

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Termokrominen adaptiivinen naamiointimenetelmä - osahanke B

Karri Palovuori, Professori, Tampereen yliopisto, +358408490093, karri.palovuori@tuni.fi
TAU:n työryhmä: Jukka Vanhala, Aki Halme, Teemu Salo

TIIVISTELMÄ

Hankkeessa on tutkittu termokromisten värien soveltuvuutta naamiointissa ja kehitetty laskentamenetelmiä värien kerrosrakenteiden ja spektrien laskentaan. Lisäksi toteutettiin ohjelmisto demonstraattorin ohjaamiseen. Osahankkeiden A ja B yhteistuloksena toteutettiin termokromisiin materiaaleihin perustuva 1 m² näyttöpintademonstraattori.

1. Johdanto

Sotilaskalustolle asetettuja keskeisiä vaatimuksia ovat liikkuvuuden ja tulivoiman lisäksi suojautuminen. Osa suojautumista on haitata vihollisen havainnointia. Suuri osa havainnoinnista tapahtuu edelleen visuaalisella spektrikaistalla. Kyky maastouttaa sotilaita ja sotilaskalusto ympäröivään maastoon on nykyaikaisellakin taitelukentällä edelleen merkittävässä asemassa. Sotilaskaluston maastouttaminen vaatii yleensä vähintään muutamien tuntien työvoimaintensiivistä työskentelyä. Nykyaikainen sodankäynti edellyttää joukkojen ja kaluston nopeaa liikkuvuutta ympäristöstä toiseen. Sitä helpottaa, jos naamiointi voidaan tehdä ainakin osin automaattisesti käyttämällä naamiointipintoja, jotka adaptiivisesti vaihtavat väriään ja naamiointikuviota.

Suomelle sodankäynnin kannalta tyypilliset ympäristöt ovat peitteinen metsämaasto, pelto- tai metsäaukeat sekä kaupunkiympäristö. Näiden ympäristöjen värimaailmat muuttuvat tummien vihreiden ja ruskeiden metsäsävyyden kautta harmaisiin kaupunkimaisemiin. Edelleen värimaailmat muuttuvat vuodenaikojen mukaan vallitsevan kehityksen viedessä vallitsevaa säätä epävakaisemmaksi. Tällöin lumipeitteen muodostumisen ennustettavuus muuttuu entistä hankalammaksi ja paikalliset erot vallitsevien olosuhteiden välillä voivat olla hyvinkin suuret.

Naamiointin tulee toimia hyvin erilaisissa valaistusolosuhteissa. Ympäristön valoisuus voi vaihtua täydellisestä pimeydestä kirkkaaseen suoraan auringonvaloon (täydenkuun valo on n. 1mcd/m², hämärän ajan maisena n. 25cd/m², pilvinen päivä n. 700cd/m² ja auringon suoraan valaisema maisema n. 5000cd/m²). Kirkkaassa valossa, näkeminen perustuu silmän tappisoluihin ja silmä toimii fotooppisella alueella (luminanssitaso 10 - 10⁸ cd/m²). Tällöin silmä kykenee näkemään värejä ja näön spatiaalinen tarkkuus on hyvä. Himmeässä valaistuksessa (10⁻⁶ - 10⁻⁴ cd/m²) silmä käyttää näkemiseen sauvasoluja. Tällöin silmä ei erota värejä, näön spatiaalinen tarkkuus on alhainen ja liikkeen havaitseminen korostuu. Hämärässä on merkitystä erityisesti naamiointin valoisuuskontrastilla ja hyvässä valaistuksessa naamiointin väreillä ja kuvioiden muodolla.

Naamiointipinta voidaan toteuttaa joko aktiivisesti valoa säteilevänä eli emittoivana pintana tai passiivisena ympäristön valoa heijastavana pintana. Emittoivan pinnan tulee tuottaa valaistusolosuhteista riippuva määrä valoa, joka kirkkaana päivänä on haastavaa ja kuluttaa paljon energiaa. Emittoivan pinnan valontuottoa tulee myös aktiivisesti säätää ympäristön valaistuksen mukaisesti. Heijastavan pinnan värimuutokset perustuvat pinnan heijastusspektrin muokkaamiseen, mikä tehdään termokromisten materiaalien tapauksessa muuttamalla pinnan lämpötilaa. Pinta ei säteile aktiivisesti visuaalisella kaistalla eikä kuluta siihen energiaa. Pinta



myös sopeutuu ympäristön valaistukseen, koska sen heijastaman valon määrä muuttuu suoraan sille lankeavan valaistuksen mukaan.

Emittoivia pintoja kuten LED-matriiseja, tai OLED ja elektroluminesenssi pintoja voidaan jo nykyisellään tuottaa laajapinta-alaisina jopa rullalta-rullalle tekniikoin. Adaptiivisen naamiointin kannalta kiinnostava on LED-matriisi, jonka avulla voidaan tuottaa näkyvän alueen kaikki värit. Myös heijastavia pintoja voidaan valmistaa laajapinta-alaisesti rullalta-rullalle painotekniikoilla.

Termokromisten värien avulla voidaan tuottaa sekä maasto- että kaupunkiympäristöön soveltuva väripaletti suuripinta-alaisina painamalla termokromi-materiaalia sisältävä väri lämpötilaohjatulle pinnalle ilman muissa tekniikoissa tarvittavia kalliita elektrodirakenteita. Termokromisissa materiaaleissa väri muuttuu ympäristön lämpötilan muuttuessa ja teknologia vaatii toimiakseen sekä lämmityselementeistä että mahdollisesti myös jäähtyselementeistä koostuvan ohjausmatriisin. Ohjausmatriisin tutkimus ja toteuttaminen tapahtui Termonaamio osahanke A:ssa.

Tässä osahanke B:ssä on tutkittu värimuutosmateriaalien ominaisuuksia ja näyttöpinnan integrointia käyttäen pohjana VTT:n lämmitysmatriisia, joka koostuu 20x20 cm² kokoisista pikseleistä. Periaatteessa värimuutos voidaan toteuttaa kahdella eri periaatteella. Pinta voidaan tehdä yhdistämällä pikseleitä eri värimuutosmateriaaleista, esim. tavanomaisesti RGB-pikseleistä. Värimuutos on tällöin mustasta värilliseen tai vaaleasta värikylläiseen. Toinen mahdollinen toteutustapa perustuu termokromisen materiaalin käyttöön sulkimena, jolloin värimuutos tapahtuu mustasta läpinäkyvään. Läpinäkyvässä tilassa pikselin värin määrää pääosin taustan väri. Jälkimmäisessä lähestymistavassa on useita etuja: värimuutoksella on suuri dynamiikka, taustavärin voi valita vapaasti, intensiivinen musta väri ei-aktiivisessa tilassa, tarvitaan vain yhtä värimuutosmateriaalia ja on olemassa materiaaleja, joiden värimuutoslämpötila voidaan valita. Lisäksi voidaan rakentaa monikerrosrakenteita, joissa on eri lämpötiloissa väriään muuttavia materiaaleja. Ongelmana on värimuutosmateriaalien valinta, sekoittaminen haluttujen värisävyjen saamiseksi ja painaminen lämpömatriisin päälle.

Osahankkeiden yhteisenä tuloksena on valmistettu 1m² termokromisiin materiaaleihin perustuva adaptiivinen näyttöpintakalvo ja sen ohjaamiseen soveltuva lämpömatriisi ja sen ohjausohjelmisto. Näyttöpinta soveltuu värimaailmaltaan käytettäväksi sekä peitteisessä metsämaastossa että kaupunkiympäristössä.

2. Tutkimuksen tavoite

Projektin kokonaistavoitteena oli tutkia menetelmiä termokromisiin materiaaleihin perustuvan adaptiivisen naamioväripinnan toteuttamiseksi. Projektin jakeantuu kahteen osaprojektiin, joista osaprojekti B:ssä tutkimuksen päätavoite on termokromiväreillä tuotettavien, erityyppisiin toimintaympäristöihin soveltuvien värimaailmojen toteuttamisessa ja osaprojekti A:ssa vastaavan adaptiivisen naamiopinnan lämpöohjausmatriisin valmistamisessa. Tämän osaprojektin TAU:lla tehtävät työt kohdentuvat termokromisilla materiaaleilla toteutetun pinnan värien sekoittamiseen, väripinnan rakenteeseen, materiaalivalintoihin, ohjausohjelmiston kehittämiseen sekä toiminnan testaukseen. Toinen osaprojekti suoritetaan VTT:n toimesta.

Hankkeen tehtävät olivat:

- Valita termokromiset värimuutosmateriaalit ja mitata niiden optiset ominaisuudet, erityisesti dynamiikka, läpinäkyvyys sekä vaikutus pohjavärin sävyyn. Lisäksi tuli tutkia materiaalien soveltuvuutta eri pinnoitusmenetelmille.
- Valita väripinnan värit, joilla saavutetaan optimaalinen väriavaruus ja mitata niiden optiset ominaisuudet.
- Suunnitella pikselikonfiguraatio, joka tuottaa visuaalisesti hyvän kuvion.
- Suunnitella kerrosrakenteen, joka optimoi optiset ominaisuudet ja jolla saavutetaan riittävä muutosnopeus ja mekaaninen kestävyys.
- Kehittää edullinen ja luotettava valmistustapa, jolla voidaan tuottaa suuria pinta-aloja VTT:n pohjamateriaalille rullalta-rullalle.
- Testata materiaalien ja koko rakenteen ominaisuuksia, kuten värien oikeellisuutta.

3. Termokromiset värit

Termokromiset materiaalit muuttavat väriään lämpötilan muuttuessa. Värimuutos voi olla reversiibeli tai pysyvä. Materiaalit voidaan tehdä puolijohdeyhdisteistä, nestekiteistä tai epäorgaanisia tai orgaanisia metal-



liyhdisteitä käyttäen. Muutos väriässä tapahtuu ennalta määrättyssä lämpötilassa ja tätä kutsutaan termokromiseksi muutokseksi. Muutoksessa on tyypillisesti hystereesiä lämpötilan nousun ja laskun välillä. Kynnyslämpötilaa voidaan muuttaa lisäaineilla. Termokromisuutta voi esiintyä myös erilaisissa polymeerityypeissä kuten kestopuoveissa, geeleissä, musteissa, maaleissa tai kaikenlaisissa pinnoitteissa.

Termokromiset leukoväriaineet muuttuvat värittömiksi lämpötilan noustessa yli kriittisen muutoslämpötilan. Muutokset ovat joko reversiibeilejä tai irreversiibeileitä ja värimuutos tapahtuu noin 3 asteen lämpötilamuutoksilla. Aktivoitumisen lämpötilapisteet asettuvat tyypillisesti alueelle 10C – 80C.

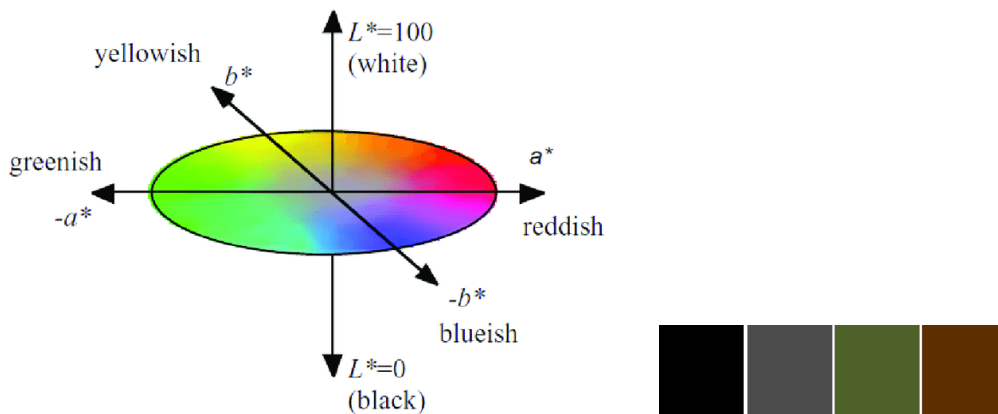
Termokromisten pigmenttien ja maalien saatavuus on hyvä. Projektille hankittiin testattavaksi ja demonstraattorissa käytettäväksi värejä kuudelta valmistajalta (SFXC, Matsui International Company, LCR Hallcrest, New Color Chemical, Uniglow ja Kremer pigments). Väriavaloikoima on myös hyvä, esim. New Color Chem valmistaa 15 eri sävyä, joita voi edelleen sekoittaa. Värien muutoslämpötila on myös valittavissa esim. Matsuiin väreissä on kymmenen eri vaihtoehtoa (15, 16, 18, 20, 25, 31, 35, 43, 63 ja 65 astetta).

Valmistajien ilmoittamat värien ominaisuudet vaihtelevat. Yleisesti saatavilla on ainoastaan värien geneerinen nimi ja muutoslämpötila. Jossain tapauksissa väristä on annettu Pantone-koodi, joka kertoo täsmällisen värin. Muita ominaisuuksia, kuten heijastus-, sironta- tai absorptiospektriä ei ole saatavilla ja ne pitää mitata.

3.1 Värijärjestelmä

Värijärjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa värien hallittu mittaaminen sekä dokumentointi. Pintavärien eniten käytetty järjestelmä on CIE:n $L^*a^*b^*$ tai lyhyemmin CIELab. Siinä väri ilmaistaan kolmella koordinaatilla: L^* vastaa valoisuutta, a^* vastaa sävyä akselilla vihreä-punainen ja b^* sävyä akselilla sininen-keltainen (kuva 1). L^* välillä 0 - 100, a^* ja b^* välillä -100 - 100. Kahden värin havaittua eroa kuvaa dE , joka on euklidinen etäisyys koordinaatistossa. Jos dE on alle 2, värejä on vaikea erottaa käytännössä. Alle 5 ero hyväksyttävissä.

Värihavaintoon vaikuttaa katsottavan pinnan heijastusspektri ja valolähteen spektri. Silmään saapuva valo stimuloi kolmea spektriin eri tavalla reagoivaa aistinsolua, jolloin saadaan ns. tri-stimulus arvot. Jatkuva spektri redusoiduu kolmeksi arvoksi, joista voidaan laskea värikoordinaatit jossain valitussa värijärjestelmässä. Kuvauksena värikoordinaateista takaisin heijastusspektriä ei siis ole yksikäsitteinen. Tässä työssä on käytetty ulkoympäristöön soveltuvaa D65-valolähddestandardia, joka vastaa 6500K väriämpötilaa.



Kuva 1. CIELab väriavaruus ja suunnilleen haluttuja sävyjä vastaavat värit.

Tavanomaisessa värien prosessoinnissa (näytöt, painotekniikka) pyritään laajaan väriavaruuteen. Emissiivisessä näytössä väri tuotetaan sekoittamalla additiivisesti kapeaspektrisiä RGB-pääväri-komponentteja, jotka rajaavat väriavaruuden. Painotekniikassa on käytössä substraktiivinen sekoitus CMYK-komponenteista. Naamiopinnassa on tietyt halutut värit, jotka ovat varsin tummia (pieni L^*) ja harmaita (alhainen värikylläisyys eli pieni $|a^*|$ ja $|b^*|$), jolloin väriavaruus on pieni (kuva 1). Halutut värit saadaan sekoittamalla laajaspektrisiä pigmenttejä oikeassa suhteessa.

3.2 Kubelka-Munk

Pinnan heijastavuus R tietyllä aallonpituudella riippuu vain materiaalin absorptio- ja sirontakertoimista K ja S (absorption and scattering coefficients) tuolla aallonpituudella. Eri aallonpituuksilla ei ole vaikutusta toisiinsa, jolloin kertoimia voidaan käsitellä vektoreina elementti kerrallaan. R , K ja S skaalataan välille 0-1.

Paksun värikalvon tapauksessa alusta ei vaikuta heijastusspektriin (kuva 2). Tällöin heijastusspektri R saadaan K/S -suhteesta ja kääntäen K/S voidaan laskea mitatusta heijastusspektristä. K/S -suhde riittää laskettaessa sekoituksia ns. yhden parametrin menetelmällä.

$$R = 1 + \left(\frac{K}{S}\right) - \sqrt{\left(\frac{K}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{K}{S}\right)}$$

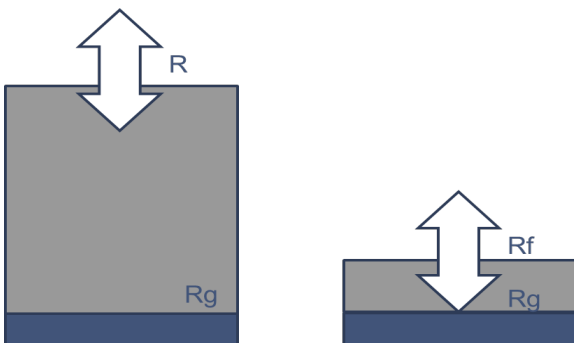
$$\left(\frac{K}{S}\right) = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

Ohuen värikalvon tapauksessa (kuva 2) pohjaväri R_g vaikuttaa heijastusspektriin. Tulokseen vaikuttaa myös kerrospaksuus σ .

$$R_f = \frac{1 - R_g(a - b \coth bS\delta)}{a - R_g + b \coth bS\delta},$$

$$a \equiv (S + K)/S,$$

$$b \equiv (a^2 - 1)^{1/2}$$



Kuva 2. Paksussa värikalvossa vasemmalla alustan heijastus R_g ei vaikuta pinnan heijastusspektriin, toisin kuin ohuessa kalvossa oikealla.

Haluttaessa laskea kahden tai useamman komponentin sekoituksen heijastusspektri, yhden parametrin menetelmässä oletetaan, että yksi komponentti dominoi S -arvoa tai että S on sama kaikilla komponenteilla. Sekoituksen K ja S kertoimien suhde saadaan, kun tiedetään komponenttien osuudet ja K/S -suhteet, jotka saatiin mittaamalla spektrofotometrillä paksun kalvon heijastusspektri kustakin komponentista. Tulos on käytännössä suuntaa antava approksimaatio

$$(K/S)_{\text{mix}} = C_1(K/S)_1 + C_2(K/S)_2 + \dots$$

Kahden parametrin menetelmässä sekoituksen K ja S kertoimien suhde saadaan, kun tiedetään komponenttien K - ja S -kertoimet ja osuudet. Tarvitaan siis sekä K että S eikä vain niiden suhde. Tavallisesti valmistajat ilmoittavat vain värikoordinaatit, jos sitäkään, mahdollisesti R , ei koskaan K ja S .



$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\text{mix}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i K_i}{\sum_{i=1}^n C_i S_i}$$

Laskennassa on yksi tuntematon lisää ja tarvitaan kaksi mitattua spektriä kustakin komponentista. Mitataan R_f , tilanteessa, kun alusta on musta, jolloin R_g on nolla ja toisen kerran tilanteessa, kun alusta on valkoinen, jolloin R_g on 1 ja ratkaistaan.

$$S = \frac{1}{b\delta} \left(\operatorname{arccoth} \frac{1 - aR_{f,0}}{bR_{f,0}} \right)$$

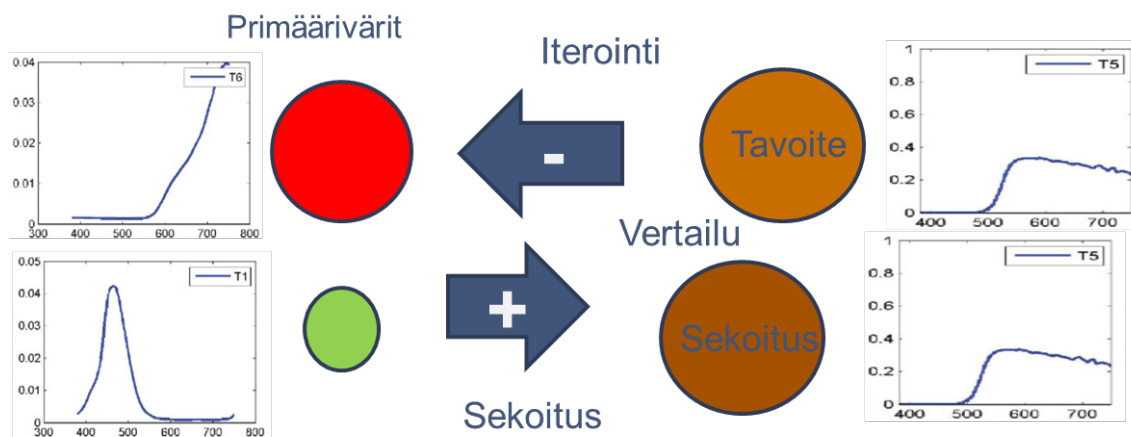
$$K = (a - 1)S,$$

$$a = \frac{1}{2} \left[R_{f,1} + \frac{R_{f,0} - R_{f,1} + R_{g,1}}{R_{f,0}R_{g,1}} \right]$$

$$b \equiv (a^2 - 1)^{1/2}$$

3.3 Optimointikoodi

Ongelmana on kuinka kahden tai useamman primäärivärin sekoitus tehdään eli mitkä ovat komponenttien suhteelliset osuudet, jotta saadaan aikaan haluttu väri. Värien sekoittamiseksi kirjoitettiin ohjelma, jolle annetaan sekoitettavien komponenttien heijastusspektrit sekä tavoiteltu CIELab väriarvo. Ohjelma käyttää yhden muuttujan K-M teorian mukaista laskentaa, jolloin tulos on lähinnä suuntaa antava. Ohjelma tuottaa reseptin, jossa on kunkin sekoitettavan komponentin prosenttiosuus. Vastaavasti voidaan optimoida CIELab-arvon sijasta heijastusspektriä esim. spektrikomponenttien pienimmän neliösumman suhteen (kuva 3).



Kuva 3. Iteratiivinen laskennallinen reseptin optimointi

3.4 Kerrosrakente

Kun lasketaan pinnan väriä rakenteessa, jossa on useita ohuita värikerroksia, kaikkien kerrosten vaikutus tulee ottaa huomioon. Lisäksi eri kerrosten ominaisuudet vaihtuvat lämpötilan mukaan eli laskenta tulee suorittaa useassa eri lämpötilassa. Laskenta aloitetaan rakenteen pinnasta, jonka haluttu väriarvo tunnetaan eri tilanteissa. Lisäksi tunnetaan alla olevan värikerroksen haluttu väri. Käytetään K-M teorian ohuen kalvon tilanteen kaavoja, joilla saadaan ratkaistua värikerroksen absorptio- ja sirontakertoimet ja samalla heijastusspektri. Optimoidaan laskennallisesti värikerroksen toteuttamiseen käytettävien värien osuudet.

Seuraavan värikerroksen laskenta toteutetaan samalla tavalla. Periaatteessa pitää ottaa huomioon myös päällimmäisen värittömässä tilassa olevan värikerroksen vaikutus alempaan värikerrokseen.



Hanketta varten saatiin värikoordinaatit väreistä, jotka näyttöpinnan tulisi toteuttaa (L*a*b* -arvot ruskea 33,5 5,0 8,0, harmaa 45,0 2,0 5,0, vihreä 33,1 -4,1 9,2, musta 25,6 0,1 0,1). Nämä vastaavat erityisesti naamiointitarkoituksiin kehitetyn RAL F9-sarjan värejä Sandbraun, Tarngrau, Bronzegrün, Teerschwarz (kuva 4).

Nummer	Name	Farbmuster ^[3]
RAL 6031	Bronzegrün	
RAL 8027	Lederbraun	
RAL 9021	Teerschwarz	
RAL 1039	Sandbeige	
RAL 1040	Lehmbeige	
RAL 6040	Helloliv	
RAL 7050	Tarngrau	
RAL 8031	Sandbraun	

Kuva 4. RAL F9 väriskaala ([https://de.wikipedia.org/wiki/RAL-Farbe#Tarnfarben der Bundeswehr \(RAL F9\)](https://de.wikipedia.org/wiki/RAL-Farbe#Tarnfarben_der_Bundeswehr_(RAL_F9)))

Vihreä väri toteutettiin sekoittamalla Winsor&Newton Galeria-sarjan akryylivärejä. Resepti laskettiin käyttämällä Color Mixing Tools Color2drop -ohjelmaa (<https://zsolt-kovacs.unibs.it/colormixingtools>). Valittu resepti antaa CIEL*a*b* arvoksi 33,4, -2,1, 9,8 ja virheeksi dE=1,4. Sekoituksessa on 1 osa 337-Lamp Black + 8 osaa 744-Yellow Ochre + 2 osaa Hookers green.

4. Näyttöpinnan toteutus

Tutkimussuunnitelman mukaisesti projektin päätuotos on 1 m² suuruinen termokromimateriaaleihin perustuva näyttöpinta. Itse näyttöpinta ja sen ympäristön havainnoiva adaptiivinen älykäs ohjaus, jolla tarkoitetaan näyttöpintasysteemin kykyä havainnoida ympäristöä ja mukautua siihen, toteutetaan myös tässä osahankkeessa B. Osahankkeessa A on toteutettu menetelmä termokrominäyttöpinnan ohjaamiseksi kontrolloimalla halutulla tavalla pinnan lämpötilaa.

1 m² suuruinen näyttöpinta koostuu 5 x 5 matriisista, mikä on kohteelle, sen koosta riippumatta, tyypillinen maastouttamisresoluutio. Matriisi on pinnoitettu kolmekerroksisella termokromipinnalla (kuva 5), joka vaatii kyvyn säätää lämpötila kolmelle eri tasolle. Jokaisen matriisin pikselin lämpötila täytyy siis kyetä mittaamaan ja vertaamaan sitä haluttuun asetusarvoon.

Naamiopinnan värikalvon rakenteessa päädyttiin tekemään kerrosrakenne, jossa alimmaisena on vihreä normaali värikerros ja sen päällä kaksi kerrosta termokromisia värejä. Keski-kerroksen tavoiteväri on harmaa (Tarngrau) ja sen muutoslämpötila on 47C. Päälimmäisen kerroksen tavoiteväri on ruskea (Sandbraun) ja sen muutoslämpötila on 27C. Substraattina on 125um paksu PET-kalvo. Jotta termokrominen väri saatiin painettua sileälle kalvolle, pohjaväri on painettu kalvon alapinnalle.

Termokromivärien optimoinnin tuloksena päälimmäinen kerros painettiin värillä SFXC Sunset orange. Koska kerrospaksuus on n.20um, se on läpikuultava, jolloin alla oleva tumma harmaa tekee pintaväristä erittäin lähellä (dE 1,26) tavoitetta olevan ruskean. Keski-kerros on painettu värillä SFXC Black, joka ohuena kerroksena tuottaa harmaan, joka muistuttaa haluttua (dE=9,67). Pohjaväri, joka sinänsä on hyvin lähellä (dE=1,4) haluttua, muuttuu päällä olevien värikerrosten vuoksi vaaleammaksi (dE=11,34). Erot johtuvat pääosin siitä, että termokromisen värin värittömässä tilassa olevaa diffuusia sirontaa ei ole otettu riittävästi huomioon kerrosrakenteessa.



Tavoite

Lab 33,5 5,0 8,0
Lab 45,0 2,0 5,0

SFXC orange	~20um
SFXC black	~20um
PET-kalvo	~125um
W&N Galeria	~40um

Lab 33,1 -4,1 9,2

Tulos

Lab 32,62 4,69 8,84 dE=1,26
Lab 35,37 0,36 4,73 dE=9,67

Lab 43,68 -0,08 8,40 dE=11,3

Kuva 5. Termovärikalvon kerrosrakenne sekä tavoitellut ja saavutetut CIEL*a*b* arvot ja virheet dE.

Demonstraattorin 1m² värikalvo toteutettiin erillisinä 20cm x 20cm arkkeina, joille värit silkkipainettiin ja jotka uunituksen jälkeen liimattiin spray-liimalla lämmityskalvon päälle. Lämmityskalvo on puolestaan kiinnitetty kennomuoviseen tukilevyyn ja virransyöttö tapahtuu ohuilla johtimilla matriisin reunoille (kuva 6).



Kuva 6. Valmis integroitu demonstraattori, jolle kuvassa on ladattu shakkiruudukkokuva. Oikealla näkyy virransyöttöjohtimet sekä tukilevyn harmaata reunaa.

Integroitua rakennetta testattiin laboratorio-olosuhteissa. Yhden testin videosta on kuvakaappaus alkutilanteesta, 15s kohdalta lämmityksen aloituksesta ja 100s kohdalta (kuva 7). Pikseleissä olevat tummat keski-osat johtuvat hiukan epätasaisesta lämmityksestä. Lisäksi lämmityselementtien virransyöttöjohtimet lämpenevät, mikä näkyy kuvioissa. Keskimäinen tumma harmaa saavutetaan kohtuullisessa ajassa, mutta maksimilämmitysteho ei oikein riitä pohjalla olevan vihreän värin paljastumiseen riittävän nopeasti. Lämmitystehoa rajoitti ohjauselektronikka ja matriisin johdotus.

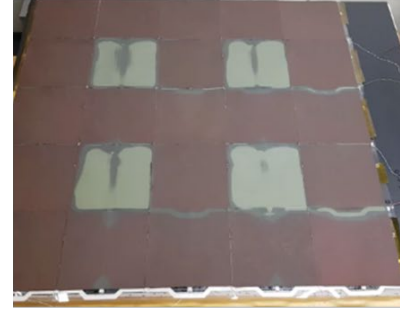
Alkutilanne



n. 15s



n. 100s



Kuva 7. Kuvakaappaus testivideoilta, jossa ohjataan neljää pikseliä. Vasemmalla tilanne, jossa pikseleiden lämpötila on alle 25C, keskellä tilanne, jossa lämpötila yli 30C, mutta alle 40C ja oikealla tilanne, jossa lämpötila on yli 50C.

5. Näyttöpinnan ohjaus

Näyttöpintaa ohjataan MATLAB-ympäristöön rakennetun, PC:llä ajettavan käyttöliittymän (kuva 8) kautta. Pikselien lämpötilan säätöön käytetään VTT:n toteuttamaa ohjainelektronikkaa, joka kykenee vuorollaan lämmittämään yksittäisiä pikseleitä tai pikselirivejä. Jäähtyminen perustuu passiiviseen lämpöenergian lauhutumiseen. Kukin pikseli sisältää lämpötila-anturin, joita voidaan lukea saman ohjainelektrniikan kautta.

Käyttöliittymä (kuva 9) kaappaa reaaliaikaista videokuvaa PC:hen liitetystä videokamerasta ja esittää sen käyttäjälle, joka sen perusteella voi määrittää kuvasta termonaamion sijainnin ja asennon ja tarkemmin tarkastella sen pikseleitä, sekä pikseleitä vastaavaa aiempaa taustan väritystä. Samalla termonaamion tavoitetilaa on aseteltavissa valitsemalla haluttu naamioväri ja asettamalla se kohdepikseleihin. Naamion lämpötila-anturit mittaavat pikselien todellista lämpötilaa ja sitä vastaava naamioväri on myös reaaliaikaisesti seurattavissa. Nämä neljä tietoa (reaaliaikainen näkymä, alkuperäinen näkymä, reaaliaikainen lämpötilaa vastaava termoväri, tavoitetermoväri) yhdistetään käyttöliittymän keskelle vertailukuvaksi, josta helposti voidaan seurata näiden keskinäistä vastaavuutta ja muutosta.

TAU Termonaamio B

Ohjausohjelma
PC:llä



VTT Termonaamio A

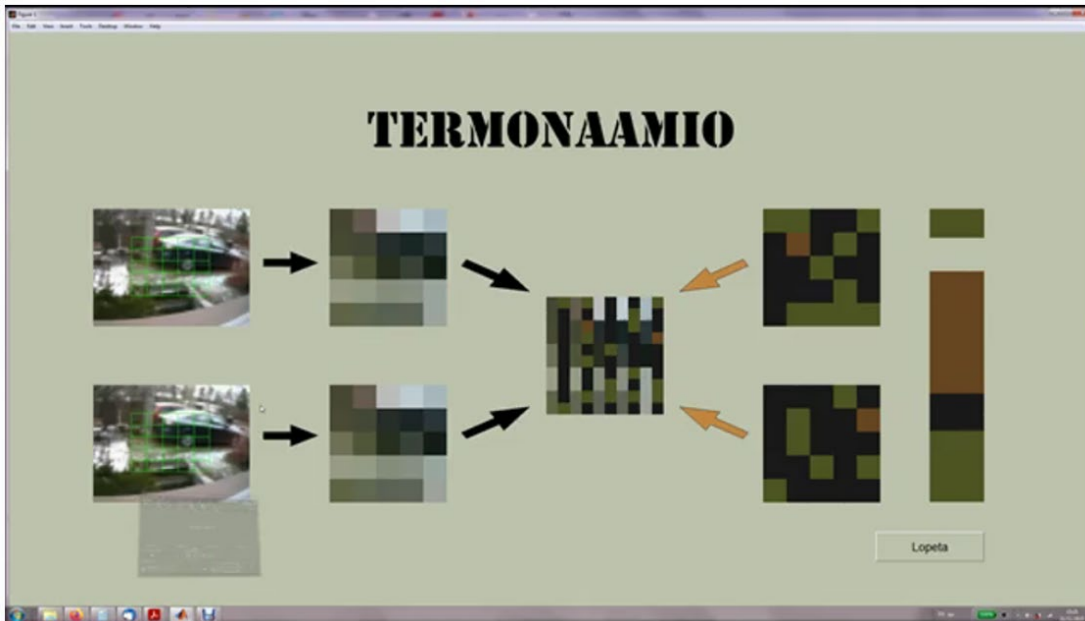
Lämmitysmatriisi



TAU Termonaamio B

Väripinta

Kuva 8. Demonstraattorin kokonaisrakenne



Kuva 9. Termonaamio-demonstraattorin ohjausohjelman pääkkuna. Vasemmassa yläkuvassa olevasta videokameran kuvasta valitaan alue, jonka naamiopinnan tulisi toistaa. Vasemmalla alhaalla on pysäytyskuva tilanteesta, joka oli aluetta valittaessa. Oikealla ylhäällä on lämmitysmatriisin raporttoimien lämpötilojen perusteella muodostettu kuva naamiopinnasta ja oikealla alhaalla on käsin aseteltu tavoitetilanne. Keskellä on mosaiikkikuva kaikista neljästä. Oikeassa reunassa on eri ohjauslämpötiloja vastaava väriskaala, josta voidaan valita kulloinkin haluttu väri tavoitetilannematriisiin aseteltavaksi pikselin arvoksi.

6. Yhteenveto ja havaintoja

Termonaamio A ja B hankkeiden aikana suunniteltiin ja toteutettiin termokromimateriaaleihin perustuva näkyvän alueen 1 m² suuruinen adaptiivinen näyttöpinta. Pinta koostuu 20 x 20 cm² pikseleistä, joita monistamalla voidaan tuottaa suurempia pinta-aloja. Sekä lämmityspinta että näytön aktiivinen väripinta on valmistettu painotekniikoilla.

Värien hallinta on todennettu mahdolliseksi, koska haluttu värivalikoima on naamiointisovelluksessa rajattu tiettyihin sävyihin. Värit joudutaan sekoittamaan valmistajien perussävyistä. Hankkeessa on kehitetty menetelmät värisävyjen reseptien laskennalliseen optimointiin sekä kerrosrakenteen ohuiden värikerrosten laskeamiseen. Demonstraattorista tehdyillä mittauksilla todennettiin, että menetelmät toimivat, joskin vaativat lisää käytännön testaamista. Havaittiin esim., että kerrosrakenne tulee tehdä niin, että vaaleammat sävyt ovat alakerroksissa ja tummat päällä. Lisäksi termovärikerrosten läpinäkyvän tilan diffuusi sirona tulee ottaa paremmin huomioon laskennassa.

Demonstraattorissa käytettiin valmistajilta pieninä erinä saatuja pigmenttejä ja värejä, jolloin jouduttiin tyytymään muutoslämpötiloihin, jotka eivät olleet optimaalisia. Käytössä oli 27C ja 47C asteissa muuttuvia värejä. Parempaan lopputulokseen päästäisiin esim. 25C ja 31C materiaaleilla, jolloin tehontarpeeksi huoneenlämpötilassa tulee maksimissaan 100W/m² (olettaen ~10 W/K·m²) ja tyypillisessä tapauksessa, jossa on sama määrä erivärisiä pikseleitä, tehontarve on noin 50W/m².

Tällaisenaan demonstraattorin rakenne ei sovellu käytettäväksi. Suurin ongelma on hidas muutosnopeus, joka johtuu pienestä lämmitystehosta. Paremmalla mitoituksella muutosnopeutta voidaan helposti kasvattaa. Lisäksi rakenne on nyt tarpeettoman paksu, sillä se koostuu useista toisiinsa liimatuista kalvokerroksista. Kokonaisuus voisi olla esim. kolmasosan paksuinen nykyiseen verrattuna, jolloin myös lämpökapasiteetti pienenee kolmannekseen, mikä suoraan vaikuttaa pinnan lämpötilan muutosnopeuteen. Pysyvän tilan lämmitystehon tarvetta puolestaan voidaan parantaa eristämällä rakenne. Demonstraattorissa nyt pohjana käytetty eristelevy on kalvoon verrattuna massiivinen, jolloin sen lämpökapasiteetti hidastaa toimintaa. Pin-



nan tuottaman lämpösäteilyn määrää voidaan mahdollisesti vähentää selektiivisellä kalvolla.

Adaptiivisen ohjausohjelmiston jatkokehitystarpeina on naamiokuvion automaattinen tunnistus ja rajausta videokuvasta, kohdekuvan generointi automaattisesti naamion ympäristön perusteella, pinnan automaattinen säätö optimaaliseksi sekä liikkuvan naamion mukauttaminen vaihtuvaan ympäristöön.