

Tuuli Tuominen

VÄRIKVANTISOINTI JA SEN NYKYAIKAISET SOVELLUKSET

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Tuuli Tuominen: Värikvantisointi ja sen nykyaikaiset sovellukset
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2020

Värikvantisoinnin tavoitteena on esittää kuva käyttäen alkuperäistä pienempää värimäärää kuitenkin säilyttäen kuvan laatu ennallaan. Aiemmin värikvantisoinnin hyödyntäminen kuvia esittäessä on ollut pakollista laitteiston asettamien rajoitusten vuoksi, mutta nykyään tällaiset rajoitukset eivät ole enää ajankohtaisia. Tutkielmani tavoitteena on pyrkiä vastaamaan, hyödynnetäänkö värikvantisointia nykyään, ja millaisilla sovellusalueilla sille on löydetty uusia käyttökohteita. Tarkastelen myös sovelluksissa käytettyjä värikvantisointimenetelmiä lyhyesti. Tutkielma on kirjallisuuskatsaus värikvantisoinnin sovelluksiin, ja aineisto koostuu pääosin tuoreista sovelluksista käsittelevistä artikkeleista. Aihetta taustoittaessani hyödynnän myös vanhempia artikkeleita sekä kuvanprosessointia käsitteleviä kirjoja.

Värikvantisointimenetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan sen pohjalta, hyödynnetäänkö värikvantisoitavan kuvan sisältöä värikvantisoinnin yhteydessä. Yhdenmukaiset menetelmät eivät tarkastele kuvan sisältämiä värejä, kun taas mukautuille menetelmille on tyypillistä esimerkiksi kuvan värihistogrammin hyödyntäminen. Koska yhdenmukaisten menetelmien tuottamat kuvat ovat tyypillisesti laadultaan heikkoja, tutkimus on keskittynyt lähes yksinomaan mukautuviin menetelmiin. Mukautuvat menetelmät voidaan edelleen jakaa kahtia lohkomisalgoritmeihin sekä klusterointipohjaisiin algoritmeihin. Lohkomisalgoritmit suoriutuvat värikvantisoinnista usein nopeammin, mutta klusterointipohjaisilla algoritmeilla saavutetaan laadukkaampi lopputulos. Lohkomisalgoritmit sisältävät muun muassa värikvantisointimenetelmien klassikon, median cut -algoritmin, kun taas klusterointipohjaisista algoritmeista esimerkiksi k-means-algoritmi on herättänyt tutkijoiden kiinnostusta.

Värikvantisoinnin nykyisistä sovellusalueista nousevat esiin etenkin lääketieteellinen kuvantaminen sekä kuvahaun sovellusalue. Kaikki löydetyt sovellukset eivät kuitenkaan kuulu kumpaankaan näistä, joten muut sovellukset muodostavat myös oman joukkonsa. Värikvantisoinnin nykyinen rooli koostuu sovelluksen laskennallisten vaatimusten vähentämisestä, ja yleisesti värikvantisoinnilla saavutetaan siltä odotetut hyödyt. Värikvantisointia toteutetaan sovelluksissa hyvin erilaisilla menetelmillä jopa yksittäisen sovellusalueen sisällä, joten keskeisimmän menetelmän määrittely on haastavaa. Mukautuvat menetelmät osoittautuvat kuitenkin selkeästi yhdenmukaisia menetelmiä käytetyimmäksi.

Avainsanat: värikvantisointi, median cut, k-means, sovellukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Värikvantisointi	2
2.1	Yhdenmukainen ja mukautuva värikvantisointi	3
2.2	Värikvantisointiprosessin vaiheet	4
3	Mukautuvat värikvantisointimenetelmät	5
3.1	Median cut -algoritmi	5
3.2	K-means-algoritmi	7
4	Värikvantisoinnin sovelluksia	9
4.1	Lääketieteelliset sovellukset	10
4.2	Kuvahaun sovellukset	11
4.3	Muita sovelluksia	12
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	12
	Lähdeluettelo	14

1 Johdanto

Värikvantisointi on prosessi, jossa valitaan joukko värejä edustamaan kaikkia kuvan väripalettiin kuuluvia värejä niin, että värikvantisoitu kuva näyttää alkuperäisen kuvan kanssa mahdollisimman samanlaiselta (Wu, 1992). Värikvantisointia koskevaa tutkimusta on tehty ainakin 1980-luvulta saakka (Heckbert, 1982). Vielä 1990-luvullakin täysvärikuvia esittämään kykenevät kuvapuskurit eivät olleet kaikkien käyttäjien saatavilla, joten värikvantisoinnin avulla pystyttiin esittämään täysvärikuvat sellaisissakin laitteissa, jotka eivät muuten pystyisi siihen (Wu, 1992). Nykyään tällaiset laitteiston rajoitukset eivät ole enää ajankohtaisia, mutta värikvantisoinnille on kuitenkin löydetty useita uusia sovelluskohteita (Celebi, 2011).

Värikvantisoinnin tarjoamiin hyötyihin kuuluu muun muassa se, että värikvantisoinnin avulla kuvan tiedostokokoa on mahdollista pienentää jopa kolmasosaan kuvan alkuperäisestä tiedostokoosta. Tällöin voidaan vähentää kuvan tallentamiseen vaaditun muistin lisäksi kuvan siirtämiseen vaadittua aikaa. Monet verkkoa hyödyntävät multimediasovellukset voivatkin hyötyä värikvantisoinnista tänä päivänä. (Sirisathikul et al., 2004)

Tavoitteena tutkielmassa on tarkastella, kuinka paljon värikvantisointia hyödynnetään nykyään eri sovellusalueilla, kun teknologian kehityksen ansiosta alkuperäiset sovellukset eivät ole enää tarpeen. Tutkielmassa pyrin myös vastaamaan, millaisia uusia käyttökohteita värikvantisoinnille on löydetty. Tyypillisesti värikvantisointia hyödynnetään sovelluksissa erityisesti kuvien esiprosessointivaiheessa (Celebi, 2011). Tämän jälkeen värikvantisoituja kuvia apuna käyttäen suoritetaan sovelluksen varsinainen tehtävä, esimerkiksi kasvojen tai muun kohteen tunnistus kuvista (esim. Hyun et al., 2015).

Tutkielmani on kirjallisuuskatsaus värikvantisointiin ja sen käyttöön erilaisilla sovellusalueilla. Lähteiksi valikoin erilaisia teoksia aina 1980-luvulta tähän päivään, sillä aiheen tutkimiseksi oli tärkeää tarkastella värikvantisointia koskevaa tutkimusta pidemmältä ajanjaksolta. Vanhimmat artikkelit ovat tarpeen lähinnä aihetta taustoitettaessa sekä klassisia menetelmiä kuvailtaessa. Lähteiden painopiste on kuitenkin nykyhetkessä, ja pyrin tarkastelemaan värikvantisointia ensisijaisesti nykytiedon valossa. Kaikista tuoreimmat artikkelit valitsin mahdollisimman erilaisista sovellusalueista, jotta värikvantisoinnin nykyisestä käytöstä saataisiin kattava käsitys.

Värikvantisointimenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan, mutta erilaisia menetelmiä on kehitetty lukuisia (Sirisathikul et al., 2004). Värikvantisointialgoritmeista on myös kehitetty vuosien varrella entistä tehokkaampia muunnelmia (esim. Celebi, 2011). Tutkielmani ei keskity yksittäisten menetelmien syvälliseen analysointiin tai vertailuun, vaan se pyrkii muodostamaan selkeän

kokonaiskuvan väriquantisoinnin nykyisistä käyttökohteista. Tarkastelen tekstissäni yksittäisistä väriquantisointialgoritmeista ainoastaan median cut -algoritmia sekä k-means-algoritmia lyhyesti, sillä ne edustavat kahta erilaista lähestymistapaa, joilla väriquantisointia on mahdollista toteuttaa. Neuroverkkoihin pohjautuvia menetelmiä en tarkastele lainkaan tämän tutkielman puitteissa aihealueen laajuuden vuoksi.

Luvussa 2 pyrin kuvaamaan väriquantisointiprosessin yleisiä tavoitteita ja vaiheita sekä väriquantisointimenetelmiin liittyvää kahtiajakoa. Tämän jälkeen tarkastelen luvussa 3 mukautuvia väriquantisointimenetelmiä tarkemmin näiden käytön ollessa yhdenmukaista väriquantisointia tavanomaisempaa. Luvussa 4 analysoin väriquantisoinnin sovelluksia käsitteleviä tutkimuksia, jotka sijoittuvat etenkin lääketieteellisen kuvantamisen ja sisältöpohjaisen kuvatiedonhaun sovellusalueille. Lopuksi esittelen tuloksiin pohjaten tutkielmani johtopäätöksiä luvussa 5.

2 Väriquantisointi

Sirisathitkul ja muut (2004) määrittelevät *väriquantisoinnin* (color quantization) tavoitteeksi esittää *täysvärikuvia* (true color image) käyttäen vain pientä joukkoa värejä. Täysvärikuvat käyttävät tyypillisesti 24 bittiä yhden pikselin värin esittämiseen, jolloin värin punaiselle, siniselle sekä vihreälle komponentille jokaiselle on käytössä yksi tavu. Tällöin kuvan jokaisella pikselillä on 2^{24} erilaista väri vaihtoehtoa, joka vastaa likimäärin 16.8 miljoonaa väriä. Useimmissa sovelluksissa täysvärikuvat väriquantisoidaan käyttämään värin esittämiseen korkeintaan kahdeksan bittiä pikseliä kohden, jolloin väriquantisoinnin jälkeen värejä on maksimissaan 256 (Celebi, 2011).

Burger ja Burge (2009) puolestaan esittävät väriquantisoinnin tavoitteen matemaattisesti määriteltynä. Alkuperäinen kuva sisältää värejä joukon

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\},$$

jossa m on korkeintaan 2^{24} . Väriquantisoinnissa pyritään korvaamaan alkuperäisten värien joukko C pienemmällä värien joukolla

$$C' = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_n\},$$

jolle pätee $n < m$. Ongelmaksi nousee kuitenkin se, kuinka valita joukon C' värit niin, että alkuperäisen kuvan laatu kärsii väriquantisoinnista mahdollisimman vähän. Luonnollisen kuvan täsmällistä esittämistä rajatulla väripaletilla on luonnehdittu vaikeaksi ongelmaksi, sillä tyypillisesti alkuperäiset kuvat sisältävät suuren määrän värejä (Celebi, 2011).

Alkuperäisen ja väriquantisoidun kuvan välistä eroavuutta kuvataan usein *kvantisointivirheen* (quantization error) käsitteellä (Velho et al., 2009). Tavallisesti kvantisointivirhettä tarkasteltaessa käytetään kuvien eroavuuden laskemiseen

keskineliövirhettä (mean squared error, MSE) (Sirisathitkul et al., 2004). Hsieh ja Fan (2000) määrittelevät keskineliövirheen

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(R_i - R'_i)^2 + (G_i - G'_i)^2 + (B_i - B'_i)^2],$$

jossa N kuvaa pikseleiden kokonaismäärää kuvassa, R_i , G_i ja B_i kuvaavat i :nksen pikselin värikomponenttien arvoja ja R'_i , G'_i sekä B'_i kuvaavat saman pikselin värikomponenttien arvoja värikvantisoidussa kuvassa. Esimerkiksi värikvantisointimenetelmiä tutkittaessa on mahdollista käyttää yhtenä vertailukriteerinä algoritmien tuottamaa kvantisointivirheen määrää muun muassa algoritmin vaatiman suoritusajan lisäksi.

2.1 Yhdenmukainen ja mukautuva värikvantisointi

Värikvantisointimenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan sen mukaan, toteutetaanko värikvantisointi alkuperäisen kuvan värijakaumaa hyödyntäen vai ei. *Yhdenmukaisessa kvantisoinnissa* (uniform quantization) väriavaruus jaetaan keskenään yhtä suuriin osiin kuvan värijakaumaa tarkastelematta. Esimerkiksi väriavaruuden ollessa RGB-kuutio, jaetaan tämä RGB-kuutio useisiin pienempiin, mutta keskenään samansuuruisiin, kuutioihin, joiden lukumäärä riippuu siitä, montaako väriä värikvantisoidun kuvan esittämiseen halutaan käyttää. Laskemalla lopuksi jokaisen pienen kuution keskipiste saadaan tulokseksi värikvantisoidun kuvan väripaletti. (Velho et al., 2009)

Yhdenmukainen kvantisointi sopii kuitenkin vain kuville, joista tiedetään niiden värien olevan tasaisesti jakautunut väriavaruudessa (Burger & Burge, 2009). Tyypillisesti yhdenmukaisen värikvantisoinnin tuottamat kuvat ovat laadultaan heikkoja, vaikka laskennallisesti menetelmät ovatkin nopeita. Tästä syystä värikvantisointia koskeva kirjallisuus on keskittynyt lähes yksinomaan kuvan sisältöä huomioiviin menetelmiin, jotka tarjoavat paremman tasapainon kuvan laadun ja laskennallisen tehokkuuden välillä. (Celebi, 2011)

Mukautuva kvantisointi (adaptive quantization) puolestaan tutkii kuvan värijakaumaa ennen varsinaista kuvan värikvantisointia. Yleisesti kuvan värien todennäköisyysjakauman tutkiminen on vaikeaa, mutta jakaumasta on mahdollista saada arvio *värihistogrammin* (color histogram) avulla. Värihistogrammi kuvaa jokaisen alkuperäisessä kuvassa esiintyvän värin esiintymistiheyttä eli sitä, moniko kuvan pikseleistä on väriltään samoja. Värikuvia tutkittaessa värihistogrammi voidaan piirtää jokaiselle värikomponentille, esimerkiksi punaiselle, vihreälle ja siniselle, erikseen. Toisena vaihtoehtona on käyttää kolmiulotteista histogrammia värijakauman arvioimiseksi. (Velho et al., 2009)

Edellä mainituista kahdesta eri kategoriasta käytetään kirjallisuudessa myös käsitettä *skalaarikvantisointi* (yhdenmukaisesta kvantisoinnista puhuttaessa) ja

vektorikvantisointi (mukautuvasta kvantisoinnista puhuttaessa) (esim. Burger & Burge, 2009). Näiden käsitteiden voidaan ajatella painottavan enemmän lähestymistapojen välistä matemaattista eroavuutta, sillä mukautuvassa värikvantisoinnissa värejä käsitellään käytännössä kolmesta komponentista koostuvina vektoreina. Käytän kuitenkin tutkielmassani jatkossa yhdenmukaisen ja mukautuvan kvantisoinnin käsitteitä, sillä ne kuvaavat käsitteinä paremmin sitä, otetaanko värikvantisoinnissa huomioon kuvan sisältö.

2.2 Värikvantisointiprosessin vaiheet

Kuvan värikvantisointiprosessi voidaan jakaa kahteen erilliseen vaiheeseen, *väripaletin suunnitteluun* (palette design) ja *pikseleiden kuvaamiseen* (pixel mapping) (Celebi, 2011). Väripaletin suunnittelussa valitaan $n:n$ kokoinen värien joukko

$$C' = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_n\}$$

edustamaan alkuperäisen kuvan väripalettia. Usein värikvantisoidun kuvan esittämiseen käytettyjen värien määrä n on ennalta määritetty. (Burger & Burge, 2009)

Kun uusi, alkuperäistä pienempi väripaletti on suunniteltu, siirrytään värikvantisoinnin toiseen vaiheeseen, jossa jokaiselle alkuperäisen kuvan pikselille määritetään jokin uuden väripaletin väreistä (Celebi, 2011). Toisin sanoen jokainen alkuperäisen kuvan väri $C_i \in C$ korvataan jollakin uuteen väripalettiin kuuluvalla värillä $C'_j \in C'$ (Burger & Burge, 2009). Värikvantisoinnin ensimmäistä vaihetta, väripaletin suunnittelua, on luonnehdittu prosessin haastavimmaksi tehtäväksi, kun taas pikseleiden kuvaamisen voidaan ajatella olevan suoraviivaista (Heckbert, 1982).

Edellä kuvatuista vaiheista poiketen osa tutkijoista on kuvaillut värikvantisoinnin koostuvan kahden sijaan neljästä eri vaiheesta (Heckbert, 1982; Sirisathitkul et al., 2004). Tässä tapauksessa värikvantisoinnin vaihteita katsotaan olevan

1. näytteenotto alkuperäisestä kuvasta,
2. väripaletin suunnittelu,
3. pikseleiden kuvaaminen ja
4. kuvan kvantisointi

(Sirisathitkul et al., 2004). Nelivaiheisen prosessin kuvauksen voidaan huomata pitävän sisällään molemmat kaksivaiheisen kuvauksen vaiheista. Suurimpana erona näiden kahden värikvantisointiprosessin kuvauksen välillä lienee kuitenkin se, että nelivaiheisen kuvauksen ensimmäisessä vaiheessa alkuperäisestä kuvasta tutkitaan sen sisältämiä värejä värihistogrammin rakentamista varten. Nämä neljä vaihetta kuvaavat siis ainoastaan mukautuvia kvantisointimenetelmiä, eivät värikvantisointiprosessia yleisesti. Toisaalta tämä kertoo myös mukautuvien menetelmien merkittävämmästä roolista suhteessa yhdenmukaisiin menetelmiin.

3 Mukautuvat väriquantisointimenetelmät

Kuten luvussa 2.2 jo todettiin, uuden väripaletin suunnittelua voidaan pitää väriquantisoinnin haastavimpana tehtävänä. Täten useimmat mukautuvat väriquantisointimenetelmät pyrkivät ensisijaisesti tarjoamaan ratkaisua uuden väripaletin suunnitteluun sivuuttaen väriquantisointiprosessin muut vaiheet (Sirisathikul et al., 2004). Tarkastelen siis tässä luvussa erityisesti sitä, millaisia ratkaisuja mukautuvat menetelmät tarjoavat uuden väripaletin suunnitteluun.

Mukautuvat väriquantisointimenetelmät voidaan jaotella kuuluvaksi joko *lohkomisalgoritmeihin* (splitting algorithms) tai *klusterointipohjaisiin algoritmeihin* (clustering-based algorithms). Lohkomisalgoritmien toiminta perustuu nimensä mukaisesti kuvan väriavaruuden kahtia jakamiseen jonkin ennalta määritellyn kriteerin pohjalta. Kahtiajakoa toteutetaan iteratiivisesti, kunnes saavutetaan haluttu lukumäärä alkuperäisen väriavaruuden osajoukkoja. Klusterointipohjaiset algoritmit puolestaan jakavat väriavaruuden suoraan haluttuun määrään väriklustereita ja määrittävät jokaiselle klusterille sitä edustavan värin. Klusterointipohjaiset algoritmit jatkavat kuitenkin klustereiden ja niiden edustajien muokkaamista, kunnes klusteria edustava väri vastaa klusterin kaikkia värejä riittävästi. (Sirisathikul et al., 2004)

Useimmiten lohkomisalgoritmit ovat suoritusajaltaan klusterointipohjaisia algoritmeja nopeampia, mutta lohkomisalgoritmilla väriquantisoidun kuvan laatu jää heikommaksi klusterointipohjaiseen algoritmiin verrattuna. Klusterointipohjaisella algoritmilla väriquantisoidun kuvan laatuun vaikuttavat lisäksi algoritmille määritellyn alkutilan ominaisuudet eli se, millä tavoin väriavaruus alussa jaetaan klustereihin. (Sirisathikul et al., 2004)

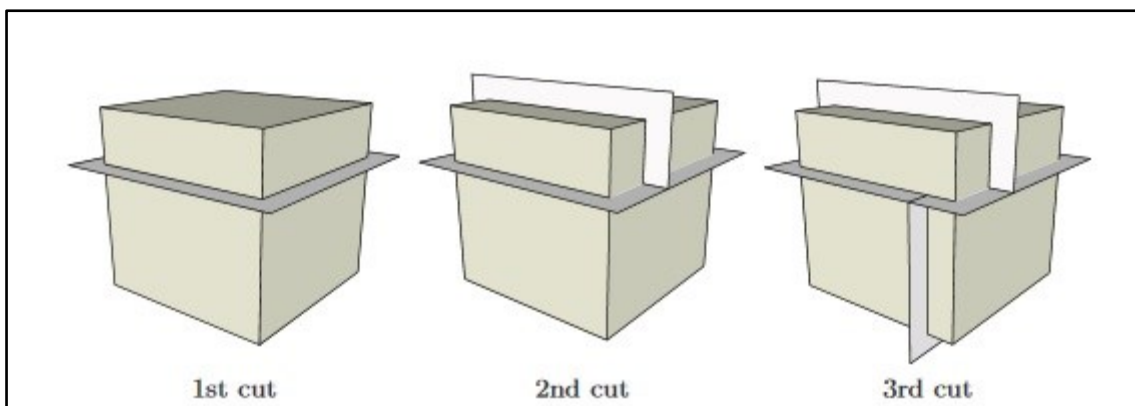
Myöskään mukautuvien menetelmien kahtiajaosta käytettävistä käsitteistä ei ole päästy yksimielisyyteen tutkijoiden kesken. Osa tutkijoista käyttää edellä mainituista lohkomisalgoritmeista käsitettä esiklusterointimenetelmät (preclustering methods) ja klusterointipohjaisista algoritmeista jälki-klusterointimenetelmät (postclustering methods) (Celebi, 2011). Tässä työssä käytän kuitenkin lohkomisalgoritmien ja klusterointipohjaisten algoritmien käsitteitä niiden kuvaavuutensa vuoksi. Seuraavissa alaluvuissa tarkastelen lyhyesti yhtä lohkomisalgoritmien edustajaa sekä yhtä klusterointipohjaisten algoritmien edustajaa hieman tarkemmin.

3.1 Median cut -algoritmi

Median cut -algoritmi (median cut algorithm, MCA) esiteltiin alun perin osana Heckbertin (1982) kirjoittamaa väriquantisoinnin klassikkoteosta. Vaikka uusia menetelmiä on kehitetty lukuisia kyseisen artikkelin kirjoittamisen jälkeen, median cut -algoritmi on onnistunut vakiinnuttamaan asemansa väriquantisointimenetelmien joukossa (Burger & Burge, 2009; Wu, 1992). Syitä algoritmin merkittävälle asemalle ovat muun muassa algoritmin toteuttamisen helppous, laskennallinen tehokkuus sekä

väriquantisoitujen kuvien laatu esitettäessä täysvärikuvia käyttäen kahdeksaa bittiä pikseliä kohden (Velho et al., 2009).

Heckbertin (1982) mukaan algoritmin alussa muodostetaan kuvan väriavaruuden ympärille laatikko, joka sisältää kaikki alkuperäisen kuvan värit ollen kuitenkin tilavuudeltaan mahdollisimman pieni. Tämän jälkeen tavoitteena on rekursiivisesti pilkkoa laatikkoa pienempiin laatikoihin, kunnes n kappaletta pieniä laatikoita on saavutettu. Jokainen pieni laatikko edustaa lopulta yksittäistä väriä väriquantisoidussa kuvassa, joten laatikoiden määrä n riippuu siitä, kuinka monesta väristä uuden väripaletin halutaan koostuvan. Kuvassa 1 havainnollistetaan median cut -algoritmin toimintaa.



Kuva 1. Median cut -algoritmin toimintaperiaate (Burger & Burge, 2009).

Aluksi siis muodostetaan pienin mahdollinen suorakulmainen laatikko

$$V = \{[r_0, r_1] \times [g_0, g_1] \times [b_0, b_1]\},$$

joka sisältää kaikki alkuperäisen kuvan värit. Seuraavaksi lasketaan, millä kolmen värikomponentin akselilla laatikon pituus on suurin. Alkuperäisen kuvan värit järjestetään pisintä akselia vastaavan värikomponentin mukaiseen järjestykseen ja järjestystä käyttäen lasketaan värien mediaani. Laatikko halkaistaan mediaanin kohdalta kahteen pienempään laatikkoon, jolloin molemmat pienemmistä laatikoista sisältävät puolet alkuperäisen kuvan väreistä. Esimerkiksi pisimmän akselin ollessa vihreä värikomponentti, halkaisun tuloksena saadut laatikot ovat

$$V_1 = \{(r, g, b) \in C : g \leq m_g\}$$

ja

$$V_2 = \{(r, g, b) \in C : g \geq m_g\},$$

kun C on alkuperäisen kuvan väriavaruus ja m_g vihreän värikomponentin mukaan järjestetyn väriavaruuden mediaani. Seuraavaksi laatikoille V_1 ja V_2 suoritetaan vastaava kahtiajako, alkaen laatikon pisimmän akselin selvittämisestä. Kun rekursiivisella halkaisulla on tuotettu väriquantisointiin tarvittu n laatikkoa, lasketaan jokaiselle laatikolle sen sisältämien värien keskiarvo. Nämä laatikoiden keskiarvot muodostavat siis

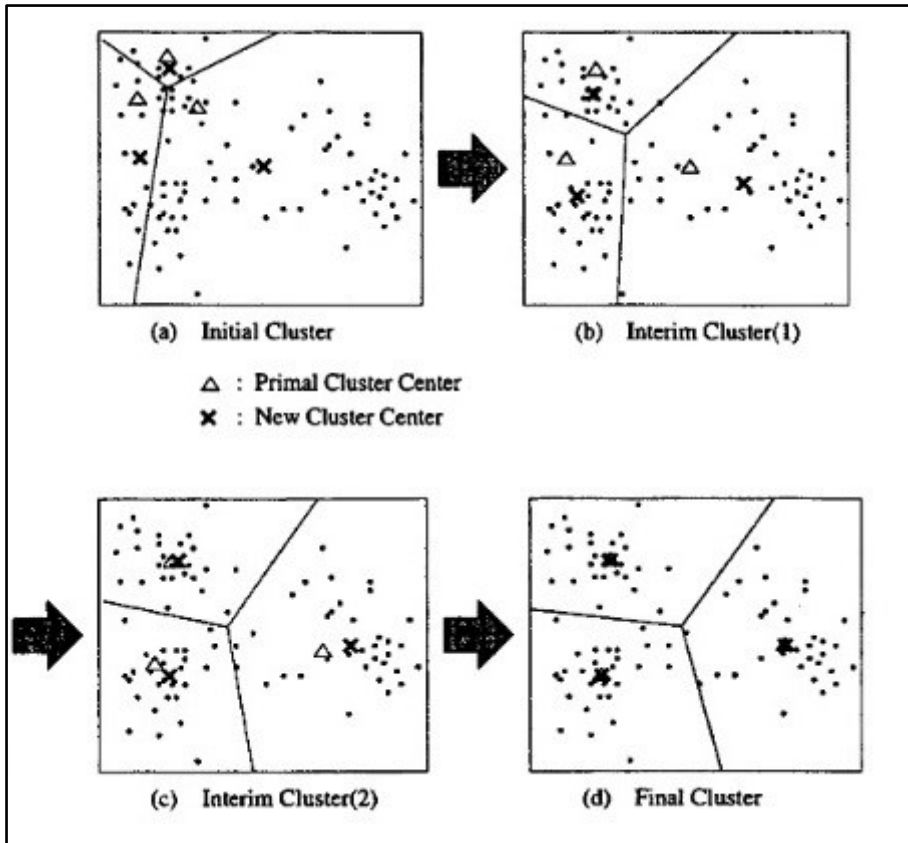
väriquantisoidun kuvan esittämiseen käytettävän väripaletin $C' = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_n\}$. (Velho et al., 2009)

Median cut -algoritmia on mahdollista muunnella esimerkiksi sen suhteen, millä perusteella värien järjestämiseen käytetty värikomponentti valitaan. Heckbert (1982) ehdottaa, että suurimman vaihteluvälin sijaan järjestämiseen voidaan käyttää myös värikomponenttia, jolla on suurin varianssi. Myös laatikon halkaisukohdan määrittelyyn hän toteaa vaihtoehtoisena tapana mediaanille sen, että pienempien laatikoiden varianssien summa pyritään minimoimaan. Näin väriquantisoinnista aiheutuva keskineliövirhe saadaan minimoitua paremmin kuin mediaania käyttämällä.

3.2 K-means-algoritmi

Celebin (2011) mukaan *k-means-algoritmi* (k-means algorithm) on hyödynnetty erilaisissa klusterointiin liittyvissä ongelmissa laajasti, mutta väriquantisoinnin yhteydessä algoritmi ei ole herättänyt yleisesti tutkijoiden kiinnostusta. Syitä tälle ovat algoritmin laskennalliset vaatimukset sekä erilaisten algoritmin alustustapojen suuri vaikutus algoritmin tuottamaan lopputulokseen. Osa tutkijoista on kuitenkin kehittänyt erilaisia muunnelmia algoritmista tarkoituksenaan osoittaa k-means-algoritmin käytön olevan perusteltua myös väriquantisoinnin yhteydessä (Celebi, 2011; Kasuga et al., 2000).

Aluksi k-means-algoritmissa valitaan k kappaletta alustavia klustereiden keskiöitä, joista jokainen edustaa yhtä väriä väriquantisoidun kuvan väripaletissa. Tämän jälkeen jokainen alkuperäisen kuvan väri määritellään kuuluvaksi sitä lähinnä olevaan klusteriin. Kun klusterit on muodostettu, voidaan laskea niihin kuuluvien alkoiden keskiarvo, määrittää keskiarvo uudeksi klusterin keskiöksi ja päivittää klustereihin kuuluvat alkot uuden keskiön avulla. Edellä kuvattuja vaiheita toistetaan, kunnes klustereiden keskiöt eivät enää muutu, jolloin uusi väripaletti on valmis. Kuva 2 havainnollistaa tätä k-means-algoritmin toimintaperiaatetta. (Kasuga et al., 2000)



Kuva 2. K-means-algoritmin toimintaperiaate (Kasuga et al., 2000).

Kuten jo aiemmin todettiin, k-means-algoritmin tuottaman lopputuloksen kannalta on merkityksellistä, millaisia alkuarvoja eli alustavia klustereiden keskiöitä käytetään. On huomionarvoista, että alustavassa klustereiden keskiöiden määrittelyssä voidaan hyödyntää median cut -algoritmia. Kasuga ja muut (2000) ovatkin käyttäneet omissa tutkimuksissaan k-means-algoritmin alustamiseen median cut -algoritmin muunnelmaa, jolloin alustavia klustereiden keskiöitä ei tarvitse valita esimerkiksi satunnaisesti. Myös Celebi (2011) havaitsi omissa tutkimuksissaan lohkomisalgoritmien olevan tehokas ja väriquantisoidun kuvan laatua parantava alustustapa k-means-algoritmille yleisiin alustustapoihin verrattuna. Hän toteaa tuloksen olleen odotettavissa, sillä lohkomisalgoritmit on kehitetty nimenomaan värikuvadatan ominaisuuksia huomioiden, toisin kuin yleiset alustusmenetelmät.

4 Värikvantisoinnin sovelluksia

Värikvantisoinnin sovelluksia käsitteleviä artikkeleita olen valikoinut tutkielmaani yhteensä kahdeksan kappaletta. Artikkelit jakautuvat selkeästi lääketieteellisiin sovelluksiin, kuvahaun sovelluksiin sekä muihin sekalaisiin sovellusalueisiin. Seuraavaksi analysoin artikkeleista esille nousseita yhteisiä seikkoja värikvantisointiin liittyen, sekä toisaalta eroavuuksia artikkeleiden välillä. Taulukossa 1 esittelen tarkemmin tutkimusten eroavuuksia erityisesti käytettyjen värikvantisointimenetelmien osalta sovellusalueittain. Värikvantisointimenetelmät luokitellaan taulukossa yhteen kategorioista median cut -algoritmi, k-means-algoritmi ja muu menetelmä. Tämän jälkeen tarkastelen vielä lyhyesti jokaista yksittäistä artikkelia sovellusalue kerrallaan.

Tarkastelun kohteena oleville tutkimuksille on tyypillistä, että värikvantisointia hyödynnetään kuvien esiprosessointivaiheessa ennen kohteentunnistusta, kuvahakua tai muuta varsinaista sovelluksen tehtävää. Useimmiten syy värikvantisoinnin käytön taustalla on sovelluksen tehokkuuden parantaminen. Yhteinen näkemys värikvantisoinnin käytöstä näyttäisi olevan se, että värikvantisoinnilla pystytään saavuttamaan tutkimuksessa siltä odotetut hyödyt. Yksikään tutkimus ei päätynyt tuloksissaan sellaiseen johtopäätökseen, että värikvantisointia ei tulisi hyödyntää kyseisen sovelluksen kohdalla lainkaan. Artikkeleiden pohjalta lääketieteellisissä sovelluksissa kuva voidaan värikvantisoida käyttämään pienempää värimäärää kuin muilla sovellusalueilla.

Tutkimuksista ei kuitenkaan löytynyt yhteistä näkemystä yksittäisen värikvantisointimenetelmän paremmuudesta muihin verrattuna. Käytetyt menetelmät vaihtelivat laajasti sekä sovellusalueittain että yksittäisen sovellusalueen sisällä. Edes mukautuvien värikvantisointimenetelmien ei voida todeta artikkeleiden pohjalta olevan yhdenmukaisia menetelmiä parempia kaikissa tilanteissa, sillä mobiililaitteille kehitetyt sovellukset saattavat hyötyä yhdenmukaisen värikvantisoinnin yksinkertaisuudesta ja nopeudesta. Vaihtelua esiintyy myös siinä, kuinka montaa väriä värikvantisoidun kuvan esittämiseen käytetään, joten ei voida ajatella tietyn värimäärän olevan sopiva kaikille sovelluksille.

Artikkelin viite	Sovellusalue	Värikvantisointimenetelmä
Celebi et al., 2013	lääketiede	k-means
Dharmaraj et al., 2008	lääketiede	median cut
Huyn et al., 2015	lääketiede	muu
Artemi & Liu, 2020	kuvahaku	muu
Dong et al., 2017	kuvahaku	k-means
Jeong et al., 2004	kuvahaku	muu
Kaya et al., 2015	muu	muu
Xu et al., 2018	muu	muu

Taulukko 1. Värikvantisoinnin sovellusten sovellusalueet sekä käytetyt menetelmät.

4.1 Lääketieteelliset sovellukset

Huyn ja muut (2015) ovat löytäneet värikvantisoinnille käyttöä lääketieteellisen kuvantamisen parista. Tutkimuksen kohteena on sappirakon automaattinen tunnistaminen ultraäänikuvista. Värikvantisointi toteutetaan sovelluksessa neuroverkkojen avulla ja tutkijat perustelevat valintaansa neuroverkkojen tarjoamalla mahdollisuudella minimoida värikvantisoinnin aiheuttamaa vääristymää kuvassa. Värikvantisoituja kuvia käytetään tutkimuksessa apuna luokiteltaessa ultraäänikuvien sisältämiä värejä. Tämän jälkeen kuvista on mahdollista päätellä sappirakon ja sen seinämän sijainti, kun tiedetään sappirakon näkyvän ultraäänikuvissa tummana ja sen seinämän puolestaan kirkkaana. Värikvantisoidut kuvat esitetään kyseisessä tutkimuksessa käyttäen ainoastaan neljää eri väriä. Tulokset osoittavat menetelmän onnistuvan paikantamaan sappirakon ultraäänikuvista riittävällä tarkkuudella ja olevan mahdollisesti käyttökelpoinen tutkimusolosuhteiden ulkopuolellakin.

Myös Dharmaraj ja muut (2008) ovat tutkineet värikvantisoinnin mahdollisuuksia lääketieteen sovellusalueella. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää kohteentunnistusjärjestelmä, joka kykenee tunnistamaan magneettikuvista kiinnostuksen kohteena olevan alueen, esimerkiksi kasvaimen tai yksittäisen elimen. Järjestelmän toimivuutta testataan erilaisilla hiiristä otetuilla magneettikuvilla. Tutkijat toteavat järjestelmän toiminnan kannalta oleelliseksi sen, että värikvantisoinnilla vähennetään kuvan esittämiseen käytettyjen värien määrä kahdeksaan väriin. Värikvantisoinnin käytön syyksi määritellään järjestelmän laskennallisten vaatimusten pienentäminen ja tulokset osoittavat, että tämä myös saavutettiin. Kyseisessä tutkimuksessa värikvantisointi toteutetaan median cut -algoritmillä, ja tutkijat näkevät tämän olevan tyypillistä lääketieteen alalla algoritmin nopeudesta ja yksinkertaisuudesta johtuen.

Toisaalta Celebi ja muut (2013) ovat osoittaneet myös k-means-algoritmin muunnelmien käyttökelpoisuuden lääketieteellisessä kuvantamisessa. Heidän tutkimuksensa keskiössä ovat ihosta otetut mikroskooppikuvat, joiden avulla voidaan

tutkia erilaisia ihovaurioita. Tutkimus osoittaa ehdotetun k-means-algoritmin muunnelman suoriutuvan värikvantisoinnista pienimmällä kvantisointivirheellä. Algoritmin nopeus ei kuitenkaan yllä lohkomisalgoritmien tasolle, mikä on kaikille klusterointipohjaisille algoritmeille tyypillistä. Tutkijat kuitenkin huomauttavat klusterointipohjaistenkin algoritmien suoritusajan olevan vain muutamia millisekunteja, joten useimmiten näiden käytölle ei ole estettä. Tutkijat näkevät menetelmänsä potentiaalisesti hyödylliseksi erilaisten ihovaurioiden, kuten melanooman, diagnosoinnin yhteydessä.

4.2 Kuvahaun sovellukset

Sisältöpohjainen kuvatiedonhaku (content-based image retrieval, CBIR) nousee esille yhtenä värikvantisoinnin sovellusalueena. Artemi ja Liu (2020) tarkastelevat tutkimuksessaan värikvantisoinnin mahdollisuuksia kuvien optimoinnissa ennen varsinaisen kuvatiedonhaun suorittamista. Kuvien värimäärää vähentämällä pyritään minimoimaan haun vaatima suoritus aika kuitenkin säilyttäen haun tarkkuus ennallaan tai jopa parantaen sitä. Tutkimuksessa värikvantisointi toteutetaan paranneltua harmaasävykvantisointia käyttäen (improved gray-scale quantization) ja kuvan esittämiseen käytettyjen värien määrää vaihdellaan, jotta värimäärän vaikutusta kuvahaun tuottamaan tulokseen on mahdollista vertailla. Tulokset osoittautuvat tutkijoiden mukaan lupaaviksi, ja sisältöpohjaisen kuvatiedonhakujärjestelmän tekemän haun tarkkuus säilyy, vaikka värien määrää vähennetään värikvantisoinnilla huomattavasti.

Myös Dong ja muut (2017) ovat tutkineet värikvantisointia sisältöpohjaisen kuvatiedon yhteydessä. Kuvahaku toteutetaan kuvan sisältämien värien pohjalta, mutta ennen tätä kuva värikvantisoidaan sisältämään 256 väriä. Kuvan väriavaruus jaetaan ensin kahtia värilliseen ja mustavalkoiseen osuuteen, jonka jälkeen värikvantisoinnilla määritellään 8 väriä edustamaan kuvan harmaita sävyjä ja 248 väriä muita erillisiä värejä. Värikvantisointimenetelmänä tutkimuksessa toimii k-means-algoritmi, jota sovelletaan erikseen väriavaruuden värilliseen ja mustavalkoiseen osuuteen. Tulokset osoittavat kehitetyn menetelmän tehokkuuden, ja tutkijat näkevätkin menetelmän hyödyllisenä myös verkkoyhteyttä käyttävissä laaja-alaisemmissa kuvahaun sovelluksissa.

Lisäksi Jeong ja muut (2004) ovat hyödyntäneet värikvantisointia osana kuvahakua. Tutkimuksessa kuvahaku toteutetaan värihistogrammia käyttäen, sillä sen avulla kuvan ominaisuuksien esittäminen on yksinkertaista. Kuvaan sovelletaan värikvantisointia ennen värihistogrammin muodostamista, sillä vain 128 väriin perustuvalla värihistogrammilla voidaan kuvata ominaispiirteitä kuvahaun kannalta riittävällä tarkkuudella. Värikvantisoinnin toteuttamiseksi tutkimuksessa käytetään Gaussin sekoitemalliin pohjautuvaa vektorikvantisointia (Gauss mixture vector quantization), joka voidaan katsoa kuuluvaksi mukautuviin menetelmiin. Tulokset osoittavat valitun menetelmän käyttökelpoisuuden värikvantisoinnissa sekä mukautuvien menetelmien

paremmuuden yhdenmukaisiin värikvantisointimentelmiin verrattuna. Värihistogrammin muodostamista ilman värikvantisointia ei tutkimuksessa käsitelty lainkaan, joten värikvantisoinnin voidaan ajatella olevan keskeisessä roolissa sovelluksen kannalta.

4.3 Muita sovelluksia

Muissa yhteyksissä värikvantisointia hyödynnetään muun muassa Xun ja muiden (2018) tekemässä tutkimuksessa apinoiden kasvojentunnistukseen liittyen. Kehitettyssä kasvojentunnistusmenetelmässä tarkoituksena on ensin segmentoida apinoiden kuvat niin, että segmentoitu kuva sisältää ainoastaan apinan ruumiin. Tämän jälkeen segmentoituun kuvaan sovelletaan tutkijoiden kehittämää kasvojentunnistusalgoritmia. Alueellisen värikvantisoinnin avulla tutkimuksessa lisätään värien eroavuutta taustan ja apinan turkin välillä, jolloin segmentoituihin apinoiden kuviin jää jäljelle vähemmän taustapikseleitä. Tulokset osoittavat, että kyseinen menetelmä onnistuu paikantamaan apinoiden ruumiit ja tunnistamaan näiden kasvot tehokkaasti eri kokoisista kuvista.

Tutkimusta on tehty lisäksi värikvantisoinnin käytöstä osana suosittelujärjestelmää. Kaya ja muut (2015) ovat kehittäneet sisustusesineiden suosittelujärjestelmän, joka pyrkii tarjoamaan käyttäjälle suosituksia ympäristöstä otetun valokuvan pohjalta. Eräs suosittelun perustana toimiva kriteeri on valokuvan sisältämät värit, joten käyttäjän ottama valokuva värikvantisoidaan ennen sen vertaamista tietokannan sisältämiin tuotteisiin tehokkuuden parantamiseksi. Tutkimuksessa huomionarvoiseksi seikaksi nousee se, että kehitetty suosittelujärjestelmä on suunniteltu erityisesti mobiililaitteille, jolloin sovelluksen vaatima suoritus aika ja muistin käyttö ovat keskeisessä roolissa. Tästä syystä tutkijat toteavatkin yhdenmukaisen värikvantisoinnin soveltuvan parhaiten kyseisen mobiilisovelluksen vaatimuksiin. Tulokset osoittavat suosittelujärjestelmän vastaavan käyttäjän suosituspyyntöön todella nopeasti ja järjestelmä tarjoaa relevantin suosituksen noin 90 %:n tarkkuudella.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Värikvantisoinnin tavoitteena on esittää kuva käyttäen alkuperäistä pienempää värimäärää kuitenkin säilyttäen kuvan laatu mahdollisimman korkeana. Alkuperäisen ja värikvantisoidun kuvan välistä eroavuutta mitataan kvantisointivirheellä. Prosessina värikvantisointi koostuu kahdesta erillisestä vaiheesta, uuden väripaletin suunnittelusta sekä pikseleiden kuvaamisesta uuden paletin väreiksi. Värikvantisointi voidaan toteuttaa yhdenmukaisella kvantisoinnilla kuvan sisältöä tarkastelematta tai mukautuvalla kvantisoinnilla kuvan värihistogrammia apuna käyttäen. Näistä kahdesta mukautuvien menetelmien käyttö on tyypillisempää niiden tarjotessa paremman tasapainon algoritmin nopeuden ja värikvantisoidun kuvan laadun välillä. Mukautuvat menetelmät koostuvat lohkomisalgoritmeista, kuten median cut -algoritmi, sekä klusterointipohjaisista algoritmeista, kuten k-means-algoritmi. Osa värikvantisointiin liittyvistä käsitteistä ei ole

vakiintunut, joten aihetta tutkivissa artikkeleissa esiintyy useita rinnakkaisia käsitteitä etenkin värikvantisointimenetelmien luokitteluun liittyen.

Pyrin tutkielmassani vastaamaan kysymyksiin, hyödynnetäänkö värikvantisointia osana kuvanprosessointia vielä nykyään, sekä millaisilla sovellusalueilla sille on löydetty käyttökohteita. Tutkielma saavuttaa tavoitteensa ja kykenee tarjoamaan vastauksen molempiin esitetystä kysymyksistä. Tulokset osoittavat, että värikvantisoinnin sovelluksia käsitteleviä tutkimuksia on tehty useita viime vuosina ja värikvantisoinnin voidaan todeta olevan edelleen ajankohtainen kuvanprosessointimenetelmä. Etenkin lääketieteellisen kuvantamisen ja kuvahaun sovellusalueilla värikvantisointi on nähty käyttökelpoisena, mutta myös muita sovelluksia on kehitetty. Yleisesti tutkimukset osoittavat värikvantisoinnin pystyvän tarjoamaan siltä odotetut hyödyt sovellusalueesta riippumatta. Tehdyissä tutkimuksissa värikvantisointia toteutetaan onnistuneesti hyvin erilaisilla menetelmillä, joten nykyisten sovellusten kannalta on vaikeaa todeta yhdenkään menetelmän nousevan esille muita parempana.

Kattavamman näkemyksen saavuttamiseksi tutkielmani olisi edellyttänyt suuremman aineiston tarkastelua. On mahdollista, että laajemman kirjallisuuskatsauksen avulla värikvantisoinnin nykyisiä sovellusalueita olisi löydetty lääketieteen ja kuvahaun lisäksi vielä useampia. Suurempaa aineistoa tarkasteltaessa olisi saattanut nousta esiin yksi tai useampia värikvantisointimenetelmiä, jotka ovat tietyn sovellusalueen kannalta keskeisimpiä. Rajallisen aineistokoon rinnalla myös artikkeleiden saatavuutta koskevat ongelmat johtavat siihen, että kaikkia tutkielman aiheeseen sopivia artikkeleita en voi käsitellä tutkielmassani.

Tulevaisuudessa tehtävän tutkimuksen kannalta kiinnostavia kysymyksiä saattaisi nousta esille muun muassa neuroverkkojen ja värikvantisoinnin väliseen yhteyteen liittyen. Tämän tutkielman tarkastelun ulkopuolelle jää joukko värikvantisointimenetelmiä, jotka toteutetaan neuroverkkoja hyödyntäen. Näiden menetelmien mahdollisuuksia ja haasteita olisi kiinnostavaa tarkastella verrattuna klassisiin värikvantisointimenetelmiin, kuten median cut -algoritmiin ja k-means-algoritmiin. Kuvaa värikvantisoidaessa saatetaan kuvaan lisätä samalla tarkoituksellisesti kohinaa sekoiteväriytyksen (dithering) avulla. Sekoiteväriytyksen käytön taustalla olevia syitä ja vaikutuksia värikvantisoituun kuvaan olisi myös kiinnostavaa tutkia tulevaisuudessa.

Lähdeluettelo

- Artemi, M., & Liu, H. (2020). Image Optimization using Improved Gray-Scale Quantization for Content-Based Image Retrieval. *IEEE 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, 2020-04, 1-6. 10.1109/ICOA49421.2020.9094507
- Burger, W., & Burge, M. J. (2009). *Principles of Digital Image Processing Core Algorithms* (1st ed.). Springer London. 10.1007/978-1-84800-195-4
- Celebi, M. E. (2011). Improving the performance of k-means for color quantization. *Image and Vision Computing*, 29(4), 260-271. 10.1016/j.imavis.2010.10.002
- Celebi, M. E., Wen, Q., Hwang, S., & Schaefer, G. (2013). Color Quantization of Dermoscopy Images Using the K-Means Clustering Algorithm. Springer Netherlands. 10.1007/978-94-007-5389-1_5
- Dharmaraj, C. D., Krishna, M. C., & Murugesan, R. (2008). A Feature Identification System for Electron Magnetic Resonance Tomography: Fusion of Principal Components Transform, Color Quantization and Boundary Information. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 30(3), 284-297. 10.1007/s10851-007-0056-z
- Dong, L., Dong, W., Feng, N., Mao, M., Chen, L., & Kong, G. (2017). Color space quantization-based clustering for image retrieval. *Frontiers of Computer Science in China*, 11(6), 1023-1035.
- Heckbert, P. (1982). Color image quantization for frame buffer display. *Computer Graphics (New York, N.Y.)*, 16(3), 297-307. 10.1145/965145.801294
- Hsieh, I., & Fan, K. (2000). An adaptive clustering algorithm for color quantization. *Pattern Recognition Letters*, 21(4), 337-346. 10.1016/S0167-8655(99)00165-8
- Hyun, J. P., Kwang, B. K., & Eui-Young Cha. (2015). A New Approach to Locate the Gallbladder from Ultrasound Image Using Intensity Stretching and SOM-based Color Quantization. *Current Medical Imaging Reviews (CMIR)*, 11(1), 63-68. 10.2174/157340561101150423105447

- Jeong, S., Won, C. S., & Gray, R. M. (2004). Image retrieval using color histograms generated by Gauss mixture vector quantization. *Computer Vision and Image Understanding, 94(1)*, 44-66. 10.1016/j.cviu.2003.10.015
- Kasuga, H., Yamamoto, H., & Okamoto, M. (2000). Color quantization using the fast K-means algorithm. *Systems and Computers in Japan, 31(8)*, 33-40. 10.1002/1520-684X(200007)31:83.0.CO;2-C
- Kaya, F., Yildiz, G., & Kavak, A. (2015). A mobile and web application-based recommendation system using color quantization and collaborative filtering. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23*, 900-912. 10.3906/elk-1212-145
- Sirisathitkul, Y., Auwatanamongkol, S., & Uyyanonvara, B. (2004). Color image quantization using distances between adjacent colors along the color axis with highest color variance. *Pattern Recognition Letters, 25(9)*, 1025-1043. 10.1016/j.patrec.2004.02.012
- Velho, L., Frery, A. C., & Gomes, J. (2009). *Image Processing for Computer Graphics and Vision* (2nd ed.). Springer London. 10.1007/978-1-84800-193-0
- Wu, X. (1992). Color quantization by dynamic programming and principal analysis. *ACM Transactions on Graphics (TOG), 11(4)*, 348-372. 10.1145/146443.146475
- Xu, P., Guo, S., Miao, Q., Li, B., Chen, X., & Fang, D. (2018). Face detection of golden monkeys via regional color quantization and incremental self-paced curriculum learning. *Multimedia Tools and Applications, 77(3)*, 3143-3170. 10.1007/s11042-017-4984-3