

Aalto-yliopisto  
Perustieteiden korkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma

# **Videokoodauksen rinnakkaistaminen**

**Kandidaatintyö**

**17. helmikuuta 2013**

**Miro Nurmela**

<b>Tekijä:</b>	Miro Nurmela
<b>Työn nimi:</b>	Videokoodauksen rinnakkaistaminen
<b>Päiväys:</b>	17. helmikuuta 2013
<b>Sivumäärä:</b>	25
<b>Pääaine:</b>	Ohjelmistotekniikka
<b>Koodi:</b>	T3001
<b>Vastuopettaja:</b>	Ma professori Tomi Janhunen
<b>Työn ohjaaja(t):</b>	TkT Vesa Hirvisalo (Tietotekniikan laitos)
<p>Tämä kandidaatintyö käsittelee videokoodausmenetelmien rinnakkaislaskennallisia toteutuksia. Työn tavoitteena on osoittaa, että rinnakkaislaskentaa hyödyntämällä voidaan toteuttaa perinteisiä menetelmiä tehokkaampaa videon pakkaamista ja purkamista rinnakkaisohjelmoinnin ongelmista huolimatta. Käsittely keskittyy rinnakkaislaskennasta saatavaan laskentatehon kasvuun eikä esimerkiksi rinnakkaisen laskennan oikeellisuuteen tai sen järjestämiseen. Videokoodausmenetelmiä käsitellään hyvin yleisellä tasolla menemättä yksittäisten standardien toteutuksiin tarkemmin.</p> <p>Tutkimus on kirjallisuustutkimus jonka lähteinä on ollut kokoelma artikkeleita, kirjoja ja verkkolähteitä.</p> <p>Tutkimuksen tulos on, että rinnakkaislaskenta tehostaa videokoodausprosessia. Tärkeintä tehokkaissa rinnakkaisissa videokoodausmenetelmissä on perinteisen videokoodauksen käyttämien videodatan rinnakkaisuuksien purku sekä rinnakkaislaskennan synkronoinnin määrän mahdollisimman suuri vähentäminen. Rinnakkaislaskenta sekä nopeuttaa videokoodausprosessia että parantaa sen laatua. Rinnakkaistamisen yleistäminen on kuitenkin vaikeaa erilaisten standardien ja toimivien toteutusten standardoimattomuuden johdosta.</p> <p>Tuloksista ja tutkimuksesta voidaan vetää kaksi johtopäätöstä. Ensimmäinen on se, että rinnakkaisuuden tuominen videokoodaukseen on tehokasta ja luultavimmin tulevaisuudessa välttämätöntä. Toinen on se, että tulevaisuuden videokoodausstandardeja suunniteltaessa rinnakkaislaskenta täytyy ottaa huomioon. Täytyy kehittää keino, jolla rinnakkaistaminen onnistuu helposti erilaisille kiihdytysalustoille.</p>	
<b>Avainsanat:</b>	videokoodaus, enkoodaus, dekodeaus, transkoodaus, rinnakkaisohjelmointi, rinnakkainen videokoodaus, rinnakkaislaskenta
<b>Kieli:</b>	Suomi

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Digitaalinen liikkuva kuva ja rinnakkaislaskennan perusteet</b>	<b>7</b>
2.1	Digitaalinen video ja sen koodaus . . . . .	7
2.2	Rinnakkaislaskennan perusteita . . . . .	8
2.3	Havaitseminen . . . . .	8
2.4	Rinnakkaislaskennan oikeellisuus . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Videokoodaus</b>	<b>10</b>
3.1	Videokoodauksen peruskäsitteet . . . . .	10
3.1.1	Videokuvan esittäminen ja tallentaminen . . . . .	10
3.1.2	Videodatan muut osat ja synkronointi . . . . .	11
3.1.3	Pakkaus . . . . .	12
3.2	Videodatan riippuvuudet . . . . .	12
3.3	Diskreetti kosinimuunnos . . . . .	13
3.4	Videodatan matka lähteestä näyttölaitteelle . . . . .	14
3.5	Kuvadatan laadun mittarit . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Rinnakkaislaskenta</b>	<b>17</b>
4.1	Erilaisia rinnakkaisuuksia . . . . .	17
4.2	Rinnakkaisuuden peruskäsitteitä . . . . .	18
4.2.1	Tiedon välittäminen laskentayksiköiden välillä . . . . .	18
4.2.2	Rakeisuus ja laskennan järjestäminen . . . . .	19
4.2.3	Amdahlin laki . . . . .	20
4.3	Rinnakkaisuuden haasteita . . . . .	20
4.4	Rinnakkaisten järjestelmien tehokkuuden mittaaminen . . . . .	21
4.5	RVC-CAL-standardi . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Videokoodaus ja rinnakkaislaskenta</b>	<b>24</b>
5.1	Videokoodauksen rinnakkaistamisen tarpeellisuus . . . . .	24
5.2	Videokoodauksen rinnakkaistamisen ongelmat . . . . .	24

5.3	Rinnakkaisia videokoodaustoteutuksia . . . . .	25
5.3.1	Uudet standardit . . . . .	25
5.3.2	Videodatan riippuvuuksien ja synkronoinnin tarpeen vähentäminen	27
5.3.3	Optimointi . . . . .	28
5.3.4	Rinnakkaislaskennan tuomat hyödyt suorituskykyyn . . . . .	29
5.4	Erilaiset kiihdytysalustat . . . . .	29
5.4.1	Moniydinprosessorit . . . . .	30
5.4.2	Klusterit . . . . .	30
5.4.3	Grafiikkaprosessorit . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>32</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>34</b>

# 1 Johdanto

Nykyaikainen videodata tallennetaan digitaaliseen muotoon. Videodatan käsittelyä digitaalisille tallennuslaitteille ja siirtokanaville sopivaan muotoon ja uudelleen katseltavaan muotoon kutsutaan videokoodaukseksi. Koodaaminen on tärkeää kaikenlaisen median, kuten äänen, kuvan ja videon, digitaaliselle tallentamiselle. Videodatan erikoisominaisuus on se, että se yhdistelee erilaisia medioita. Tämän seurauksena videodata vaatii suuren määrän tallennustilaa ja siirtokapasiteettia, mikä tekee videon koodaamisesta tärkeämpää. Samalla videodatan monialainen luonne lisää haasteita sen kompaktiin esittämiseen. Olemassa olevia videokoodausmenetelmiä määrittävät standardi. (Richardson 2010)

Videodatan laadun kasvu ja tiedon langattoman siirtämisen yleistymisen pakottaa kehittämään uusia, tehokkaampia videokoodausmenetelmiä. Ollaan kuitenkin tultu siihen pisteeseen, että vain tehokkaimmat yksiprosessorijärjestelmät pystyvät koodaamaan korkealaatuista videodataa. Kustannustehokkaan ja riittävän laskentatehon saavuttamiseksi tarvitaan tulevaisuudessa muita ratkaisuja, kuin ainainen yksittäisen prosessorin kellotaajuuden kasvatus. Rinnakkaislaskenta mahdollistaa halvemman ja paljon tehokkaamman ratkaisun laskentatehon kasvattamiseen. (Peng et al. 2012, Chi et al. 2012) Rinnakkaislaskenta on siitakin luonnollinen ratkaisu, että moniydinprosessorijärjestelmät yleistyvät vauhdilla, minkä lisäksi lähes jokaisessa nykyaikaisessa tietokoneessa on grafiikkaprosessori, joka on luonteeltaan hyvin rinnakkainen (Choi ja Jang 2012).

Sopivuudestaan huolimatta rinnakkaisohjelmointi ei kuitenkaan ole helppo ratkaisu laskentatehon lisäämiseksi. Jotta rinnakkaisista järjestelmistä saataisiin laskennallista hyötyä, täytyy laskenta järjestää huolellisesti. Eri laskentayksiköiden välinen kommunikatio, laskennan synkronointi ja oikeellisuus ovat rinnakkaisohjelmoinnin suuria haasteita. Rinnakkaisohjelmoinnin ongelma on myös se, että pitkään sillä saavutetut hyödyt olivat pieniä verrattuna normaaliin laskentaan sen vaikeuksista johtuen. (Grama et al. 2003) Toisaalta Mooren lain mukainen prosessoreiden tehon kasvu on tarkoittanut sitä, että horisontissa on aina ollut tehokkaampia prosessoreita (Moore 1965). Nyt kuitenkin alettu saavuttaa raja, jossa kaikkia yksittäiselle sirulle asetettuja transistoreita ei voida käyttää esimerkiksi jäähdytyksen riittämättömyyden johdosta. Rinnakkaiset ratkaisut ovat tulevaisuudessa välttämättömiä.

Rinnakkaisuuden omien ongelmien lisäksi videokoodaus tuo rinnakkaislaskentaan omat haasteensa. Videodata on luonteeltaan moninaista ja sillä on runsaasti sisäisiä riippuvuuksia. Lähes kaikki nykyiset videokoodausmenetelmät hyödyntävät näitä riippuvuuksia koodausta nopeuttaakseen ja tallennustilaa säästääkseen, mutta rinnakkaislaskennan kannalta nämä riippuvuudet vähentävät rinnakkaistamisen mahdollistamista. Nykyisiä standardeja ei ole suunniteltu rinnakkaisuutta silmällä pitäen. (Pieters et al. 2012, Peng et al. 2012)

Videokoodauksen rinnakkaistaminen vaatii edellisissä kappaleissa esitettyjen ongelmien ratkaisua, eivätkä ongelmat määrästänsä huolimatta ole mahdottomia. Datan riippuvuuksia voidaan rikkoa, laskenta järjestää tehokkaaksi ja uusia standardeita kirjoittaa. Rinnakkaislaskennalla on tuotu onnistuneesti lisätehoa jo olemassa oleviin menetelmiin ja tulevien standardien suunnittelussa rinnakkaisuus on jo otettu huomioon. (Li et al. 2012, Chi et al. 2012) Rinnakkaisohjelmointi tulee yleistymään kaikilla tietotekniikan sovellusalueilla ja rinnakkaisohjelmointityökalut kehittymään. Vaikeuksista huolimatta rinnakkaislaskenta on myös videokoodauksen tulevaisuutta.

Tämä työ keskittyy esittelemään ratkaisuja videokoodauksen rinnakkaistamiseen. Lisäksi esitellään videokoodauksen ja rinnakkaislaskennan perusasioita, jotta rinnakkaisen videokoodauksen hyödyt, tarpeellisuus ja haasteet tulisivat esille. Aluksi esitellään digitaalisen liikkuvan kuvan peruskäsitteitä, rinnakkaislaskennan historiaa ja joitakin näitä tukevia tieteenaloja. Tämän jälkeen esitellään videokoodaus ja rinnakkaislaskenta. Lopulta esitellään varsinaisia ratkaisuja rinnakkaiseen videokoodaukseen ja tehdään yhteenveto tutkimuksen sisällöstä.

## 2 Digitaalinen liikkuva kuva ja rinnakkaislaskennan perusteet

Tässä luvussa käsitellään digitaalista videota, rinnakkaislaskennan historiaa sekä kahta liikkuvaan kuvaan ja rinnakkaislaskentaan liittyvää käsitettä, havaitsemista ja rinnakkaislaskennan oikeellisuutta. Luvun tavoitteena on toimia johdantona työn aiheisiin eikä niissä syvennytä mainittuihin teemoihin kovin tarkasti.

### 2.1 Digitaalinen video ja sen koodaus

Ennen kuin puhutaan digitaalisesta videosta, täytyy ymmärtää liikkuvan kuvan perusteita. Ensimmäisistä liikkuvan kuvan sovelluksista 1800-luvun lopulta alkaen elävä kuva on perustunut samaan ajatukseen, eli peräkkäisten kuvien nopeaan peräkkäiseen näyttämiseen liikkuvan kuvan vaikutelman aikaansaamiseksi. Eräs ensimmäisistä ja pisimpään selvinneistä tallennusformaateista oli filmi, jolle valotettiin peräkkäisiä valokuvia ja tulosta esitettiin projektorilla. Vuosien saatossa tallennusmenetelmät ovat kehittyneet ja siirtomenetelmät kehittyneet ensin analogisiksi radiosignaalien esimerkin innoittamana ja myöhemmin digitaalisiksi digitaalisen vallankumouksen myötä. (Mitra 2010) Kuvauksen ja tallentamisen periaatteet ovat kuitenkin samat läpi historian.

Viimeisen viidentoista vuoden aikana suurin osa videodatasta on muuttunut analogisesta digitaaliseksi. VHS-kaseteista ja analogisista TV-lähetyksistä on siirrytty Blu-Ray-tekniikoihin, kännykkäkameroihin teräväpiirtotelevisioihin. Tekniikan kehitys ei näy ainoastaan tallennusmedioissa, sillä niin ikään tiedonsiirto on kehittynyt ja muuttunut monin paikoin langattomaksi. (Richardson 2010) Digitaalisen videodatan määrä on myös valtavassa kasvussa (Cisco 2013, YouTube 2013). Raaka videodata vaatii suuret määrät tallennustilaa eikä sen siirtäminen langattomasti ole mahdollista - tarvitaan siis teknologia, jolla videodataa pakataan ja puretaan (enkoodataan ja dekodataan). Tätä pakkaamisen ja purkamisen prosessia kutsutaan videokoodaukseksi. Pakkaamisen ja purkamisen lisäksi videokoodaus kattaa myös signaalin reaaliaikaisesta kääntämisestä (transkoodaus). Transkoodaus tarkoittaa esimerkiksi enkoodatun datan kääntämistä toiseen koodausstandardiin (Angelides ja Agius 2011). Seuraavissa alaluvuissa käsitellään videokoodausmenetelmien perusteita. Tästä lähin näihin viitataan termein enkoodaus, dekodaus ja transkoodaus. Toinen kirjallisuudessa esiintyvä ja tärkeä termi on CODEC (COder DECOder pair), joka viittaa videokoodausta suorittavaan ohjelmistoon tai laitteeseen (Richardson 2010). Suomeksi CODEC taipuu koodekiksi.

Videokoodausstandardeja on useita, mainittakoon tässä H.264, MPEG-4 ja DICOM, joista kaksi ensimmäistä ovat kuluttajakäyttöön suunniteltuja standardeja ja viimeinen lääketieteelliseen kuvantamiseen suunniteltu.

## 2.2 Rinnakkaislaskennan perusteita

Rinnakkaislaskennan (parallel computing) tavoite on parantaa laskennan suorituskykyä. Käsitteellisesti rinnakkaislaskentaa ei kannata sekoittaa samanaikaiseen laskentaan (concurrent computing). Akateemisessa mielessä jälkimmäinen keskittyy rinnakkaisen laskennan oikeellisuuteen, kun taas ensimmäinen keskittyy saamaan hajautetusta ja rinnakkaisesta laskennasta näkyviä hyötyjä laskentatehoon. (Grama et al. 2003, Ben-Ari 2006) Tämä työ keskittyy rinnakkaisella laskennalla saavutettuihin hyötyihin videokoodauksen saralla, mutta myöhemmin tässä luvussa esitellään lyhyesti rinnakkaislaskennan oikeellisuuden tarkastelua.

Rinnakkaislaskennan nimi on suuntaa-antava. Suorituskykyä pyritään parantamaan suorittamalla laskentaa mahdollisimman monella laskentayksiköllä samaan aikaan. Ajatus on looginen - jos yhdeltä laskentayksiköltä kestää yhden aikayksikön suorittaa jokin laskentatehtävä, niin sadan laskentayksikön suorittaminen kestää sata aikayksikköä. Sadalta laskentayksiköltä taas menee samaan tehtävään vain yksi aikayksikkö. Yksinkertaiseen perusidea monimutkaistuu kuitenkin käytännössä valtavasti. Entä jos laskentatehtävät riippuvat muista laskentatehtävistä? Miten laskentayksiköt kommunikoivat keskenään ja mihin tieto tallennetaan? Nämä ongelmat saattavat tuntua pieniltä, mutta niiden johdosta rinnakkaislaskenta on pysynyt kehityksen marginaalissa vuosikymmeniä. (Grama et al. 2003) Rinnakkaislaskennan tuoma laskentatehon hyöty ei myöskään ole maailmaa muuttava, rinnakkaislaskenta ei esimerkiksi sovellu NP-täydellisten ongelmien poistamiseen ratkaistavien ongelmien listalta. NP-ongelmien ratkaisemiseksi tarvittaisiin ongelman kokoon nähden eksponentiaalinen määrä laskentayksiköitä, eikä tämä ole käytännöllistä.

## 2.3 Havaitseminen

Video on visuaalinen media ja havaitseminen on sitä vahvasti tukeva tutkimusala. Videokoodauksen kannalta havaitseminen on mielenkiintoista videodatan subjektiivisen laadun takia. Subjektiivista laatua käsitellään myöhemmin tässä työssä, mutta kerrottakoon tässä, että videodatan laatua voidaan pakatessa menettää ilman, että ihmissilmät havaitsee laadun heikkenemistä. Tätä tosiasiaa voidaan käyttää tiiviimmän pakkaamisen aikaansaamiseksi. (Richardson (2010))

Havainnoinnin tutkimustyökaluja ovat muun muassa silmien liikkeiden seuraukset, kyselytutkimukset ja aivojen kuvantaminen. Videodatan subjektiivista laatua ja näin erästä videokoodauksen onnistumisen kriteeriä voidaan mitata kyselytutkimuksella. Joitakin havaitsemistutkimuksen tuloksia on myös käytetty videokoodausmenetelmien kehittämiseen. Eräs tutkimus on parantanut videodatan subjektiivista laatua tutkimalla silmän liikkeitä ja parantanut yleisimpien havainnoinnin kohteena olleiden alueiden tarkkuutta videossa



(Oh ja Kim 2013). Toinen tutkimus on dekodannut liikkuvia kohteita videossa suuremmalla tarkkuudella, sillä ihmissilmä keskittyy luontaisesti liikkeeseen (Lee et al. 2011).

Huomattavaa on siis, että monista tieteenaloista on hyötyä videokoodaukselle. Menetelmiä voi aina parantaa, mutta keskittymällä olennaisiin parannuksiin päästään vähemmällä vaivalla.

## 2.4 Rinnakkaislaskennan oikeellisuus

Laskentatehon lisäyksen lisäksi rinnakkaisuus lisää virhelähteitä laskentaan. Muistin käsittely, laskennan aikataulutus ja viestikanaavien käyttö ovat esimerkkejä virhelähteistä, joita ei perinteisessä peräkkäisessä ohjelmoinnissa esiinny. Rinnakkaisten järjestelmien oikeellisuuden tarkastelua vaikeuttaa se, että virheitä on vaikea toistaa, sillä ne saattavat riippua hyvin tarkoista ajoituksista ja sopivista suoritusjärjestyksistä ohjelman ajon aikana. Kaikki ehdot eivät välttämättä kaikkien ajojen aikana toteudu ja virheitä on vaikea löytää ja toistaa. Nämä seikat lisäävät ongelmia rinnakkaisohjelmien toteutukseen kaiken muun mainitun lisäksi. (Ben-Ari 2006)

Yrityksellä ja erehdyksellä virheiden etsiminen on kallista ja aikaa vievää, joten parempia keinoja tarvitaan. Eräs analyyttinen ratkaisu rinnakkaislaskennan oikeellisuuden tarkasteluun on mallintarkistus. Tässä menetelmässä rinnakkainen ohjelma kuvataan mallina, joka täyttää jollekin abstraktion tasolle asti ohjelmalle asetetut vaatimukset. Mallia voidaan tutkia automaattisilla työkaluilla, jotka paljastavat mahdollisia rinnakkaisuuden ongelmia, kuten muistin ylikirjoittamista, ei-toivottuja kisatilanteita tai laskennan umpikujia (deadlock). (Ben-Ari 2006) Mallintarkastus on laskennallisesti erittäin vaativa tehtävä, mutta se saattaa säästää järjestelmän myöhemmiltä, mahdollisesti hyvin kalliilta ja vaikeilta ongelmilta.

## 3 Videokoodaus

Tässä luvussa käsitellään videokoodauksen perusteita. Luvun tavoite on antaa riittävät taustatiedot videokoodausmenetelmistä, jotta myöhemmässä vaiheessa tätä työtä voidaan esitellä rinnakkaisia videokoodausmenetelmiä sekä antaa hyvä yleiskuva videokoodauksesta. Yleisen käsittelyn lisäksi tekstissä on esitelty lyhyesti muutama mielenkiintoinen tutkimus, jotka ratkovat joitakin videokoodauksen ongelmia.

### 3.1 Videokoodauksen peruskäsitteet

#### 3.1.1 Videokuvan esittäminen ja tallentaminen

Havaitsemamme maailma on täynnä erilaisia kohteita, joilla on erilaisia ominaisuuksia, kuten muoto, syvyys, tekstuuri, väri tai valotiheys, ja joita videolle haluttaisiin tallentaa. Maailma on niin ikään jatkuva, mitä esimerkiksi digitaalinen maailma ei ole. Jotta kameralla tai vastaavalla laitteella voitaisiin tallentaa esitys maailmasta, täytyy havainnot käsitellä ja tallentaa digitaaliseen maailmaan sopivaksi. Tässä luvussa käsitellään erialaisia keinoja tallentaa videodataa - otantoja, ennustamista, väriavaruuksia ja näihin liittyviä matemaattisia tekniikoita ja käsitteitä.

Videodataa varten maailmasta täytyy kerätä näytteitä eri ajanhetkiltä. Otanta tapahtuu kahdessa ulottuvuudessa, ajassa ja tilassa (temporal and spatial sampling). Tyypillisesti tilaotokset ovat suorakaiteen muotoisia kuvia maailmasta, kun ajallinen otanta koostuu peräkkäisistä tilaotoksista. Tilaotokset koostuvat neliönmuotoisista kuvapisteistä eli pikseleistä, jotka on järjestetty ruudukoksi. Tilaotoksia peräkkäin toistamalla saadaan aikaan vaikutelma elävästä kuvasta. Tällainen data (käsittelemättömät aika- ja tilanäytteet) tunnetaan myös raakadatana. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)

Jokaisen tilanäytteen kuvapisteeseen tallennetaan pisteeseen liittyvät tiedot. Yksinkertaisinta kuvaa eli mustavalkokuvaa varten riittää esimerkiksi tallentaa vain yksi arvo kuvapisteestä (kirkkaus tai valotiheys), mutta värikuvassa täytyy tallentaa jokaisessa pisteessä esiintyvien värien määrä. Väriavaruudeksi kutsutaan menetelmää, joka on valittu kuvapisteiden kirkkauden, valotiheyden ja värin kuvaamiseksi. Värikuvan tallentamisessa suosittu tapa on RGB-väriavaruus. Tässä menetelmässä jokaisella kuvapisteellä on kolme parametria: punaisen, vihreän ja sinisen värin määrä. Edistyneemmät väriavaruudet hyödyntävät ihmisaivojen suurempaa herkkyyttä valotiheydelle kuin väreille (RGB-väriavaruudessa valotiheys ja väri ovat samanarvoisia tietoja). (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010) Huomattavaa on, että väriavaruudet ovat matemaattisia malleja havaitusta maailmasta. Niille on paljon erilaisia implementaatioita, joihin ei tämän työn puitteissa syvennyttä tarkemmin.

Avaruudellisia näytteitä voidaan ottaa joko peräkkäin (progressive) tai lomittain (interlacing). Peräkkäisessä otannassa jokaisella ajanhetkellä otetaan otos, johon tallennetaan käytössä olevan standardin mukainen määrä kuvapisteitä. Otosta kutsutaan ruuduksi (frame). Lomittaisessa otannassa taas jokaisella ajanhetkellä tallennetaan puolet standardin määräämistä kuvapisteistä vaakasuunnassa joka toinen rivi siten, että peräkkäisillä ajanhetkillä tallennetaan lomittaiset rivit. Otosta kutsutaan kentäksi (field). Erotukse-  
na näillä metodeilla on siinä, että lomittaisella otannalla syntyy pehmeämmin liikkuvaa kuvaa kuin peräkkäisellä otosten määrän ollessa sama. Lomittamalla jokaiseen otokseen tallennetaan myös vähemmän tietoa. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)

### 3.1.2 Videodatan muut osat ja synkronointi

Videodata ei koostu ainoastaan varsinaisesta videokuvasta, vaan kuvan lisäksi tallennusvaiheessa tallennetaan ääntä. Ääniraita enkoodataan kuvadatan tavoin halutulla menetelmällä ja tallennetaan kuvadatan oheen (Angelides ja Agius 2011). Tässä työssä ei syvennytä tarkemmin äänen koodaamiseen, mutta perusperiaatteet pakkausmenetelmissä ovat samankaltaiset. Kuvan ja äänen lisäksi videokoodauksen eri vaiheissa dataan voidaan lisätä haluttuja ominaisuuksia. Suomessa tutuin lisä on tekstitys, joka muiden lisäominaisuuksien tavoin usein tallennetaan varsinaisesta videodatasta erillään. On myös mahdollista tallentaa tieto lisäominaisuuksista koodattuun videodataan - tätä kutsutaan tiedon piilotukseksi ja sillä saavutetaan pieniä etuja pakkauksen koon suhteen pientä videon laadun menetystä vastaan. (Liao et al. 2011) Tällöin lisäominaisuuksien synkronointi ei ole tarpeen.

Videodatan osien ollessa erillisiä kuitenkin tarvitaan keino tahdistaa data eri lähteistä hyvän katselukokemuksen takaamiseksi. Perusmenetelmiä on kolme. Ensimmäinen on aikaleimatahdistus (Time-Stamps Synchronization), jossa eri lähteisiin lisätään aikaleimoja. Aikaleimojen perusteella osataan eri lähteistä tuleva data näyttää käyttäjälle samanaikaisesti. Toinen keino on tahdistusmerkki (Synchronization Marker), joka käytännössä tarkoittaa eri datalähteiden välistä kommunikaatiota, käytännössä merkin lähettämistä ja vastaanottamista, tahdistuksen saavuttamiseksi. Kolmas on limitystahdistus (Multiplex Synchronization), jossa limitetään eri datalähteet yhdeksi lähteeksi hyödyntäen näin niiden luonnollista järjestystä tahdistuksen saavuttamiseksi. Nauhoittaessahan kuva ja ääni ovat tahdistettu. Perusmenetelmien lisäksi on tutkittu erilaisia metodeita sulauttaa lisäominaisuuksien lisäksi myös audio varsinaiseen videodataan. Tällöin enkoodausvaiheessa kuvadataan lisätään äänidataa. Tehdyssä tutkimuksessa videon tai kuvan laadun heikkeneminen ei ollut ihmissilmällä havaittavissa. (Qi et al. 2011, Mujal ja Kirilina 2002)

### 3.1.3 Pakkaus

Kaikenlaisen median pakkausmenetelmät voidaan jakaa häviöttömiin ja häviöllisiin pakkausmetodeihin (lossy, lossless). Häviöttömissä metodeissa pakatusta datasta pystytään purkuvaiheessa palauttamaan täydellinen versio alkuperäisestä datasta, häviöllisessä pakkauksessa purettu versio on approksimaatio alkuperäisestä. On olemassa häviöttömiä videokoodausmenetelmiä, mutta pakkaussuhde jää liian alhaiseksi käytännön sovelluksiin. Häviölliset pakkausmenetelmät keskittyvät poistamaan datasta subjektiivista redundanssia, eli sellaisia yksityiskohtia, jota havainnoija ei kykene havaitsemaan. Näin saavutetaan huomattavasti tehokkaampia videokoodausmenetelmiä. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010) Toisaalta esimerkiksi lääketieteelliset sovellukset tai konenäkösovellukset vaativat korkealaatuista kuvaa, jolloin häviötön pakkaaminen on ainoa vaihtoehto (Peng et al. 2012).

Suurin osa videokoodausmenetelmistä hyödyntää videodatan vahvaa avaruudellista ja ajallista redundanssia. Käytännössä peräkkäisissä ruuduissa on suurella todennäköisyydellä lähes samat kuvapistet (ajallinen) ja yhdessä ruudussa lähekkäiset kuvapistet muistuttavat toisiaan suurella todennäköisyydellä (avaruudellinen). Monien koodekkien ensimmäinen askel videon koodaamiseen on ennustaminen - jollakin määrällä edellisiä ajallisia näytteitä voidaan melko suurella todennäköisyydellä ennustaa, mitä tässä näytteessä tulee olemaan. Samaan tapaan saman näytteen sisällä jo käsiteltyjen kuvapisteiden perusteella ennustetaan tulevien kuvapisteiden laatua. Ennustuksilla voidaan vähentää tallennettavan datan määrää, kun purkuvaiheessa näytteitä pystytään uudelleenrakentamaan edellisten näytteiden perusteella. Läheisesti ennustamiseen liittyvä käsite on liikekompensaatio (motion compensation). Käytännössä liikekompensaatio on ennustamisen apukeino. Esimerkiksi kameran kääntyessä ei verrata peräkkäisissä näytteissä samoilla koordinaateilla olevia kuvapisteitä vaan myös sopivalla tavalla lähialueilta valittuja pisteitä. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)

## 3.2 Videodatan riippuvuudet

Videodata on luonteeltaan monijakoista sen sisältäessä niin liikkuvaa kuvaa, ääntä kuin mahdollisia lisäominaisuuksia. Näiden sekä enkoodauksen aikaisen ennustamisen johdosta koodatulla videodatalla on vahvoja riippuvuussuhteita. Riippuvuuksia on kahdentyyppisiä. Ajallinen riippuvuus tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että onnistunut videodatan toistaminen on riippuvainen kaikista videodatan osien samanaikaisesta toistamisesta. Datariippuvuutta syntyy ruutujen ja kenttien sisällä esimerkiksi ennustettaessa uuden kuvapisteen arvoa edellisten kuvapisteiden perusteella tai uusia näytteitä ennustettaessa vanhojen perusteella. (Mujal ja Kirlin 2002)

Riippuvuudet vaikeuttavat videokoodausprosessia ja lisäävät siihen ylimääräisiä vaiheita ja monimutkaisuutta, kuten synkronointi (pelkän äänen tai kuvan koodaaminen on paljon helpompaa). Seuraavassa aliluvussa käsiteltävä diskreetti kosinimuunnos ja muut koodaukseen liittyvät operaatiot eivät ole itsessään kovin vaativia, mutta koodekit ovat kuitenkin varsin suuria ohjelmistoja kaiken laskentaa tehostavien lisäysten johdosta. Esimerkiksi x264-ohjelmisto, joka on avoimen lähdekoodin toteutus suositusta H 264 -standardista (Richardson 2010), on n. 100 000 riviä koodia (VideoLan 2013).

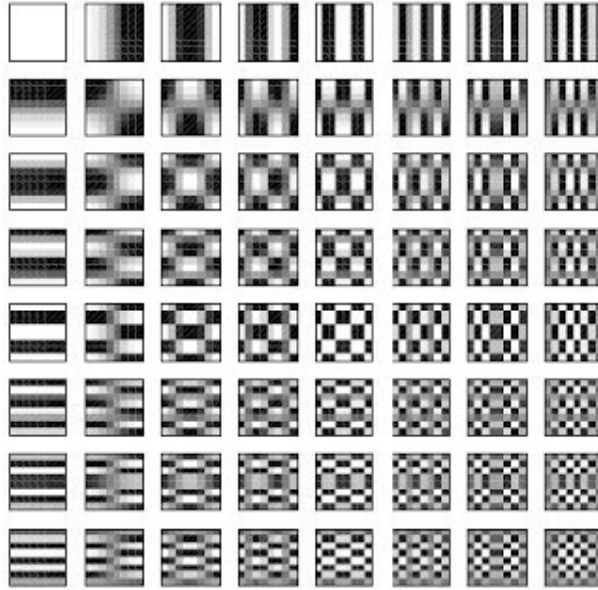
Erityisesti riippuvuudet vaikeuttavat erilaisten koodausalgoritmien rinnakkaistamista - rinnakkaislaskennassa yhden laskentayksikön laskemat tulokset ovat toisille yksiköille käytännössä saavuttamattomissa. Rinnakkaisuuden ja riippuvuuksien ongelmia käsitellään myöhemmin rinnakkaislaskentaa sekä rinnakkaista videokoodausta käsittelevissä luvuissa. On kuitenkin myös esitetty runsaasti keinoja, joilla riippuvuuksista päästään eroon. Ennustaminen toimii hyvin peräkkäisissä koodausmenetelmissä, mutta videolaadun kasvaessa peräkkäiset ratkaisut alkavat olla liian tehottomia (Choi ja Jang 2012, Peng et al. 2012). Luoviakin ratkaisuja on tehty - Lee et al. 2011 ehdottaa menetelmää, jossa videon äänilähteet piirretään suuremmalla tarkkuudella, koska ihmisten on luonteva keskittää huomionsa äänilähteisiin. Tämä parantaa videon subjektiivista laatua, johon palataan myöhemmässä aliluvussa. Mainitut lähteet (Mujal ja Kirilin 2002, Qi et al. 2011) esittelevät keinoja helpottaa videodatan synkronointia ja vähentää tallennustilan tarvetta subjektiivisen laadun pysyessä käytännössä samana.

### 3.3 Diskreetti kosinimuunnos

Ennen tallentamista tai siirtämistä videodataa useimmiten käsitellään vielä jollain tavalla ennustusten lisäksi. Tavoitteena on vähentää tallentamiseen tarvittavaa muistia ja helpottaa aikanaan tapahtuvaa dekodeausta. Tekniikoita on monia, mutta esitellään tässä yleisin, eli diskreetti kosinimuunnos (Discrete Cosine Transformation, DCT).

DCT on Fourier-muunnoksen kaltainen muunnos, joka operoi  $N \times N$  kokoisilla blokeilla avaruudellisissa näytteissä. Muunnos tuottaa niin ikään  $N \times N$  kokoisin blokin, mutta kuvapisteen arvojen sijaan uuden blokin arvot ovat kosinimuunnoksen peruslohkojen suhteellisia voimakkuuksia koodattavassa olevassa lohkoissa. Kuvassa 1 on esitetty  $8 \times 8$  -lohkon DCT:n peruslohkot. (Richardson 2010)

DCT:n hyöty ei ole ilmeinen, sillä muunnos tapahtuu  $N \times N$  -lohkosta  $N \times N$  -lohkoon, eikä tässä säästetä lainkaan tilaa. Hyöty ilmenee purkuvaiheessa - on mahdollista purkaa DCT:n avulla tallennettua tietoa riittävän tarkaksi käyttämällä vain osaa DCT:n tuottamista suhteellisista voimakkuuksista. Voidaan siis tallentaa vain osa DCT:n tuottamista arvoista ja käyttää näin vähemmän tilaa tiedon tallentamiseen. Tyypillisesti käytetään DCT:n tuottamat suurimmat arvot eli merkityksellisimmät peruslohkot, jolloin harvi-



Kuva 1:  $8 \times 8$  DCT:n peruslohkot

naisemmat ja räikeimmät erot jäävät puuttumaan lopullisesta kuvasta. Piirtämättä jäävät sellaiset yksityiskohdat, joita ihmissilmä on muutenkin heikko havaitsemaan. DCT:tä käyttävät koodausmenetelmät ovat siis pääosin häviöllisiä. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)

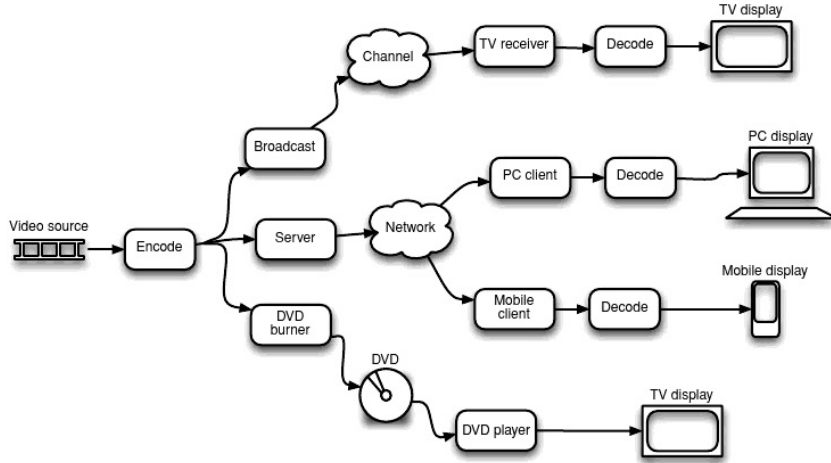
### 3.4 Videodatan matka lähteestä näyttölaitteelle

Videodata saa alkunsa lähteestä, joka on tyypillisesti kamera, joka tallentaa raakadatan. Tämän jälkeen suoritetaan koodekki suorittaa enkoodauksen, minkä jälkeen tiivistetty data voidaan tallentaa tai siirtää. Ketjun toisessa päässä on jälleen koodekki joka suorittaa tällä kertaa dekodauksen ja esittää videon käyttäjälle. Kuva 2 havainnollistaa videodatan eri reittejä käyttäjälle ja toisaalta alleviivaa sitä, että kerran koodattu data on helppo siirtää ja se toimii erilaisissa ympäristöissä. (Richardson 2010)

Koodauksen kolmas muoto, transkoodaus, tulisi tehdä, jos haluttu näyttölaite ei tuekaan sille tarjottua koodaustapaa.

### 3.5 Kuvadatan laadun mittarit

Videodatan laatua voidaan mitata subjektiivisesti ja objektiivisesti. subjektiivinen mittaaminen on vaikeaa, sillä ihmisten arvioihin vaikuttavat monet seikat. Objektiivinen mittaaminen taas antaa selviä lukuja vastaukseksi, mutta tulosten merkitys ja vaikutus katsojakokemukseen on selvitettävä erikseen. Videodatan kohdalla subjektiivista mittamista voidaan usein pitää tärkeämpänä kuin objektiivista, sillä tavoitteena usein on mah-



Kuva 2: Videokoodaus mahdollistaa datan liikkuvuuden

dollisimman miellyttävän katselukokemuksen tuottaminen käyttäjälle. (Richardson 2010) Toisaalta videodatan objektiivinen laatu on erityistapauksissa myös tärkeää, esimerkiksi konenäköä hyödyntävissä sovelluksissa tai koneiden muuten tulkitessa videodataa. Videodatan määrän kasvaessa jatkuvasti ja konenäkösovellusten, kuten robottien, lisääntyessä saattaa objektiivisesta laadusta tulla subjektiivista tärkeämpää. (YouTube 2013, Cisco 2013).

Seuraavassa esitellään muutamia objektiivisia tapoja mitata videodatan laatua. Subjektiivinen mittaaminen perustuu lähinnä ihmisillä tehtyihin kyselytutkimuksiin, joilla on omat ongelmansa. Tässä työssä niihin ei keskitytä syvemmin.

Tiheys, jolla ruutuja tallennetaan, määrää ruutunopeuden (frame rate). Ruutunopeus ja kuvapisteen määrä tarjoaa helpon mittarin kuvan laadulle. Normaalitarkkuuksinen ja korkeatarkkuuksinen (Standard Definition, High Definition) videodata eroavat toisistaan juuri kuvapisteen määrän ja ruutunopeuden perusteella. Valittu ruutujen tai kenttien esitystapa vaikuttaa kuitenkin subjektiiviseen laatuun, joten ruutunopeuden ja kuvapisteen määrää ei voi pitää ehdottomana laadun mittarina. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)

Yleisesti käytetty mittari videodatan laadun mittaamiseen on PSNR-arvo (Peak Signal to Noise Ratio). PSNR kertoo erosta alkuperäisen ja uuden kuvan välillä ja se on määritelty

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{(2^n - 1)^2}{MSE}, \quad (1)$$

missä MSE on keskimääräinen neliöity virhe (Mean Squared Error) alkuperäisen kuvan ja uuden kuvan välillä. (Richardson 2010)

PSNR on helppo laskea ja antaa erään objektiivisen arvion videon laadusta. Menetelmällä on puutteensa, kuten se, että alkuperäistä kuvaa ei ole välttämättä saatavilla. Toisaalta, kuten monissa objektiivissa mittareissa, pelkkä PSNR arvo ei vastaa suoraan mitään subjektiivista arvoa. Yleisesti ottaen korkea PSNR arvo tarkoittaa hyvää laatua ja matala arvo huonoa. (Richardson 2010, Du ja Swamy 2010)



## 4 Rinnakkaislaskenta

Tässä luvussa käsitellään rinnakkaislaskennan perusteita, haasteita ja RVC-CAL-standardi, jonka tavoite on helpottaa rinnakkaisten videokoodausmenetelmien suunnittelua. Tekstissä esitellään lyhyesti myös kuuluisa Amdahlin laki sekä muutama tutkimus automaattisten rinnakkaistamisen toteutukseen.

### 4.1 Erilaisia rinnakkaisuuksia

Rinnakkaisuutta on nykypäivän tietokonejärjestelmissä monella tasolla. Nykyaikaisissa supertietokoneissa on jopa yli miljoona ydintä (Meuer et al. 2013), tavallisia tietokoneita kerätään laskentaklustereiksi, tieteellisessä laskennassa hyödynnetään monenlaisia rinnakkaisia laskentamenetelmiä ja jopa Internetiä voidaan pitää eräänlaisena rinnakkaislaskennan alustana. Toisaalta suurten supertietokoneiden lisäksi rinnakkaisuus on tullut aivan tavallisten kuluttajätietokoneiden osaksi. Prosessorit ovat jo pitkään hyödyntäneet erilaisten laskentayksiköiden samanaikaista käyttöä laskentaa tehostaakseen. Viimeksi mainittu menetelmä tunnetaan termillä liukuhihnaus (pipelining). (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

Yhteisiä eri tason rinnakkaisille ratkaisulle ovat niin hyödyt kuin haitatkin. Kaikki tavoittelevat lisäystä suorituskykyyn, mutta rinnakkaisuuden hallinta tuo laskentaan omia haasteitaan. Esimerkiksi liukuhihnaamisen hyödyt käyvät ilmi seuraavasta esimerkistä. Oletetaan, että tehdas tuottaa autoja. Kunkin auton valmistaminen kestää sata tuntia, joten valmistamalla yksi auto kerrallaan saadaan sadassa tunnissa yksi auto. Jos auton valmistus kuitenkin pilkotaan kymmeneen osaan, joita voi suorittaa rinnakkaisesti, ja joiden suoritus kestää kymmenen tuntia, voidaankin sadassa tunnissa tuottaa kymmenen autoa. Saavutettu hyöty triviaalissa esimerkissä on kymmenkertainen. (Grama et al. 2003). Toisaalta samaa esimerkkiä voidaan hyödyntää ilmentämään liukuhihnaamisen vaikeuksia. Jos esimerkiksi kaksi peräkkäistä tehtävää olisivat auton ovien kiinnittäminen ja maalaminen, niin on selvää, että autoa ei voi maalata ennen ovien kiinnittämistä. Esimerkiksi tällaiset riippuvuussuhteet aiheuttavat ongelmia rinnakkaislaskennalle ja niitä sekä muita haasteita varten täytyy kehittää hallintarakenteita.

Hallintarakenteita erilaisille rinnakkaisuuden muodoille on monia. Yksinekertaiseen liukuhihnaamiseen eräs ratkaisu on suoritettavien operaatioiden järjestäminen sellaiseen järjestykseen, että riippuvuussuhteet eivät aiheuta ongelmia. Toisaalta liukuhihnaa voidaan myös hidastaa, jolloin saavutettu laskentateho vähenee, mutta laskenta pysyy oikeana. Nämä ratkaisut kuulostavat yksinkertaisilta, mutta niiden toteutukseen ja vaikutuksiin liittyy kuitenkin haasteita, joihin ei kuitenkaan tässä työssä syvennytä tarkemmin. (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

Kun laskentayksiköitä on enemmän, tarvitaan monimutkaisempia hallintamekanismeja. Huomattavaa on kuitenkin, että usein rinnakkaisuutta on laskentayksikössä monella tasolla - esimerkiksi prosessoreita on monta, ja jokaisella prosessorilla on oma liukuhihnansa. Monimutkaisemmat hallintarakenteet voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan sen perusteella, miten paljon laskennan hallintaa kullekin laskentayksikölle on jaettu. Jos hallinta on keskitetty, kyseessä on SIMD-arkkitehtuuri (Single Instruction stream, Multiple Data stream). SIMD-arkkitehtuurissa yksittäinen hallintayksikkö päättää, mitä kukin laskentayksikkö laskee. MIMD-arkkitehtuurissa (Multiple Instruction stream, Multiple Data stream) jokaisella laskentayksiköllä on oma hallintayksikkönsä. Konkreettisenä esimerkkinä arkkitehtuurien erona voi pitää esimerkiksi sitä, että MIMD-arkkitehtuurissa jokainen laskentayksikkö voi suorittaa eri ohjelmia, kun SIMD-arkkitehtuurissa hallintayksikkö päättää, mitä ohjelmaa kaikki laskentayksiköt suorittavat. (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

## 4.2 Rinnakkaisuuden peruskäsitteitä

Erilaisten rinnakkaisuuden muotojen lisäksi rinnakkaislaskenta voidaan jakaa kahteen tyyppiin sen perusteella, mihin rinnakkaisuus kohdistuu. Tehtävärinnakkaisessa laskennassa rinnakkain suoritetaan erilaisia tehtäviä - esimerkiksi saman ohjelman eri säikeitä. Datarinnakkaisessa ohjelmoinnissa taas rinnakkaisuus syntyy siitä, että operoidaan samaan aikaan eri datan osa-alueilla. (Grama et al. 2003) Datarinnakkainen lähestymistapa sopii hyvin joidenkin videokoodauksen osien rinnakkaistamiseen. Esimerkiksi diskreettiä kosinimuunnosta tehdessä, voidaan kukin lohko käsitellä erikseen, sillä ne ovat riippumattomia toisistaan. Saavutetut hyödyt laskenta-ajassa ovat huomattavat. Toisaalta videodatan vahvojen riippuvuussuhteiden takia rinnakkaisuuden soveltaminen muissa tarkoituksissa vaatii kekseliäisyyttä.

### 4.2.1 Tiedon välittäminen laskentayksiköiden välillä

Rinnakkaisuuden kohteen lisäksi rinnakkaisilla kohteilla on erilaisia tapoja järjestää tiedon liikkuminen laskentayksiköiden välillä. Pääparadigmoja on kaksi, jaettu muisti (shared memory) ja viestinvälitys (Message Passing Interface, MPI). Jaetun muistin mallissa laskentayksiköillä on yhteinen muisti, josta jokainen saa lukea ja kirjoittaa. Jotta yhteinen muisti pysyy puhtaana eli kaksi laskentayksikköä ei lue ja/tai kirjoita samaan muistiosoitteeseen samaan aikaan, täytyy järjestelmällä olla keinot päättää milloin mitkin muistialuetta saa käsitellä. Erilaisia ratkaisuja tähän ongelmaan (mutual exclusion) on useita, kuten monitorit tai semaforit. Samojen muistialueiden käsittelyyn liittyy myös käsite kisatilanteista (race condition). Kisatilanteessa kaksi laskentayksikköä tavoittelee samaa muistialuetta, mutta valitun muistinsuojausmenetelmän pitäisi estää tämä. Kisa-

tilanteet eivät varsinaisesti ole rinnakkaisten ohjelmien vikoja vaan syntyvät rinnakkaisohjelmoinnin sivutuotteena. (Ben-Ari 2006)

Viestinvälitysmenetelmän nimi kuvaa sitä hyvin. Jokaisella laskentayksiköllä on oma muistiavaruutensa, ja jos esimerkiksi yksiköiden välillä halutaan synkronoida, niin ne vaihtavat viestejä. Menetelmä vaatii, että jokaisella laskentayksiköllä on tunnistus, jolla sen voi erottaa muista. Tämä vaatimus ei koske jaetun muistin menetelmää. Luonnollisesti viestien välittämiseen tarvitaan myös jokin kanava niiden toimittamiseen. Viestien välittäminen on jaetun muistin käyttämisestä tehottomampaa, mutta sitä käyttämällä on helpompi pitää yllä erilaisia laskentayksiköitä. Kaikkien käyttäessä samaa muistia yksiköiden tulee käsitellä muistia samalla tavalla, mutta viestejä välittäessä jokaisen yksikön täytyy vain täyttää viestinvälitysrajapinnan vaatimukset. (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

#### **4.2.2 Rakeisuus ja laskennan järjestäminen**

Jotta laskentatehtäviä voidaan suorittaa rinnakkaisesti, täytyy tehtävät hajottaa (decompose) pienempiin osiin. Hajotusta tehdessä otetaan huomioon laskennan erilaiset riippuvuudet ja jaetaan laskentatehtävä pienempiin osatehtäviin. Tiedot riippuvuuksista täytyy tallentaa myöhempää käsittelyä varten. Kaikki osatehtävät eivät välttämättä ole samankokoisia ja kun jako on tehty, kukin osatehtävä on uusi, jakamaton laskennan kohde. Tyyppillisesti ohjelmoijan tehtäväksi jää jakaa laskentatehtävät osatehtäviksi. (Grama et al. 2003) Tehtävienjako voidaan tehdä myös staattisesti eli ennen ohjelman ajon aloittamista tai dynaamisesti eli ajonaikaisesti (Rauber ja Gudula 2010). Automatisoitua rinnakkaisamista kuitenkin tutkitaan. Erään tutkimuksen tuloksena on laskenta-arkkitehtuuri joka optimoi peräkkäisestä koodista rinnakkaisesti ajettavaa koodia (Apopei ja Dodd 2012). Toinen tutkimus esittää työkalun, joka erottaa rinnakkaisuuden löytämisen ja optimoinnin sekä esittää ohjelmointirajapinnan (API) tämän toteuttamaan (Raman et al. 2011).

Osatehtävien kokoa ja määrää kutsutaan rakeisuudeksi. Jos osatehtäviä on vähän ja ne ovat suuria, puhutaan karkeasta rakeisuudesta (coarse-grained decomposition), kun taas suurta määrää pieniä osatehtäviä kutsutaan hienojakoiseksi (fine-grained decomposition). Myöhemmin esitetään joitakin rinnakkaislaskennan tehokkuuden mittareita, mutta eräs rinnakkaisuuden tunnusluku on rakeisuuteen liittyvä rinnakkaisuusaste. Korkein rinnakkaisuusaste kuvaa, kuinka montaa osatehtävää laskea samanaikaisesti ohjelman ajon aikana. Korkein rinnakkaisuusaste on yleensä osatehtävien määrää pienempi osatehtävien riippuvuussuhteiden johdosta. Korkeinta rinnakkaisuusastetta yleisemmin käytetty rinnakkaisuuden tunnusluku on keskimääräinen rinnakkaisuusaste, joka kertoo, kuinka monta osatehtävää oli laskennassa keskimäärin ohjelman ajon aikana. (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

Kun jako osatehtäviin on tehty, täytyy osatehtävä jakaa laskentayksiköille. Purkuvaiheessa tallennetut riippuvuustiedot ovat tärkeitä laskentaa järjestettäessä. Tässä työssä ei tarkemmin syvennyttä erilaisiin hajotustekniikoihin tai laskennan järjestämiseen, mutta muutamia yleisperiaatteita käydään seuraavassa läpi. Tästälähin laskennan järjestämistä kutsutaan kuvaukseksi, jonka lähtöjoukkona on looginen laskentaongelma ja kohdejoukkona fyysiset laskentayksiköt. Hyvät kuvausalgoritmit pyrkivät hyödyntämään suuren määrän laskentayksiköitä mahdollisimman tehokkaasti - muista riippumattomat osatehtävät eri laskentayksiköille, mahdollisimman moni laskentayksikkö käytössä, paljon viestivät osatehtävät samoille laskentayksiköille. Toisaalta pitäisi pitää laskentayksiköitä vapaana sellaisille tehtäville, joista muut tehtävät ovat riippuvaisia. Päämäärät ovat ristiriitaisia, sillä ei ole esimerkiksi joidenkin laskentayksiköiden vapaana pitämien on selvästi ristiriitaista mahdollisimman suuren käyttöasteen saavuttamiseksi. Sopivan tasapainon ja hyvän kuvauksen löytäminen ei ole helppo tehtävä, ja vaikka rinnakkaisuusaste antaa teoreettisen parhaan arvon rinnakkaisuudelle, käytännössä kuvaus määrää, kuinka rinnakkaista laskenta oikeasti on. (Grama et al. 2003, Rauber ja Gudula 2010)

#### 4.2.3 Amdahlin laki

Useasti on mainittu, että rinnakkaislaskennan tavoite on laskentatehon lisäys. Rinnakkaislaskennan laskentatehon lisäystä verrattuna peräkkäiseen laskentaan kuvaa Amdahlin laki, joka kuuluu

$$\frac{1}{r_s + \frac{r_p}{n}}, \quad (2)$$

missä  $r_s + r_p = 1$  ja  $r_s$  kuva ei-rinnakkaistuvaa osaa ohjelmasta,  $r_p$  rinnakkaistuvaa osaa ja  $n$  laskentayksiköitä (Amdahl 1967). Kaavasta voidaan päätellä, että laskentayksiköiden määrää suurentaessa laskentateho ei kasva äärettömyyksiin.

### 4.3 Rinnakkaisuuden haasteita

Rinnakkaistaminen tehostaa laskentaa, mutta rinnakkaistaminen tuo uudenlaisia haasteita tietokonejärjestelmien suunniteluun. Mainitut hallintarakenteet tuovat ylimääräisiä kustannuksia laskennan oheen, kuten viestintään liittyviä vaatimuksia. Tietokoneiden tehokkuutta ei määrittele ainoastaan prosessorin tai prosessorien nopeus, vaan esimerkiksi muistin vasteaika ja kaistanleveys asettaa rajoja sille, kuinka paljon laskentaa voidaan suorittaa. Muistin hitautta voidaan kompensoida monilla keinoilla, kuten välimuisteilla (cache), monisäikeisyydellä (multithreading) tai ennakkohauilla (prefetching). Muistin

hitaus ei ole yksinomaan rinnakkaislaskennan ongelma, mutta ongelma pahenee hallintakustannuksien ja monien laskentayksiköiden ongelmien kertautuessa. (Grama et al. 2003)

Puhtaasti rinnakkaisuuteen liittyviä ongelmia ovat esimerkiksi tyhjäkäynti (idling) ja turha laskeminen (excess computation). Tyhjäkäynnissä jotkin laskentayksiköt eivät suorita mitään laskentaa. Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että hallintajärjestelmä ei ole antanut laskentayksikölle laskettavaa, koska tarpeeksi tehtäviä ei ole. Videokoodauksen yhteydessä mainitut riippuvuudet aiheuttavat myös tyhjäkäyntiä. Tällöin resursseja hukataan. Turhaa laskentaa on esimerkiksi se, että useampi laskentayksikkö laskee samaa asiaa tahoillaan. Tällainen tilanne saattaa syntyä esimerkiksi silloin, kun rinnakkaislaskentaan valittu algoritmi ei ole tehtävään optimaalinen. Tilanne ei ole harvinainen, sillä monet tehokkaat peräkkäiset algoritmit käyttävät aiemmin laskettua tietoa hyväkseen. Laskennan ollessa hajautettuna eri laskentayksiköille aiemmin lasketun tiedon hyödyntäminen on mahdotonta. (Grama et al. 2003)

#### 4.4 Rinnakkaisten järjestelmien tehokkuuden mittaaminen

Aiemmin mainittiin Amdahlin laki, joka antaa karkean arvion ohjelman rinnakkaistamisen tuomasta laskentatehon nopeuden kasvusta. Tämä ei kuitenkaan ole ainoa tapa mitata rinnakkaisia järjestelmiä. Muita tässä käsiteltäviä tapoja ovat rinnakkaisuuden lisäkustannukset, ohjelman suoritus aika, laskennan tehokkuus, ja laskennan hinta. Kaikkia tuloksia voidaan verrata peräkkäisen ohjelman vastaaviin suorituksiin ja todeta, onko rinnakkaistaminen järkevää. (Grama et al. 2003)

Peräkkäisen ohjelman tapauksessa ohjelman suoritus aika on aika ohjelman suorituksen alkamisesta sen päättymiseen, jatkossa  $T_p$ . Rinnakkaisen ohjelman suoritus aika on aika rinnakkaisen ohjelman suorituksen alkamisesta viimeisen laskentayksikön laskennan loppumiseen, jatkossa  $T_r$ . (Grama et al. 2003)

Rinnakkaisuuden lisäkustannukset muodostuvat hallintajärjestelmän kuluista, viestien välittämisestä, synkronoinnista ja vastaavista toimista, jotka ovat välttämättömiä rinnakkaisen laskennan onnistumiseksi. Kuvatkoon  $p$  rinnakkaisen järjestelmän laskentayksiköitä,  $T_p$  yhden laskentayksikön suorittamaa laskentaa. Koko laskentaan suoritettu aika on siis  $pT_p$ . Olkoon  $T_h$  aika, joka on käytetty hyödylliseen laskentaan. Lisäkustannuksiin kulunut aika  $T_l$  olkoon siis  $T_l = pT_p - T_h$ . (Grama et al. 2003)

Laskentatehon nopeuden kasvu rinnakkaisessa on erityisen kiinnostava verrattuna vastaavaan peräkkäiseen ohjelmaan. Kuten mainittua, Amdahlin laki antaa jo arvion laskennan nopeuden kasvusta. Tässä tapauksessa vastaava peräkkäinen ohjelma ei välttämättä ratkaise ongelmaa samalla algoritmilla, kuin rinnakkainen ohjelma. Syy on turhan laskemisen yhteydessä mainittu joidenkin algoritmien heikko rinnakkaistuvuus. Yleensä vertailuun valitaan tehokkain peräkkäinen algoritmi. (Grama et al. 2003) Laskentatehon nopeuden

kasvun saa toki myös laskemalla suoritusaikojen erotuksen, mutta empiirinen tulos ei yksistään riitä osoittamaan rinnakkaista tai peräkkäistä toteutusta paremmaksi.

Ihannetilanteessa rinnakkaisen ohjelman tehokkuus olisi 100%, eli jokainen laskentayksikkö olisi koko ajan käytössä mahdollisimman suurella kapasiteetilla. Käytännössä tämä tilanne ei toteudu koskaan jo pelkästään rinnakkaisuudesta koituvien lisäkustannusten takia. Tehokkuus voidaan lausua yksinkertaisena yhtälönä

$$\frac{S}{p}, \quad (3)$$

missä  $S$  on laskennan nopeuden kasvu ja  $p$  laskentayksiköiden määrä. (Grama et al. 2003)

Rinnakkaislaskennan hinta määritellään rinnakkaisen ohjelman ajoajan ja käytettyjen laskentayksiköiden tuloksi. Yksittäisen laskentayksikön hinta on nopeimman peräkkäisen algoritmin suoritus aika. Jos rinnakkaisen algoritmin kasvu on asympotoottisesti sama kuin yksittäisen laskentayksikön algoritmin kasvu, rinnakkaista algoritmia sanotaan hintaoptimaaliseksi. (Grama et al. 2003)

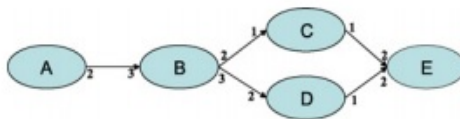
Skaalaus kertoo saavutetaanko rinnakkaislaskennasta laskentayksiköiden määrään suhteessa olevaa hyötyä, eli tehostuuko laskenta laskentayksiköitä lisäämällä. Laskentayksiköiden lisääminen ei loputtomasti kasvata rinnakkaislaskennan tehokkuutta. Hyvin skaalautuvan rinnakkaislaskentamallin laskenta-aika pysyy vakiona ongelmaa ja laskentayksiköiden määrää kasvattaessa. (Rauber ja Gudula 2010)

## 4.5 RVC-CAL-standardi

Rinnakkaisuuden ongelmia on käsitelty aiemmissa alaluvuissa. Tässä alaluvussa esitellään eräs keino hyödyntää rinnakkaisuutta ja sen soveltamista videokoodaukseen. Keino on RVC-CAL, erityisesti videokoodaukseen kehitetty CAL-ohjelmointikielen toteutus (Cal Actor Language). CALin vahvuus on se, että sillä on kääntäjiä monille alustoille, mukaan lukien moniydinprosessorit. RVC-CALiin on saatavilla myös avoimen lähdekoodin toteutus (Raulet et al. 2013).

CAL on korkean tason toimijakeskeinen tietovuo-ohjelmointikieli (high level actor oriented dataflow programming language). Tietovuo-ohjelmoinnissa ohjelmat mallinnetaan suunnattuina verkkoina, joiden solmuja kutsutaan toimijoiksi. Toimijat kuvaavat mieltävaltaisen monimutkaisia laskutoimituksia ja toimijoiden väliset kaaret tiedon liikkumista toimijoiden välillä. Liikkuva tieto abstrahoidaan merkeiksi (token). Toimijat toistuvasti ottavat sisääntulevista kaarista merkkejä, suorittavat laskutoimituksensa ja tuottaa merkkejä ulospäin meneviin kaariin. Kuvan 3 tietovuokaaviossa on viisi toimijaa, A, B, C, D ja

E. Kunkin kaaren lähtöpuolella kerrotaan, kuinka monta merkkiä kyseiseen kaareen tuotetaan ja päättymispuolella kuinka monta merkkiä kyseinen toimija ottaa vastaan. (Gu et al. 2009)



Kuva 3: Yksinkertainen esimerkki tietovuokaaviosta

Tietovuomalli perusmuodossaan ei määrää mitään aikarajoitteita toimijoiden laskennalle. CALissa jokainen toimija on itsenäinen komponentti eivätkä muut toimijat voi vaikuttaa sen tilaan (muuten kuin merkkejä lähettämällä). CALin toimijat on määritelty niiden toimintojen (action) perusteella. Jokainen toiminto määrittää miten toimijan sisäinen tila muuttuu. Toimintoja suoritetaan (fire) riippuen merkkien sisältämästä datasta tai toimijan sisäisistä tiedoista. Toiminnot suoritetaan peräkkäin, mutta missä toimijoiden suoritussjärjestystä ei ole määrätty. Ominaisuuksiensa johdosta CAL sopii hyvin kuvaamaan rinnakkaisia järjestelmiä ja rinnakkaisia algoritmeja. (Gu et al. 2009)

RVC (Reconfigurable Video Coding) on MPEG-ryhmän (Moving Picture Experts Group) kehittämä standardi rinnakkaisten videokoodausmenetelmien suunnitteluun. Standardin tavoitteena on olla yhtenäinen, korkean tason suunnittelutyökalu. Se määrittelee laskentayksiköt toiminnallisiksi yksiköiksi (functional unit) ja toiminnallisten yksiköiden väliset yhteydet laskentayksiköiden välisiksi datapoluiksi. Nämä vuorostaan kuvautuvat CALin toimijoiksi ja kuvaajien kaariksi. CALin käyttö väliesityksenä mahdollistaa kääntämisen monenlaisille alustoille ja jopa suoran syntetisoinnin laitteistoksi. (Gu et al. 2009)

## 5 Videokoodaus ja rinnakkaislaskenta

Tässä luvussa esitellään muutamia uusia ratkaisuja videokoodauksen rinnakkaistamiseen. Luvun tavoite on näyttää, että vaikka rinnakkaislaskenta tuo mukanaan suuren joukon ongelmia, niin sopivalla ongelman rajauksella voidaan rinnakkaislaskennalla saavuttaa hyötyjä videokoodauksen saralla.

### 5.1 Videokoodauksen rinnakkaistamisen tarpeellisuus

Videokoodaus on aina ollut laskennallisesti vaativa ongelma. Viime vuosien kehitys korkeatarkkuuksista videokuvaa kohti on johtanut siihen, että yksiytimiset tietokoneet eivät kykene vaadittavia laskentatehtäviä suorittamaan. Aiemmin ratkaisuna ovat olleet erilaiset multimediaan keskittyneet laskentayksiköt, mutta niiden joustamattomuus ja hinta eivät sovellu nopeasti kehittyvien menetelmien ja jatkuvasti kasvavien laatuvaatimusten tyydyttämiseen. Rinnakkaisohjelmoinnin paradigma siirtää rinnakkaisuuden tietokoneen laitteistoratkaisuista ohjelmistojen puolelle. Laitteistopohjaiset ratkaisut ovat edelleen ohjelmistollisia ratkaisuja tehokkaampia, mutta ero pienenee yleisluontoisten moniydinprosessorien yleistyessä ja rinnakkaisohjelmointimenetelmien kehittyessä. (Choi ja Jang 2012)

Nykypäivänä tehokkaimmat yksiprosessorit pystyvät koodaamaan korkeatarkkuuksista (1080p) videodataa. Kaikilla ja kaikkialla ei ole kuitenkaan mahdollisuutta hyödyntää parhaita saatavilla olevia prosessoreita, joten halvempia ratkaisuja on löydettävä. Samalla videodatan tarkkuus jatkaa kasvamistaan, joten rinnakkaisuus tulee tulevaisuudessa olemaan välttämätöntä niin multimedian esittämiselle kuin tieteellisille videokoodaussovelluksille. On myös turha olla hyödyntämättä lisääntyvää laskentayksiköiden määrää kaikissa tietokoneissa. (Chi et al. 2012, Peng et al. 2012)

### 5.2 Videokoodauksen rinnakkaistamisen ongelmat

Suurin videodatalle erityinen ongelma on jo videodataa käsitelvässä luvussa esitellyt videodatan riippuvuudet. Joitakin ehdotuksia riippuvuuksien karsimiseksi ehdotettiin, mutta ne eivät sovellu sellaisenaan rinnakkaisiin ratkaisuihin. Mainittiin myös, että riippuvuuksien karsimiseen on muitakin ratkaisuja, ja niitä käsitellään tässä luvussa. Tässä aliluvussa esitellään tarkemmin riippuvuuksista johtuvia rinnakkaistamisongelmia sekä muita rinnakkaislaskennan ja videokoodauksen ongelmia.

Rinnakkaisissa laskentayksiköt suorittavat laskentaa itsenäisesti, jolloin toisten laskentayksiköiden tulostan käsiksi pääseminen on vaikeaa ja aikaa vievää. Perinteisissä videokoodausmenetelmissä hyödynnetty ennustaminen johtaa siihen, että sellaisenaan rinnakkaistetuissa perinteisissä menetelmissä on paljon ylimääräisiä kustannuksia lasken-



tayksiköiden välisestä kommunikaatiosta ja niiden välisen synkronoinnin odottamisesta. Toisaalta perinteisissä videokoodausmenetelmissä ruudut on jaettu lohkoihin, jotka ovat toistaan riippumattomat. Lohkojen määrä on kuitenkin liian pieni tehokkaiden, vahvasti rinnakkaisten ratkaisujen toteuttamiseen. Rinnakkaisuus perinteisissä menetelmissä sellaisenaan on siis liian kallista ajan ja laskentayksiköiden suhteen ja liian karkeaa tehokkaasti rinnakkaistuvaksi. (Pieters et al. 2012)

Viestinvälitysparadigmalla toimivien rinnakkaislaskentayksiköiden ongelmaksi muodostuu viestikaistan tai kaistojen leveys. Raaka videodata, erityisesti korkeatarkkuuksinen videodata, vaatii paljon kapasiteettia viestikanavalta. Jos datan määrä ylittää siirtokapasiteetin, niin laskentayksiköiden käyttöaste laskee ja rinnakkaislaskenta hidastuu merkittävästi. Luonteva ratkaisu pullonkaulan purkamiseen olisi kanavan kapasiteetin kasvatus, mutta tämä on useimmiten mahdotonta kustannusten, kanavan saavuttamattomuuden tai tekniikan kehittymättömyyden johdosta. Toisinaan koodattava data on mahdollista jakaa ennalta laskentayksiköille. Tällöin viestikanavaa ei täytetä raakadatalla ja laskentayksiköt toimivat tehokkaasti. Reaaliaikaiseen koodaukseen tämä ei kuitenkaan sovi. (Li et al. 2012)

Rinnakkainen videokoodaus kärsii siis selvästi siitä, että videokoodausmenetelmiä ei ole alun alkaen suunniteltu rinnakkaislaskentaa silmällä pitäen. Rinnakkaisuutta on alettu vaatia, kun laskennan vaatimukset ovat kasvaneet, mutta standardit ja menetelmät eivät ole kehittyneet yhtä nopeasti. Seuraavassa aliluvussa esitellään erilaisia ratkaisuja videokoodauksen rinnakkaistamisen ongelmiin.

## **5.3 Rinnakkaisia videokoodaustoteutuksia**

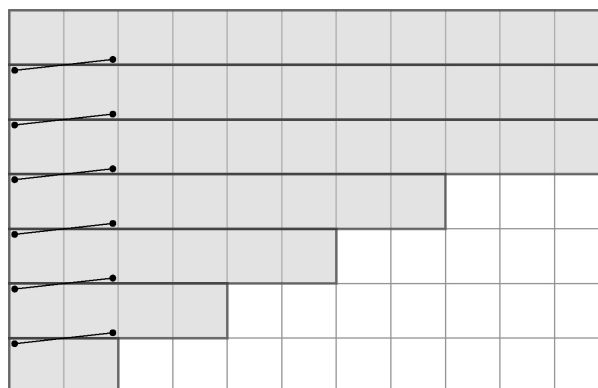
Rinnakkaiset videokoodausmenetelmät voidaan jakaa luokkiin esimerkiksi sen mukaan, miten ne käsittelevät videokoodauksen rinnakkaistamisen ongelmia. Tässä esitelty ratkaisu perustuvat uusiin standardeihin, olemassa olevien menetelmien riippuvuuksien ja synkronoinnin vähentämiseen sekä olemassa olevien menetelmien optimointiin.

### **5.3.1 Uudet standardit**

Rinnakkaisten ratkaisujen yleistyessä on perinteisen videokoodausmenetelmien ongelmat alettu ottaa huomioon uusia videokoodausstandardeja suunniteltaessa. Suunnitteilla on niin korkean tason rinnakkaisuuden kuin matalankin tason rinnakkaisuuden poistoa. Korkean tason rinnakkaisuus viittaa enkoodatun bittijonon rinnakkaisuuksiin ja matalan tason rinnakkaisuus yksittäisten työkalujen ja algoritmien rinnakkaisuuksien vähentämistä. (Choi ja Jang 2012) Edellisessä luvussa käsitelty RVC-CAL on työkalu rinnakkaisen videokoodauksen mahdollistamiseen ja kuuluu näin matalan tason rinnakkaisuuden vähen-

tämiseen. Käsitellään seuraavaksi lyhyesti, miten kehitteillä olevaan HEVC-standardiin (High Efficiency Video Coding) on sisällytetty rinnakkaisuutta ja sille ehdotettua parannusta.

HEVC-standardissa on ehdotettu joitakin keinoja rinnakkaisten ratkaisujen pohjaksi. Ehdotettuja keinoja ovat laattapohjainen (tile based) ja aaltorintamapohjainen rinnakkaisuus (Wavefront Parallel Processing, WPP). Laattapohjaisessa lähestymistavassa videodatan ruudut jaetaan muuttuvan kokoisiin laattoihin, jotka ovat toisistaan riippumattomia. Normaalista lohkojaosta tämä poikkeaa laattojen muuttuvalla koolla, siinä missä lohkot ovat aina saman kokoisia. Muuttuvan kokoiset lohkot mahdollistavat samankaltaisten muotojen tai muiden kokonaisuuksien saamisen samaan laattaan, jolloin laatan sisäinen korrelaatio on korkeampi. Ruudunlaajuiset riippuvuussuhteet kuitenkin rikotaan ja pakkaustehokkuus laskee verrattuna peräkkäiseen koodaukseen. Aaltorintamarinnakkaisuudessa riippuvuussuhteet rikotaan ruutujen rivien välillä. Uuden rivin prosessointi alkaa aina edellisen rivin toisen komponentin prosessoinnin jälkeen. Edellisen rivin toista komponenttia käytetään seuraavan rivin ennustamiseen koodaushäviön pienentämiseksi. Kuvassa 4 on kuvattu aaltorintamakoodauksen eteneminen. (Chi et al. 2012)



Kuva 4: Aaltorintamarinnakkaisen laskennan eteneminen

Aaltorintamarinnakkaisuuden riippuvuudet tarkoittavat sitä, että laskentayksiköitä voi olla käytössä samaan aikaan ruutujen rivien verran. Riippuvuuksista seuraa myös se, että laskentayksiköt eivät voi aloittaa koodausta tai dekodeausta samaan aikaan, mikä aiheuttaa rinnakkaislaskennan tehottomuutta erityisesti suurella määrällä laskentayksiköitä. Chi et al. 2012 ehdottaa tähän ratkaisuksi päällekkäistä aaltorintamaa (Overlapped Wavefront, OWF), jonka kantava idea on, että laskentayksiköt voivat siirtyä laskemaan seuraavaa kuvaa saatuaan oman rivinsä valmiiksi. Tämä asettaa rajoitukset sille, kuinka paljon liikekompensaatiota voidaan käyttää. Kun komponentti tulee koodattavaksi, sen ennustamiseen tarvittavat komponentit täytyy olla jo koodattu. Aaltorintaman tapauksessa tämä tarkoittaa ylempää rivejä. Käytännössä täytyy rajoittaa ruutujenvälistä pystysuuntaista liikekompensaatiota. (Chi et al. 2012)

Chi et al. 2012 esittää, että päällekkäinen aaltorintama tuottaa parhaat tulokset, laatta-

menetelmä toiseksi parhaat ja tavallinen aaltorintama kolmanneksi parhaat heidän testiympäristössään. Tulos antaa ymmärtää, että ehdotettu päällekkäinen aaltorintama -menetelmä kannattaa ottaa huomioon HEVC-standardia kehittäessä. Huomattavaa on myös, että menetelmät toimivat huomattavasti paremmin rinnakkaisina kuin peräkkäisinä, sillä yhdessä säikeessä ajettut testit tuottivat selvästi huonoimmat tulokset.

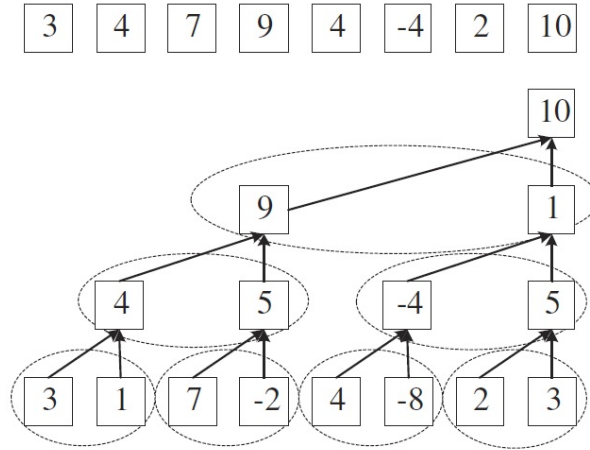
### 5.3.2 Videodatan riippuvuuksien ja synkronoinnin tarpeen vähentäminen

Videodatan riippuvuudet aiheuttavat sen, että rinnakkaistaminen on vaikeaa tai että suurin osa rinnakkaislaskennasta kulutetaan synkronointiin eli käytännössä tyhjäkäyntiin. Tässä aliluvussa esitellään kaksi lähestymistapaa, joilla riippuvuuksien määrää ja niistä seuraavia ylimääräisiä kustannuksia on pyritty vähentämään. Edellisessä aliluvussa esiteltyt aaltorintamamenetelmät ja laattamenetelmä sopisivat tähänkin lukuun, mutta seuraavassa esitetyjä menetelmiä ei ole ehdotettu minkään standardin osaksi.

Aaltorintamamenetelmää muistuttava rinnakkaisuutta vähentävä keino on riveittäin suoritettava koodaus (Line-By-Line Coding, LBLC). Aaltorintaman tavoin rivikoodaus käsittelee videodatan ruutujen rivejä. Laskentayksiköille jaetaan kuitenkin rivien sisään rivien osia. Näin rivi koodataan rinnakkaisesti ja koodattua riviä voidaan käyttää seuraavan rivin ennustamiseen. Rikottu riippuvuus on siis rivien vierekkäisten osien välinen. Synkronoinnin tarvetta on vähennetty staattisella aikataulutuksella. Saman rivin osat jaetaan eri laskentayksiköille ja eri rivien vastaavan osat samoille laskentayksiköille. (Peng et al. 2012)

Esiteltyt menetelmät videokoodauksen rinnakkaistamiseen ovat keskittyneet videodatan rinnakkaisuuden rikkomiseen. On ehdotettu myös ennustamisen tehokkaampaa rinnakkaistamista ja näin synkronoinnin huomattavaa vähenemistä. Pieters et al. 2012 esittää ennustamiseen tehokkaasti rinnakkaistuvan rekursiiviseen kaksinkertaistamiseen (recursive doubling) perustuvaa etuliitesummaa (prefix sum) (Blelloch 1989). Menetelmä saa syötteekseen perusennustuksen sekä jäännösarvot, joiden avulla näytteiden arvot on tallennettu, kuten normaalissakin ennustamisessa. Etuliitesumma lasketaan rinnakkaisilla laskentayksiköillä, eikä edellisten näytteiden koodausta tarvitse odottaa. Etuliitesumma etenee puumaisesti, minkä johdosta siinä on korkeintaan logaritminen määrä synkronointipisteitä näytteiden määrään nähden. Kuva 5 esittelee etuliitesumman etenemisen. Puun tasot ovat mahdollisia synkronointipisteitä. (Pieters et al. 2012)

Molemmat tässä kappaleessa esiteltyt videokoodauksen rinnakkaistamismetodit ovat osoittautuneet testeissä tehokkaiksi. Rivikoodaus nopeuttaa videokoodausta lähes lineaarisesti laskentayksiköiden määrään nähden. Parhaiten se toimii häviöttömillä ja lähes häviöttömillä koodausmenetelmillä, mikä on sopivaa, sillä sellaiset menetelmät tarvitsevat tehokkuutta ollakseen käytännöllisiä. (Peng et al. 2012) Paremmin rinnakkaistu-



Kuva 5: Etuliitesumma johtaa näytteen arvot jäännösarvoista

vat ennustaminen nopeutti H.264-standardilla enkoodatun videon dekoodaamista 2.2-7.9 kertaisesti aaltorintamamenetelmään verrattuna sekä 2.2 kertaista nopeutusta normaaliin ennustamiseen 2160p -tarkkuuksisella videolla. (Pieters et al. 2012)

### 5.3.3 Optimointi

Uusien menetelmien kehittämisen lisäksi voidaan rinnakkaisuutta tuoda olemassa oleviin menetelmiin niitä muuttamatta. Tällöin on tärkeää löytää kulloinkin ratkaistavissa olevaan ongelmaan sopiva rinnakkainen lähestymistapa. Aiemmin esiteltyjä teorioita rinnakkaisuuden mittaamisesta voidaan käyttää erilaisten ratkaisujen analysointiin, mutta todelliset tulokset saadaan vasta käytännön testeillä. (Li et al. (2012))

Li et al. 2012 on tutkinut H.264-standardin mukaisen videokoodauksen optimointia rinnakkaiseen järjestelmään. Tutkimus ei esitä uusia algoritmeja videokoodauksen ongelmien ratkaisemiseen vaan tutkii erilaisia rinnakkaislaskentaan vaikuttavia parametreja, kuten laskentayksiköiden määrää ja konekielisen tason optimoinnin hyödyntämistä. Suurin haitta rinnakkaislaskennan tehokkuudelle tutkimuksessa oli laskentayksiköiden välisen viestinnän hitaus. (Li et al. 2012)

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että eräänlainen raaka rinnakkaistaminen tehostaa videokoodausta hieman. Koska H.264 ei ole suunniteltu rinnakkaiseksi, sen rinnakkainen tehonlisäys ei kasva lineaarisesti laskentayksiköiden määrää kasvattaessa. Samoin yksittäisen laskentayksikön tehokkuus laskee huomattavasti laskentayksiköiden määrää lisätessä erityisesti hitaammilla tietoliikenneyhteyksillä. Paras tulos saavutettiin esijakamalla koodattava videodata laskentayksiköille, jolloin sen siirtämien ei enää aiheuttanut pulonkaulaa. (Li et al. 2012)

### 5.3.4 Rinnakkaislaskennan tuomat hyödyt suorituskykyyn

Videodataa esittelevässä luvussa esiteltiin erilaisia mittareita videodatan laadulle. Videokoodauksen tehokkuutta voidaan mitata esimerkiksi ruutujen koodausnopeudella ( $\frac{\text{ruutua}}{\text{sekunti}}$ ) tai pakkaussuhteella, eli kuinka pieneksi data pakataan verrattuna alkuperäiseen. Alle on kerätty taulukkoon erilaisten rinnakkaisten videokoodausmenetelmien tuomia hyötyjä videokoodaukseen.

Menetelmä	Mitattu suure	Saavutettu hyöty	Lähde
Optimointi	Koodausnopeus	Viestikapasiteetin riittäessä lineaarinen laskentatehon kasvu laskentayksiköihin nähden Li et al. 2012	
Rinnakkainen ennustaminen	Dekoodausnopeus	18.3-21.5 kertainen nopeus verrattuna aaltorintamarinnakkaisuuteen	Pieters et al. 2012
Rinnakkaisuuksien rikkominen	Pakkaussuhde	Parhaimmillaan 14% parempi pakkaussuhde verrattuna peräkkäiseen implementaatioon	Peng et al. 2012
Rinnakkaisuuksien rikkominen	Skaalautuvuus	Lähes lineaarinen skaalautuvuus laskentayksiköiden määrään nähden	Peng et al. 2012
Rinnakkaisuuksien rikkominen	PSNR	Korkeampi PSNR kuin peräkkäisellä menetelmällä erityisesti korkealaatuisessa videossa Peng et al. 2012	

## 5.4 Erilaiset kiihdytysalustat

Yksi rinnakkaislaskennan haasteista on siinä, että rinnakkaiset laskentayksiköt ovat hyvin erilaisia ja yhteisiä tekniikoita ja toteutuksia niille on vaikea löytää. Tässä aliluvussa

käsitellään muutamia erilaisia kiihdytysalustoja ja niiden sopivuutta rinnakkaiseen videokoodaukseen.

#### **5.4.1 Moniydinprosessorit**

Kaikenlaiset tietokoneet aina älypuhelimista tehokkaihin palvelimiin alkavat olla nykypäivänä moniydinprosessoreilla varustettuja (Choi ja Jang 2012). Tämän johdosta tätä kiihdytysalustaa voidaankin pitää tärkeänä erityisesti multimediasovelluksille, joissa videokoodaus on yleinen ja tärkeä operaatio. Esitellyistä tutkimuksista Chi et al. 2012 käytti kiihdytysalustanaan 12-ytimistä prosessoria, kun taas Li et al. 2012 käytti klusteria moniytimisiä prosessoreita. Esitetyt tulokset osoittavat, että videokoodaus voidaan onnistuneesti rinnakkaistaa moniydinprosessoreille, mikä ennustaa hyvää tulevaisuuden rinnakkaisille videokoodaustoteutuksille kuluttajatasen tietokoneissa.

#### **5.4.2 Klusterit**

Klusteri tarkoittaa useampaa yhteen liitettyä tietokonetta, jotka on valjastettu suorittamaan samaa tehtävää. Klusterit ovat tyypillisiä tieteelliselle ja todella vaativalle laskennalle, joka vaatii yksittäisiä koneita suuremman laskentatehon. Esitellyistä tutkimuksista Li et al. 2012 esitteli kaksi erilaista klusteria, toisen Windows-käyttöjärjestelmän PC:illä ja toisen Linux-käyttöjärjestelmällä toimivilla koneilla. Klusterit tuovat rinnakkaislaskentaan omat haasteensa, kuten klusterin laskentayksiköiden heterogeenisyyden, laskentayksiköiden välisen viestinnän ja esimerkiksi klusterin hinnan. Multimedian toistamiseen klusterit ovat liian tehokkaita, mutta esimerkiksi konenäköön tai muihin tieteellisiin sovelluksiin klustereista ja rinnakkaisesta videokoodauksesta voi olla hyötyä.

#### **5.4.3 Grafiikkaprosessorit**

Grafiikkaprosessorit ovat nykypäivänä käytännössä kaikista kuluttajätietokoneista löytyviä prosessoreita, jotka ovat erikoistuneet grafiikan piirtämiseen näyttölaitteille. Rinnakkaiseksi kiihdytysalustaksi grafiikkaprosessorit sopivat niiden rinnakkaisen luonteen puolesta. Nykyaikaisissa grafiikkaprosessoreissa on satoja laskentayksiköitä, joiden kelloaajuus ei ole suuri, mutta riittävä nopeaan rinnakkaiseen laskentaan. Esitellyistä tutkimuksista Pieters et al. 2012 käytti kiihdytysalustanaan grafiikkaprosessoria.

Grafiikkaprosessorit sopivat hyvin videokoodauksen rinnakkaislaskenta-alustoiksi, mikä on luontevaa, piirretäänhän dekodattu videokuva näyttölaitteelle. Joissain uusissa näytönohjaimissa on sisäänrakennettuna tuki ja valmiit ohjelmistoratkaisut joidenkin videokoodausstandardien dekodauksesta varten, joten omia ratkaisuja tätä varten ei välttämättä edes tarvitse tehdä (Nvidia 2013). Omille ratkaisuillekin on olemassa työkalut,

esimerkiksi Pieters et al. 2012 oli toteuttanut oman testiympäristönsä tunnetulla CUDA-ohjelmointikellä, joka on kieli grafiikkaprosessoreiden ohjelmointiin.

## 6 Yhteenveto

Tämä työ esitteli videokoodauksen ja rinnakkaisohjelmoinnin perusteita, ongelmia ja mahdollisuuksia. Videokoodaus on tärkeää erilaisille multimediasovelluksilla ja koneellisesti tapahtuvaan videodatan analyysiin. Rinnakkaisohjelmointi ja -laskenta ovat kustannustehokkaita tapoja lisätä tietokoneiden laskentatehoa ja tulevaisuudessa luultavasti ainoa tapa ratkaista laskennallisesti vaativia ongelmia. Rinnakkaislaskentaan liittyy kuitenkin paljon erilaisia ongelmia, joiden johdosta yhtenäisiä, tehokkaita ratkaisuja rinnakkaislaskennan toteuttamiseksi ei ole vuosikymmenten saatossa pystytty luomaan. Videokoodauksen haasteet taas syntyvät siitä, että videodatan määrä ja laatu kasvavat jatkuvasti ja menetelmien on pysyttävä kehityksessä mukana. Standardointi on kuitenkin hidasta kirjava joukko olemassa olevia standardeja lisää haasteita erityisestä taaksepäin yhteensopivuuteen.

Videokoodauksen ja rinnakkaislaskennan yhdistäminen tarjoaa ratkaisun alati vaativamman videodatan koodaamiseen rinnakkaislaskennan tuoman laskentatehon kasvun myötä. Videokoodauksen rinnakkastaminen ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Rinnakkaislaskennan yleisten haasteiden, videodatan riippuvuuksien ja sen vaatiman tallennus- ja siirtokapasiteetin johdosta rinnakkaislaskennan toteuttaminen rinnakkaislaskentamenetelmillä on vaikeaa. Ongelman ratkaiseminen on kuitenkin välttämätöntä, sillä vaikka nykypäivän tehokkaimmat yksiytimiset prosessorit pystyvät koodaamaan korkeatarckkuuksista videota, niin tulevaisuudessa ne tuskin siihen pystyvät eivätkä viimeistä huutoa olevat yksiytimiset prosessorit sovellu kaikkiin videokoodausta tarvitseviin laitteisiin. Viimeisin huuto on myös aina kalleinta, eikä se luultavimmin ole kustannustehokasta.

Kaikista vaikeuksista huolimatta rinnakkaisia videokoodaussovelluksia on tehty. Monet niistä perustuvat videodatan rinnakkaisuuksien rikkomiseen ja täten parempaan rinnakkaistuvuuteen, mutta pelkällä rinnakkaislaskennan tuonnilla videokoodaukseen on saavutettu kasvua laskentatehossa Rinnakkaisten menetelmien suorituskyky on peräkkäisiä videokoodausmenetelmiä parempi monilla mittareilla. Tulevaisuudessa yhä enemmän videodataa käsittelevät koneet, joten erityisesti objektiivisen laadun täytyy olla hyvä. Rinnakkaislaskennan tehostamista kannattaa myös se, että koneet tekevät parhaat päätelmät häviöttömästi pakatusta datasta, mikä on laskennallisesti vaativampaa. Nykyisten ratkaisujen ongelmana on, että vaikka ne toimivat esitetyillä testialustoilla, niiden yleistäminen esimerkiksi kaikkiin moniydinprosessorin omaaviin kuluttajätietokoneisiin on vaikeaa.

Nyt kun rinnakkaislaskennan on osoitettu tehostavan videokoodausta, on aika katsoa tulevaisuuteen ja miettiä, miten rinnakkaisuudet tuomat hyödyt saataisiin kaikkien rinnakkaisten laskentayksiköiden saavutettaviksi. Tätä tavoitetta tukevat suunnitteilla olevat uudet standardit ja menetelmät, joilla rinnakkaisuuden alustariippuvuus vähenee ja joissa rinnakkaisuuden vaatimukset on otettu huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Uusim-



missa näytönohjainsukupolvissa on jo toteutettu videodatan dekodaaamisen rinnakkaisia menetelmiä. Tulevaisuudessa tällaiset laitteistoratkaisut tulevat lisääntymään ja samalla ohjelmistoratkaisut kehittyvät mahdollistaen rinnakkaislaskennan yleistymisen kaikilla rinnakkaisilla laskenta-alustoilla.

# Lähteet

- Gene M. Amdahl. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. *AFIPS Conference Proceedings*, sivut 483–485, 1967.
- Marios C. Angelides ja Harry Agius. *Handbook of MPEG Applications : Standards in Practice*. Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2011. ISBN 978-0-470-75507-0 (nid.), 978-0-470-97458-2 (elektr.). 551 s.
- B. Apopei ja T.J. Dodd. Automatic parallelisation for lti mimo state space systems using fpgas. an optimisation for cost & performance. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 72(8):990 – 1007, 2012. ISSN 0743-7315. doi: 10.1016/j.jpdc.2012.04.009. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731512001050>.
- M. Ben-Ari. *Principles of Concurrent and Distributed Programming*. Pearson, Harlow, Essex, United Kingdom, toinen painos, 2006. ISBN 978-0-321-31283-9. 361 s.
- G.E. Blelloch. Scans as primitive parallel operations. *Computers, IEEE Transactions on*, 38(11):1526–1538, 1989. ISSN 0018-9340. doi: 10.1109/12.42122.
- Chi Ching Chi, Mauricio Alvarez-Mesa, Ben Juurlink, Gordon Clare, Felix Henry ja Thomas Schriel. Parallel scalability and efficiency of hevc parallelization approaches. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 22(12):1827–1838, joulukuu 2012.
- Kiho Choi ja Euee S. Jang. Leveraging parallel computing in modern video coding standards. *IEEE Computer Society*, 12(0):7–11, heinäkuu 2012.
- Cisco. Ciscon ennustus mobiilidatan kehityksestä. [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html), tammikuu 2013.
- Ke-Lin Du ja M. N. S. Swamy. *Wireless Communication Systems - From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, New York, USA, 2010. ISBN 9780511716898 (elektr.). 551 s.
- Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis ja Vipin Kumar. *Introduction to Parallel Computing*. Pearson, Harlow, Essex, United Kingdom, toinen painos, 2003. ISBN 0-201-64865-2. 636 s.
- Ruirui Gu, J.W. Janneck, S.S. Bhattacharyya, M. Raulet, M. Wipliez ja W. Plishker. Exploring the concurrency of an mpeg rvc decoder based on dataflow program analysis. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 19(11):1646–1657, marraskuu 2009. ISSN 1051-8215. doi: 10.1109/TCSVT.2009.2031517.

- Jong-Seok Lee, Francesca De Simone ja Touradj Ebrahimi. Efficient video coding based on audio-visual focus of attention. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 22(8):704 – 711, 2011. ISSN 1047-3203. doi: 10.1016/j.jvcir.2010.11.002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104732031000146X>. Emerging Techniques for High Performance Video Coding.
- Dongmei Li, Shuai Peng ja Zhaohui Li. Design and optimization of high efficiency parallel video coding system. *Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, sivut 592–596, 2012.
- Ke Liao, Shiguo Lian, Zhichuan Guo ja Jinlin Wang. Efficient information hiding in h.264/avc video coding. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 22(8):704–711, kesäkuu 2011.
- Hans Meuer, Erich Strohmaier, Jack Dongarra ja Horst Simon. Listaus maailman super-tietokoneista. <http://www.top500.org/>, maaliskuu 2013.
- A. Mitra. *Digital Video: Moving Images and Computers*. Digital world. Facts On File, Incorporated, 2010. ISBN 9781438134611. URL [http://books.google.fi/books?id=6M86Q9\\\_1oMAC](http://books.google.fi/books?id=6M86Q9\_1oMAC).
- Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38 (8), huhtikuu 1965.
- Miquel Mugal ja Lynn R. Kirlin. Compression enhancement of video motion of mouth region using joint audio and video coding. *Fifth IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, 2002.
- NVidia. Nvidian kehittäjien verkkosivut. <https://developer.nvidia.com/nvidia-video-codec-sdk>, huhtikuu 2013.
- Hyungsuk Oh ja Wonha Kim. Video processing for human perceptual visual quality-oriented video coding. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 22(4):1526–1535, 2013. ISSN 1057-7149. doi: 10.1109/TIP.2012.2233485.
- Xiulian Peng, Jizheng Xu, You Zhou ja Feng Wu. Highly parallel line-based image coding for many cores. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(1):196–206, tammikuu 2012.
- Bart Pieters, Charles-Frederik Hollemeersch, Jan De Cock, Peter Lambert ja Rik Van de Walle. Data-parallel intra decoding for block-based image and video coding on massively parallel architectures. *Signal Processing: Image Communication*, 27(3):220 – 237, 2012. ISSN 0923-5965. doi: 10.1016/j.image.2012.01.001. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596512000021>.

- Xiaoin Qi, Mianshu Chen ja Hexin Chen. *A CAVLC Embedded Method for Audio-Video Synchronization Coding Based on H.264*. IEEE, 2011. ISBN 9781612847719.
- Arun Raman, Kim Hanjun, Taewood Oh, Jae W. Lee, David I. August, Mary Hall ja David Padua. Parallelism orchestration using dope: the degree of parallelism executive. *32nd ACM SIGPLAN conference*, sivut 26–37, 2011.
- Thomas Rauber ja R nger Gudula. *Parallel Programming: For Multicore and Cluster Systems*. Springer, Berlin, Germany, 2010. ISBN 978-3-642-04817-3. 455.
- Mickael Raulet, Matthieu Wipilez, Jean-Francois Nezan ja Marco Mattavelli. Orcc-ohjelmiston kotisivu. <http://orcc.sourceforge.net/>, maaliskuu 2013.
- Iain Richardson. *H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, toinen painos, 2010. ISBN 978-0-470-51692-8 (nid.), 978-0-470-98928-9 (elektr.). 348 s.
- VideoLan. x264-ohjelmiston kotisivut. <http://www.videolan.org/developers/x264.html>, maaliskuu 2013.
- YouTube. Youtube-statistiikkaa. [http://www.youtube.com/t/press\\_statistics](http://www.youtube.com/t/press_statistics), tammi-  
mikuu 2013.