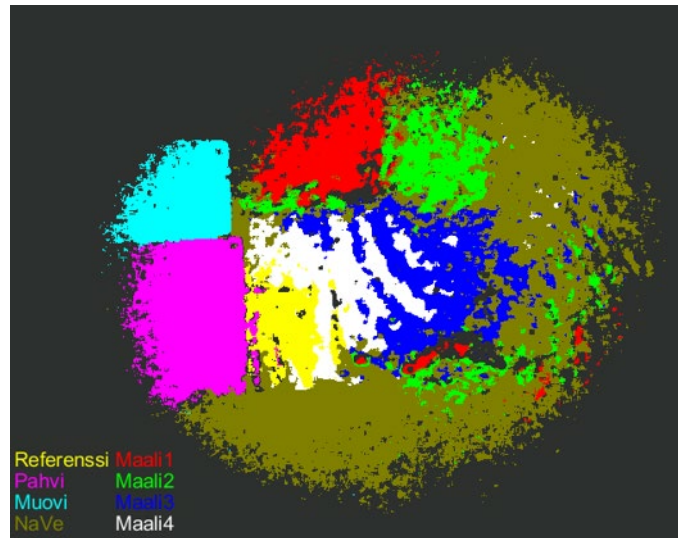
Kehitettyä laitteistoa testattiin valikoitujen testikohteiden kuvantamiseen ja luokitteluun. Mittaukset tehtiin n. 5m etäisyydeltä. Kuvassa 7a on esitetty valokuva testikohteiden asettelusta. Kohteina käytettiin kaupallista naamioverkkoa, alumiinilevyä, jossa käytetty neljää eri vihreää maalia, muovia, pahvia, sekä valkoista referenssikohdetta. Kuvassa 7b on esitetty kohde mitattuna 5m matkalta RGB kuvana. RGB kuva on generoitu käyttämällä kolmea valittua kanavaa hyperspektridatasta. Kuvassa käytettiin aallonpituuksia 1310nm, 1425nm ja 1550nm RGB kuvan muodostamiseen. Kuvassa 7c on esitetty hyperspektrikuvasta erotellut spektrit eri testikohteille. Kuvannettavan alueen koko oli n. 0.5m x 1m. Yhden kanavan mittaamiseen kului 0.182s. Koko 100-kanavaisen hyperspektri kuution mittaamiseen kului 18.2s. Mittauksessa käytetyn objektiivin halkaisija oli 25.4mm.



**Kuva 7. Valokuva testikohteista (vasen), sekä RGB kuva generoitu hyperspektridatasta.**

Yhdessä keskiarvoistamattomassa hyperspektrikuvassa on yhteensä 332800 spektriä. Tämä asettaa rajoituksen luokittelualgoritmeille, mikä halutaan säilyttää reaaliaikainen tai lähes reaaliaikainen operaatio. Projektissa testattiin luokittelualgoritmeja, erityisesti algoritmin nopeutta silmällä pitäen, pyrkimyksenä löytää algoritmi, joka mahdollistaisi kohteiden luokittelun lähes reaaliajassa. Yksi esimerkki kevyeen luokitteluun on, spectral angle mapper (SAM) algoritmi. Algoritmi koulutettiin käyttämällä Kuvassa 7 esitettyä dataa. Referenssispektrit valittiin

hyperspektrikuvasta (Kuva 7c), joiden perusteella algoritmi opetettiin luokittelemaan pikseleitä näihin ryhmiin. Luokittelualgoritmin tulos on esitetty kuvassa 8. Kuvan luokitteluun kului 4s teollisuuskäyttöön tarkoitetulta kannettavalta tietokoneelta, kun käytössä oli 75 spektristä kanavaa.



**Kuva 8. Spektrinen luokittelu testikohteille kuvan 7 hyperspektridatasta. Algoritmin tunnistamat kohteet ovat värikoodattu.**

## 5. Loppupäätelmät

Hankkeessa kehitettiin kompakti aktiivinen hyperspektrikuvantaja. Kuvantaja karakterisoitiin onnistuneesti, sekä sitä demonstroititiin sisätiloissa kohteiden tunnistamiseen. Lähettimeen integroitu MEMS FPI suodatin mahdollistaa hyvin nopean aallonpituusvalitsimen superjatkumolaserille. Tällä lähestymistavalla on huomattavia etuja verrattuna perinteiseen suodattamiseen kamerayksikössä. Ensiksi, se mahdollistaa minkä tahansa yksivärisen pimeäkameran käyttämiseen hyperspektridatan nauhoittamiseen. Ainoa vaatimus kameralle on sopiva aallonpituusvaste. Toiseksi, kun aallonpituuserottelu tapahtuu lähettimessä, valaisu pysyy silmäturvallisena huomattavasti suurempitehoisilla superjatkumolähteillä verrattuna tilanteeseen, jossa koko superjatkumon teho valaisee kohdetta kerrallaan. Pienempi lähetysteholla toimiva kuvauslaitteisto on myös vaikeampi havaita. Hankkeelle asetetut tavoitteet saavutettiin kenttämittauksia lukuun ottamatta, jotka peruutettiin Covid-19 pandemian johdosta.

Rakennettu laitteisto on riittävän kompakti integrointiin miehittämättömään lentoalukseen. Toimintasäteisyyttä on kuitenkin pystyttävä kasvattamaan. Tässä työssä tehty laitteisto testattiin 5 metriin asti, kuvantamalla n. 0.5m x 1m kohdetta. Etäisyyttä on mahdollista kasvattaa kasvattamalla superjatkumon tehoa ja kasvattamalla keräävän optiikan kokoa. Arviomme mukaan, on mahdollista kasvattaa toimintaetäisyyttä noin 20 metriin, merkittävästi kasvattamatta laitteiston kokoa. Puunrajasta toimivalla aktiivisesti valaisevalla hyperspektrikameralla voisi olla merkittäviä puolustuksellisia, sotilaallisia sekä turvallisuus alan sovelluksia.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tässä hankkeessa kerättyjä tieteellisiä tuloksia on julkaistu Optics Letters lehdessä. Julkaisu on luettavissa: <https://doi.org/10.1364/OL.439551>.